კომუნიკაცია დედამიწის დაბალი ორბიტის თანამგზავრებით

სერგო შავგულიძე
ტექნიკურ მეცნიერებათა დოქტორი, პროფესორი,
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ნოდარ უღრელიძე
ტექნიკურ მეცნიერებათა დოქტორი, პროფესორი,
საქართველოს უნივერსიტეტი

მამუკა ჩხაიძე
აკადემიური დოქტორი, ასოცირებული პროფესორი,
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

საქართველოს უნივერსიტეტის
გ ა მ ო მ ც ე მ ლ ო ბ ა

თბილისი
2023

სერგო შავგულიძე, ნოდარ უღრელიძე, მამუკა ჩხაიძე

კომუნიკაცია დედამიწის დაბალი ორბიტის თანამგზავრებით

Sergo Shavgulidze, Nodar Ugrelidze, Mamuka Chkhaidze

COMMUNICATION WITH SATELLITES IN LOW EARTH ORBIT

წინამდებარე წიგნი წარმოგვიდგენს ახალ ტექნოლოგიებს და კვლევის პერსპექტივებს LEO თანამგზავრულ საკომუნიკაციო სისტემებში, ასევე ძირითად ტექნიკურ გამოწვევებს, დაკავშირებულს LEO თანამგზავრების გლობალურ უსადენო საკომუნიკაციო პლატფორმაში ინტეგრირებასთან, რომელიც გაკეთებულია უახლეს პუბლიკაციებზე და სამეცნიერო მიღწევებზე დაყრდნობით. კერძოდ, განხილულია მომდევნო თაობის მეგათანამგზავრული ქსელების ეფექტიანი გამოყენების შესაძლებლობები თანასწორი წვდომისთვის და ამ კუთხით არსებული გამოწვევები; შესწავლილია მოდელირების ახალი ტექნიკა LEO თანამგზავრებზე დაფუძნებული ულტრა მკვრივი საკომუნიკაციო სისტემებისთვის; განხილულია ორბიტული პერიფერიის განტვირთვის შესაძლებლობა LEO თანამგზავრების მეგათანავარსკვლავედებზე გამოთვლითი კუთხით თანასწორი წვდომისთვის; წარმოდგენილია წრიულგზიანი ქსელები, რომლებიც ახორციელებენ წვდომას ყველასათვის და რომელთა დანერგვაც შესაძლებელია შეყოვნებისადმი ტოლერანტული ქსელური პროტოკოლებით და იაფფასიანი ნანო-თანამგზავრებით; განხილულია LEO თანამგზავრული წვდომის ქსელებთან დაკავშირებული LEO-SAN პერსპექტიული ტექნოლოგია, რომელიც შეავსებს ტერესტრიალურ ფიჭურ ქსელებს მომავალი 6G უსადენო ქსელებისთვის, გამტარუნარიანობისა და დაფარვის მნიშვნელოვნად გაზრდით; წარმოდგენილია მიწისქვეშა-თანამგზავრული კავშირის სისტემის არქიტექტურა და შეფასებულია მისი ტექნიკური შესაძლებლობები რეალური მეურნეობის სცენარის ვრცელი კომპიუტერული სიმულაციის მეშვეობით; წარმოდგენილია LEO თანამგზავრებზე დაფუძნებული პოზიციონირება მომავალი თანასწორი წვდომის ლოკალიზაციისთვის და ამ საკითხის ტექნიკურ-ეკონომიკური შესწავლა LEO თანამგზავრული მეგათანავარსკვლავედების არსებული უპირატესობებისა და გამოწვევების განხილვით; შესწავლილია კოსმოსურ-საჰაერო-სახმელეთო FSO ქსელები მაღალი გამტარუნარიანობის მქონე თანამგზავრული კომუნიკაციებისთვის; განხილულია თანამგზავრული ქსელების ფენებად დაყოფა, რომელიც ერთ-ერთი მთავარი მეთოდია ტერესტრიალურ 5G/B5G ქსელებში და პრაქტიკულად არ არის შესწავლილი თანამგზავრულ სისტემებში. წიგნი წარმოგვიდგენს ამ მიმართულებებით ბოლოდროინდელი მიღწევების სისტემურ განხილვას, შესაძლო გამოწვევებსა და კვლევით მიმართულებებს, რომლებიც ხელს შეუწყობს დაბალი ორბიტის თანამგზავრებით კომუნიკაციის პრობლემების გადაჭრას.

ვფიქრობთ, რომ მასალა სასარგებლო იქნება და დახმარებას გაუწევს საინფორმაციო ტექნოლოგიებისა და კომუნიკაციების დარგში მომუშავე სპეციალისტებს და აკადემიურ პერსონალს, ბაკალავრიატის მაღალი კურსის სტუდენტებს, მაგისტრანტებსა და დოქტორანტებს.

რედაქტორი — მარინა ჟღენტი

დიზაინი და დაკაბადონება — მაია ფეიქრიშვილი

© სერგო შავგულიძე, ნოდარ უღრელიძე, მამუკა ჩხაიძე, 2023.

ნაშრომი შესრულებულია საქართველოს უნივერსიტეტის მხარდაჭერითა და დაფინანსებით.

ყველა უფლება დაცულია.
დაუშვებელია ამ გამოცემის მთლიანი ან ნაწილობრივი რეპროდუცირება გამომცემლის წერილობითი ნებართვის გარეშე.

ISBN 978-9941-9844-8-8

სარჩევი

წინასიტყვაობა 5

თავი 1. მომდევნო თაობის მეგათანამგზავრული ქსელები თანასწორი წვდომისთვის: შესაძლებლობები, გამოწვევები და ეფექტიანობა 9
1.1. შესავალი 9
1.2. მეგათანავარსკვლავედების შესაძლებლობები 10
1.3. მეგათანავარსკვლავედებთან დაკავშირებული გამოწვევები 13
1.4. მეგათანავარსკვლავედების მახასიათებლები 17
1.5. კომპიუტერულ სიმულაციაზე დაფუძნებული მიდგომები 20
1.6. პირველი თავის დასკვნა 21

თავი 2. LEO თანამგზავრებზე დაფუძნებული ულტრა მკვრივი საკომუნიკაციო სისტემები: მოდელირების ახალი ტექნიკა 22
2.1. შესავალი 22
2.2. LEO თანამგზავრული სისტემის უპირატესობები და გამოწვევები 22
2.3. SG-ზე დაფუძნებული ანალიზური ჩარჩო 24
2.4. არხის მოდელი. 25
2.5. SG-ზე დაფუძნებული კომპიუტერული სიმულაციის დაყენება 29
2.6. გამოწვევები და მომავლის სცენარები 32
2.7. მეორე თავის დასკვნა 33

თავი 3. ორბიტული პერიფერიის განტვირთვა LEO თანამგზავრების მეგათანავარსკვლავედებზე გამოთვლითი კუთხით თანასწორი წვდომისთვის 34
3.1. შესავალი 34
3.2. პერიფერია-ღრუბელი პროცესების უწყვეტობა და ორბიტული პერიფერიული გამოთვლების შესაძლებლობები 35
3.3. საცნობარო სცენარი. 36
3.4. განტვირთვის სტრატეგია და მახასიათებლების შეფასება 38
3.5. მესამე თავის დასკვნა და არსებული გამოწვევები 41

თავი 4. წრიულგზიანი ქსელები: წვდომა ყველასათვის. 42
4.1. შესავალი 42
4.2. CubSat-ები LEO-ში და შეყოვნების მიმართ ტოლერანტული ქსელები 42
4.3. წრიულგზიანი ქსელები 43
4.4. მახასიათებლების შეფასება. 46
4.5. დანერგვა და ორბიტაზე მუშაობის შემოწმება 47
4.6. მომავლის პერსპექტივები და მეოთხე თავის დასკვნა 50

თავი 5. LEO თანამგზავრული წვდომის ქსელები და გზა 6G-ის მიმართულებით: გამოწვევები და მიდგომები. 51
5.1. შესავალი 51
5.2. შემთხვევითი წვდომა LEO-SAN-ისთვის 53
5.3. სხივების მართვა LEO-SAN-ში. 55
5.4. დოპლერის ეფექტის მიმართ მდგრადი გადაცემის ტექნოლოგია 59
5.5. მომავალი კვლევების პერსპექტივა 6G-ის მიმართულებით 62
5.6. მეხუთე თავის დასკვნა 63

თავი 6. მიწისქვეშა–თანამგზავრული კავშირის სისტემის არქიტექტურა და ტექნიკური შესაძლებლობები . . . 64
6.1. შესავალი . . . 64
6.2. ტექნიკური საფუძვლები და უახლესი განვითარება . . . 66
6.3. UTS ქსელის არქიტექტურები. . . . 68
6.4. U-DTS LoRaWAN-ის ბაზაზე: დისტანციური მეურნეობის კონცეფციის დადასტურება . . . 69
6.5. გამოწვევები და კვლევის შემდგომი მიმართულებები . . . 75
6.6. მეექვსე თავის დასკვნა . . . 76

თავი 7. LEO თანამგზავრებზე დაფუძნებული პოზიციონირება მომავალი თანასწორი წვდომის ლოკალიზაციისთვის . . . 77
7.1. შესავალი . . . 77
7.2. LEO თანამგზავრების მეგათანავარსკვლავედები და მათი შესაძლებლობები პოზიციონირების კუთხით . . . 78
7.3. სცენარების მაგალითი და დიზაინთან დაკავშირებული მოსაზრებები . . . 80
7.4. თანასწორი წვდომის უწყვეტ PNT სერვისებთან დაკავშირებული შესაძლებლობები, გამოწვევები და გადაწყვეტები . . . 84
7.5. შემაჯამებელი დისკუსიები და მეშვიდე თავის დასკვნა . . . 88

თავი 8. კოსმოსურ–საჰაერო–სახმელეთო FSO ქსელები მაღალი გამტარუნარიანობის მქონე თანამგზავრული კომუნიკაციებისთვის . . . 89
8.1. შესავალი . . . 89
8.2. კოსმოსურ–საჰაერო–სახმელეთო FSO ქსელები . . . 90
8.3. გაუმჯობესებული SAG-FSO ქსელი . . . 91
8.4. ინტეგრირებული SAG-FSO ქსელი თანამგზავრული კომუნიკაციების სისტემებისთვის . . . 94
8.5. მერვე თავის დასკვნა . . . 97

თავი 9. თანამგზავრული ქსელების ფენებად დაყოფა: არქიტექტურა, მახასიათებლების ანალიზი და გამოწვევები . . . 98
9.1. შესავალი . . . 98
9.2. 6G თანამგზავრული ქსელი . . . 99
9.3. შესაძლო თანამგზავრული VNE მეთოდები . . . 100
9.4. ჰენდოვერის სტრატეგიები . . . 103
9.5. მახასიათებლების ანალიზი . . . 103
9.6. მეცხრე თავის დასკვნა . . . 108

ბოლოთქმა . . . 110
ლიტერატურა . . . 111
აბრევიატურები და აკრონიმები . . . 117

წინასიტყვაობა

ინტერნეტზე წვდომა არის ცალკეული პირებისა და ორგანიზაციების შესაძლებლობა, დაუბრკოლებლად დაუკავშირდნენ ინტერნეტს კომპიუტერებისა და სხვა მოწყობილობების გამოყენებით და, ასევე, განახორციელონ წვდომა ისეთ სერვისებზე, როგორიცაა ელექტრონული ფოსტა და მსოფლიო ქსელი (World Wide Web). კაცობრიობა იზიარებს და სრულად მხარს უჭერს ინტერნეტთან წვდომის საჭიროებას და აუცილებლობას. თუმცა, ტელეკომუნიკაციის საერთაშორისო კავშირის (ITU) შეფასებით, 2022 წლისთვის მსოფლიო მოსახლეობის მხოლოდ 66 პროცენტი იყო ინტერნეტით დაკავშირებული. თანამგზავრებს აქვთ გამორჩეული შესაძლებლობა დაფარონ დიდი გეოგრაფიული ტერიტორიები მინიმალური სახმელეთო ინფრასტრუქტურით, რაც მათ მიმზიდველ გადაწყვეტად აქცევს მზარდი აპლიკაციებისა და სერვისებისთვის, როგორც დამოუკიდებელი სისტემის, ან როგორც ინტეგრირებული თანამგზავრულ–სახმელეთო სისტემის სახით. გეოსტაციონარულ ორბიტაზე (GEO) მყოფი თანამგზავრები მოძრაობენ წრიულ ორბიტაზე ეკვატორულ სიბრტყეში 35 678 კმ სიმაღლეზე თითქმის ნულოვანი დახრილობის კუთხით. GEO–ს დიდი დაფარვის მიუხედავად, ეს თანამგზავრები ვერ დაფარავენ მაღალი გეოგრაფიული განედების მქონე რეგიონებს. გარდა ამისა, გეოსტაციონარული ორბიტის თანამგზავრებსა და მიწისპირა სადგურებს შორის საკომუნიკაციო ლინკები დაუცველია გავრცელების მაღალი დანაკარგების მიმართ და, შესაბამისად, საჭიროა დიდი ანტენები გადაცემის მაღალი სიმძლავრით. უფრო მეტიც, GEO თანამგზავრებისთვის გავრცელების შეყოვნება მაღალია ხანგრძლივი გავრცელების გზის გამო, რაც მათ არახელსაყრელს ხდის შეყოვნებისადმი მგრძნობიარე სერვისებისთვის. მეორე მხრივ, არაგეოსტანციონალური ორბიტის თანამგზავრები, რომლებიც მოიცავენ დედამიწის დაბალი ორბიტის (LEO), დედამიწის საშუალო ორბიტის (MEO) და მაღალი ელიფსური ორბიტის (HEO) თანამგზავრებს, მუდმივად გადაადგილდებიან წრიულ ორბიტაზე უფრო დაბალ სიმაღლეებზე, ვიდრე GEO თანამგზავრები და, შესაბამისად, მათთვის საკომუნიკაციო ლინკების დანაკარგები და სიგნალის გავრცელების გამო წარმოქმნილი შეყოვნება უფრო დაბალია. ვინაიდან ეს ქვედა ორბიტის თანამგზავრები ემსახურებიან უფრო მცირე დაფარვის ზონებს, ვიდრე GEO თანამგზავრები, საჭიროა არაგეოსტანციონალური ორბიტის თანამგზავრების მეგათანავარსკვლავედების შექმნა დედამიწის სრული დაფარვის მისაღწევად, მაღალი გეოგრაფიული განედების რეგიონების ჩათვლით.

LEO თანამგზავრების მეგათანავარსკვლავედების ქსელებს, რომლებიც უახლოეს მომავალში ათასობით თანამგზავრისგან იქნება დაკომპლექტებული, მათი საყოველადგილო განთავსებიდან გამომდინარე, აქვთ გლობალური მასშტაბით დაკავშირების პოტენციალი და დღეისათვის არსებული „ციფრული განხეთქილების“ გადალახვის შესაძლებლობა. მხარდაჭერილი უფრო ეკონომიური გაშვების სისტემებითა და რეკონფიგურირებადი პროგრამული არქიტექტურით, ახალი LEO თანამგზავრების შესაძლებლობები მნიშვნელოვნად აღემატება ტრადიციული თანამგზავრების შესაძლებლობებს. უფრო მეტიც, ამ მეგათანავარსკვლავედებს შეუძლიათ მომსახურება გაუწიონ არა მხოლოდ მეჩხრად დასახლებულ ტერიტორიებს, არამედ მჭიდროდ დასახლებულ ურბანულ ცენტრებსაც, რათა უზრუნველყონ და შეინარჩუნონ მათი ეკონომიკური მდგრადობა. თუმცა, წვდომის თანასწორობის უზრუნველყოფა მაინც მოითხოვს არქიტექტურულ, მენეჯმენტულ და საოპერაციო ცვლილებებს.

წინამდებარე წიგნში, რომელიც მიმოხილვითი ხასიათისაა, განხილულია LEO თანამგზავრული მეგათანავარსკვლავედების საკომუნიკაციო ქსელების თემატიკასთან დაკავშირებული კვლევის შედეგები, რაც უახლეს პუბლიკაციებსა და სამეცნიერო მიღწევებზე დაყრდნობითაა მომზადებული. საქმე ისაა, რომ ბოლო პერიოდში აღნიშნული მიმართულებით ძალიან ბევრი საინტერესო და სერიოზული საჟურნალო პუბლიკაცია გახდა ხელმისაწვდომი. გადავწყვიტეთ, ჩვენი აზრით საუკეთესო ნაშრომები შეგვეკრიბა (ყველა მათგანი მოცემულია წიგნის ბოლოს მითითებულ ლიტერატურაში), მოგვეხდინა მათი სისტემატიზაცია და ერთიან სტრუქტურაში გაერთიანება, ქართულ ენაზე წარმოგვედგინა ამ ნაშრომებში მოყვანილი ძირითადი შედეგები და დაგვეწერა ეს წიგნი. შეზღუდული ფორმატის გამო, ავარჩიეთ მხოლოდ რამდენიმე პერსპექტიული მიმართულება, რომლებიც მოიცავს LEO თანამგზავრული კომუნიკაციების სხვადასხვა ასპექტს და, რომლებიც თავების მიხედვით შეჯამებულია შემდეგნაირად:

ციფრული კავშირი გახდა კეთილდღეობის საფუძველი და არსებული საზოგადოების აუცილებელი საჭიროება. მიუხედავად ამ დამოკიდებულებისა, ინტერნეტზე შეზდული წვდომა კვლავ გავრცელებულ პრობლემად რჩება, რაც დიდწილად დამოკიდებულია სოციალურ–ეკონომიკურ და გეოგრაფიულ ფაქტორებზე. პერსპექტიული გადაწყვეტა გლობალური წვდომის თანასწორობის მისაღწევად ეფუძნება ინტეგრირებულ თანამგზავრულ–სახმელეთო

ქსელებს, რომლებიც ეყრდნობა LEO თანამგზავრების მეგათანავარსკვლავედებს. მიუხედავად იმისა, რომ LEO თანავარსკვლავედების სარგებელი ავსებს ტერესტრიალური ქსელების ნაკლოვანებებს, მათი ინკორპორაცია გავლენას ახდენს ქსელის დიზაინზე, მატებს სირთულეს და წარმოიშობა ახალი გამოწვევები. **პირველი თავი** წარმოგვიდგენს შემდეგი თაობის LEO მეგათანავარსკვლავედების სისტემურ ანალიზს, ასახავს შესაძლებლობებს იმ მრავალი სარგებლის გამო, რომელიც ამ თანავარსკვლავედებს შეუძლიათ მოიტანონ და ხაზს უსვამს მთავარ გამოწვევებს. იგი ასევე გვთავაზობს ანალიზური მოდელების მოკლე მიმოხილვას და ხაზს უსვამს კომპიუტერული სიმულაციის თანამედროვე მიდგომებს შემდეგი თაობის თანამგზავრული მეგათანავარსკვლავედებისთვის. შესაბამისად, ეს თავი მკითხველთა ფართო აუდიტორიას, მათ შორის ქსელის დიზაინერებს აწვდის არსებით ინფორმაციას თანამგზავრული ქსელის მუშაობის შესახებ.

LEO თანამგზავრები შეუცვლელ როლს ასრულებენ თანასწორი წვდომის ქსელში მისი დაბალი შეყოვნების, დიდი გამტარუნარიანობისა და უწყვეტი გლობალური დაფარვის გამო. ასეთი უპრეცედენტოდ უზარმაზარი არარეგულარული სისტემისთვის, სტოქასტური გეომეტრია (SG) კვლევის შესაფერისი მეთოდია. SG მოდელს შეუძლია არა მხოლოდ გაუმკლავდეს ქსელის მზარდ მასშტაბებს, არამედ ზუსტად გააანალიზოს და შეაფასოს ქსელის მუშაობა. **მეორე თავში** განხილულია რამდენიმე სტანდარტული თანამგზავრული განაწილების მოდელი და თანამგზავრულ–სახმელეთო არხის მოდელები. სისტემური დონის მეტრიკები, როგორიცაა დაფარვის ალბათობა და სხვა შუალედური მნიშვნელობები წარმოდგენილია არატექნიკური აღწერის მეშვეობით. შემდეგ შესწავლილია კარიბჭეების სიმკვრივის, თანამგზავრების რაოდენობის და მათი ზღვის დონიდან სიმაღლის გავლენა შეყოვნებაზე და დაფარვის ალბათობაზე. დაბოლოს, ამ თავში წარმოდგენილია შესაძლო გამოწვევები და შესაბამისი გადაწყვეტილებები SG–ზე დაფუძნებული LEO თანამგზავრული სისტემების ანალიზისთვის.

LEO თანამგზავრების მეგათანავარსკვლავედი ხდება კონკრეტული რეალობა. ისეთი კომპანიების მიერ, როგორიცაა SpaceX და OneWeb უკვე დაწყებულია ასობით LEO თანამგზავრის გაშვება და ამუშავებულია კონკრეტული სერვისები. მაშინაც კი, თუ ასეთი LEO თანამგზავრული თანავარსკვლავედების დანიშნულება დღესდღეობით მხოლოდ ინტერნეტთან თანასწორი წვდომის უზრუნველყოფაა მთელ მსოფლიოში, მათი განთავსება ადასტურებს მათი არსებობის მიზანშეწონილობას და ვარაუდობს სარგებლიანობას მომავალი მიზნებისთვის. **მესამე თავში** ჩვენ გარკვეულ ნათელს მოვფენთ ქსელური გამოთვლითი პარადიგმის შესაძლო ინტეგრაციას LEO თანამგზავრულ მეგათანავარსკვლავედებში. ტერესტრიალურ და/ან არატერესტრიალურ კვანძებს შეუძლიათ ისარგებლონ გამოთვლების გადატვირთვით ორბიტულ პერიფერიულ (OE) პლატფორმაზე, რომელიც ხელმისაწ–ვდომია თანამგზავრული თანავარსკვლავედების მეშვეობით, მისი სწრაფი და განაწილებული გამოთვლითი შესაძლებლობების გამოყენებით. ამ კონტექსტში, წინასწარი ანალიზი უჩვენებს, რომ ამოცანების გადატვირთვის სტრატეგიებმა შეიძლება გამოიწვიოს ტექნიკური მახასიათებლების გაუმჯობესება, რაც ხსნის ახალ გამოწვევებს OE პლატფორმების დიზაინისა და დარეგულირების პროცესში.

რამდენიმე მილიარდ ადამიანს ამჟამად არ აქვს სანდო წვდომა ინტერნეტზე და, შესაბამისად, ცოდნის უზარმაზარ წყაროზე. **მეოთხე თავში** ჩვენ აღვწერთ საველე პირობებში ტესტირებულ საკომუნიკაციო მიდგომას, რომელიც აერთიანებს პატარა ყუთის ფორმის მქონე თანამგზავრულ (CubeSat) პლატფორმებს და შეყოვნებისადმი ტოლერანტული ქსელის (DTN) გადაწყვეტილებებს, რათა უზრუნველყოს ასინქრონული კავშირი მოსახლეობასთან და რეგიონებთან, რომლებსაც ინტერნეტი არ ემსახურება. შედეგად მიღებული ქსელების კლასი ცნობილია როგორც წრიულგზიანი ქსელები (RRN), და ეს არის ქსელური მიდგომა, რომელიც აგებულია მზის სისტემის ინტერნეტის მშენებლობისთვის შემუშავებულ ტექნოლოგიაზე. DTN კვანძების აუცილებელი თვითკმარობა საშუალებას იძლევა დაბალი ღირებულებით და ეტაპობრივად განხორციელდეს ქსელში წვდომა, რათა მოხდეს ისეთი მოსახ–ლეობის მხარდაჭერა, რომელიც მოკლებულია LEO თანამგზავრული მეგათანავარსკვლავედების იაფფასიან ინტერნეტმომსახურებას. ჩვენ წარმოვადგენთ RRN არქიტექტურას და კომპიუტერული სიმულაციის საშუალებით ვაფასებთ სისტემის ტექნიკურ მახასიათებლებს. ამ უკანასკნელზე დაყრდნობით, ჩვენ განვიხილეთ ღია კოდის DTN პროტოკოლის იმპლემენტაცია, სახელად μD3TN, რომელიც დაინერგა და შეფასდა RRN კონცეფციის პირველ ორბიტულ ექსპერიმენტში, ევროპის კოსმოსური სააგენტოს (ESA) OPS–SAT თანამგზავრის გამოყენებით. ეს თავი წარმოგვიდგენს ექსპერიმენტის შედეგებს, სადაც აღწერილი RRN მიდგომა გამოცდილია კონკრეტული გამოყენების შემთხვევებისთვის. მიღებული შედეგები განაპირობებს აპლიკაციების ახალი სფეროს შექმნას.

თანამგზავრული საკომუნიკაციო ტექნოლოგიების სწრაფი განვითარებით, კოსმოსური წვდომის ქსელი განიხილება, როგორც მომავალი მეექვსე თაობის (6G) ტერესტრიალური ქსელის პერსპექტიული დამატება.

გარდა მიწისპირა საბაზო სადგურებისა, თანამგზავრული კვანძები, განსაკუთრებით კი LEO თანამგზავრები, ასევე შეიძლება გამოყენებულ იქნეს, როგორც საბაზო სადგურები ინტერნეტით წვდომისთვის და შეადგინონ ახალი ტიპის კონფიგურაცია – LEO თანამგზავრებზე დაფუძნებული წვდომის ქსელი (LEO-SAN). მოსალოდნელია, რომ LEO-SAN უზრუნველყოფს უწყვეტ მასობრივ წვდომას და გაფართოებულ დაფარვას სიგნალის მაღალი ხარისხით. თუმცა, მისი პრაქტიკული განხორციელება ჯერ კიდევ აწყდება მნიშვნელოვან ტექნიკურ გამოწვევებს, როგორებიცაა, მაგალითად, მაღალი მობილურობა და შეზღუდული ბიუჯეტი LEO თანამგზავრული კვანძების სასარგებლო საკომუნიკაციო დატვირთვისთვის. **მეხუთე თავი** მიზნად ისახავს გამოავლინოს ის ძირითადი ტექნიკური პრობლემები, რომლებიც სრულად არ არის გადაწყვეტილი არსებულ LEO-SAN-ის დიზაინში, კერძოდ, შესწავლილია შემთხვევითი წვდომის, სხივის მართვისა და დოპლერის ეფექტის მიმართ მდგრადი გადაცემის ტექნოლოგიები. უფრო კონკრეტულად, LEO-SAN-ში შემთხვევითი წვდომის კრიტიკული საკითხები განიხილება დაბალ მოქნილობასთან, გადაცემის ხანგრძლივ შეყოვნებასთან და არაეფექტიან „ხელის ჩამორთმევასთან" დაკავშირებით. შემდეგ LEO SAN-ის სხივის მართვა გამოკვლეულია გავრცელების რთულ გარემოში მაღალი მობილურობისა და სასარგებლო დატვირთვის შეზღუდული ბიუჯეტის პირობებში. გარდა ამისა, შესწავლილია დოპლერის წანაცვლებების გავლენა LEO-SAN-ზე. ასევე განიხილება პერსპექტიული ტექნოლოგიები ამ გამოწვევების გადასაჭრელად. დაბოლოს, წარმოდგენილია სამომავლო კვლევის მიმართულებები.

უსადენო მიწისქვეშა სენსორული ქსელები (WUSN) გვპირდება მნიშვნელოვან სოციალურ და ეკონომიკურ სარგებელს სხვადასხვა ვერტიკალებში. თუმცა, ბევრი შესაბამისი გამოყენების სცენარი განლაგებულია შორეულ ადგილებში, სადაც არ არის ხელმისაწვდომი დამხმარე ინფრასტრუქტურა. ამ პრობლემის გადასაჭრელად, **მეექვსე თავში** ჩვენ ვახდენთ მიწისქვეშა პოზიციიდან თანამგზავრთან პირდაპირი კავშირის (U-DtS) მიდგომის კონცეპტუალიზაციას, რაც გულისხმობს მიწისქვეშა მასობრივი მანქანური ტიპის კომუნიკაციის (mMTC) სენსორების მიერ გაგზავნილი სიგნალების მიღებას კარიბჭეებით, რომლებიც ოპერირებენ LEO თანამგზავრებზე. თავდაპირველად, ჩვენ განვიხილავთ ორ ალტერნატიულ არქიტექტურას ასეთი ქსელების გასააქტიურებლად და გამოვყოფთ მათ მახასიათებლებსა და შეზღუდვებს. შემდეგ, ჩვენ ვიყენებთ კომპიუტერულ სიმულაციებს სოფლის „ჭკვიანი" მეურნეობის აპლიკაციის სცენარის მოდელირებისათვის დაბალი სიმძლავრის ფართო არელის ქსელურ (LoRaWAN) ტექნოლოგიაზე დაფუძნებული U-DtS mMTC-ის მიზანშეწონილობისა და მახასიათებლების შესასწავლად. კვლევა ფოკუსირებულია სხვადასხვა პარამეტრის ზემოქმედებაზე, რომელთა შორისაა კვანძების მიწაში ჩამარხვის სიღრმე, ნიადაგის მახასიათებლები და კომუნიკაციის პარამეტრები. შედეგები აჩვენებს, რომ ჩვეულებრივ LoRa მოდულაციას დიდი პრობლემები ექმნება მიწისქვეშა გავრცელების დანაკარგებისა და პაკეტების შეჯახების მაღალი სიხშირის გამო. თუმცა, LoRa, რომელიც დაფუძნებულია მოქმედების დიდი რადიუსისთვის სპექტრის განვრცობის ტექნოლოგიაზე გადამტან სიხშირეებზე გადახტომებით (LR-FHSS), პერსპექტიულია U-DtS ქსელებისთვის და მან შეიძლება უზრუნველყოს რამდენიმე ათეული სანტიმეტრის სიღრმეზე მდებარე მიწისქვეშა კვანძების დაკავშირება. დაბოლოს, ჩვენ განვსაზღვრავთ პოტენციურ გამოწვევებსა და მიმართულებებს მომავალი U-DtS კვლევისთვის.

კაპიტალური დახარჯები და შენობებს შიგნით არსებული საკომუნიკაციო გამოწვევები არის ორი მთავარი დაბრკოლება თანაბარი წვდომის პოზიციონირების სერვისებისთვის მთელ მსოფლიოში. გლობალური სანავიგაციო თანამგზავრული სისტემები (GNSS) კარგად არ ფუნქციონირებს შენობებში და შენობებს გარეთა ზოგიერთ რთულ გარემოში, როგორიცაა ხშირი ტყეები ან მცენარეული საფარით მდიდარი მთიანი რელიეფები, მაგალითად, სიგნალების მრავალგზიანი გავრცელების და სიგნალისა და ხმაურის დაბალი თანაფარდობის გამო. დღესდღეობით ტერესტრიალური გადაწყვეტილებები შეიძლება გამოყენებულ იქნეს GNSS-ის დასამატებლად, მაგრამ ისინი, როგორც წესი, ძვირი ჯდება მაღალი დაფარვის პირობებში და არ გვთავაზობენ თანასწორ წვდომას, მაგალითად დაბალშემოსავლიან ქვეყანებში, ან სახმელეთო ინფრასტრუქტურისთვის რთულად მისადგომ ადგილებში, როგორიცაა ღრმა ჯუნგლები, ქვიშიანი უდაბნო ტერიტორიები და ღრმა ხეობები/კანიონები. რამდენადაც LEO თანამგზავრული მეგათანავარსკვლავედები მნიშვნელოვნად უფრო ახლოს არიან დედამიწასთან, ვიდრე GNSS თანამგზავრები, LEO-ზე დაფუძნებულმა გადაწყვეტილებებმა შეიძლება შეავსოს GNSS. ჩვენი ვარაუდით, მომავალი უსადენო მიმღებები მხარს დაუჭერენ ტერესტრიალური და თანამგზავრული ინფრასტრუქტურის ინტეგრაციას და, ამრიგად, LEO-ზე დაფუძნებული პოზიციონირების ამოცანები ძირითადად შეიძლება განხორციელდეს როგორც პროგრამული დანამატები არსებულ და მომავალ მიმღებებზე. მიუხედავად ამისა, დედამიწასთან უფრო მეტად სიახლოვე ავტომატურად არ ნიშნავს უფრო ძლიერ მიღებულ სიგნალებს ან პოზიციონირების სიზუსტეს,

განსაკუთრებით მაშინ, როდესაც ახალი LEO თანამგზავრების სიგნალების გადამტანი სიხშირეები უფრო მაღალია, ვიდრე GNSS–ისთვის. **მეშვიდე თავში** წარმოდგენილია LEO თანამგზავრებზე დაფუძნებული პოზიციონირება მომავალი თანასწორი წვდომის ლოკალიზაციისთვის და ამ საკითხის ტექნიკურ–ეკონომიკური შესწავლა LEO თანამგზავრული მეგათანავარსკვლავედების არსებული უპირატესობებისა და გამოწვევების განხილვით, რომელთა უსადენო სიგნალები შეიძლება გამოყენებულ იქნეს როგორც ოპორტუნისტული (შესაძლებლობების) სიგნალები. ჩვენ ვაჩვენებთ, რომ არსებობს მომავალი LEO მეგათანავარსკვლავედების გამოუყენებელი პოტენციალი თანასწორი წვდომის ლოკალიზაციისთვის, თუმცა რამდენიმე გამოწვევა ჯერ კიდევ დასაძლევია.

თანამგზავრული საკომუნიკაციო სისტემების შემდეგი თაობა მიზნად ისახავს ტერაბიტი წამში გამტარუნარიანობის მიღწევას. შეზღუდული სპექტრის გამო, ტრადიციული რადიოსიხშირული (RF) საკომუნიკაციო ლინკები ვერ უზრუნ–ველყოფენ ასეთ მაღალ გამტარუნარიანობას. თავისუფალი სივრცის ოპტიკური (FSO) გადაცემა არის შესაძლო ალტერნატივა, რომელმაც ცოტა ხნის წინ მიიპყრო დიდი ყურადღება თანამგზავრულ საკომუნიკაციო საზოგადოებაში. თუმცა, FSO კომუნიკაციები დაუცველია ატმოსფერული ტურბულენტობისა და მილევის მიმართ ამინდის სხვადასხვა პირობების გამო, როგორიცაა ნისლი, თოვლი და ღრუბლები. უფრო მეტიც, მიმღებსა და გადამცემს შორის შეუსაბამობით გამოწვეული შეცდომები და სხივის მოხეტიალე ბუნება გავლენას ახდენს FSO კომუნიკაციების საიმედოობაზე. ასეთი ეფექტების წარმატებით აღმოსაფხვრელად, **მერვე თავში** ჩვენ ვთავაზობთ კოსმოსურ–საჰაერო–სახმელეთო (SAG)FSO ქსელს მაღალ სიმაღლეზე სტრატეგიულად განლაგებული პლატფორმით, რომელიც მოქმედებს როგორც სარელეო სადგური. ჩვენ ვაჩვენებთ, რომ ასეთ დიზაინს შეუძლია არსებითად შეამციროს ატმოსფერული ტურბულენტობის ეფექტი, განსაკუთრებით მაშინ, როდესაც თანამგზავრის ზენიტის კუთხე შედარებით მაღალია. შემდეგ ჩვენ წარმოვადგენთ ახალ SAG თანამგზავრულ საკომუნიკაციო ქსელს, რომელიც აერთიანებს შემოთავაზებულ SAG–FSO გადაცემას და ჩვეულებრივ ჰიბრიდულ ერთნახტომიან FSO/RF გადაცემას სისტემის მთლიანი საიმედოობისა და მუშაობის მახასიათებლების კიდევ უფრო გასაუმჯობესებლად. რიცხვითი შედეგები ნათლად აჩვენებს შემოთავაზებული, უაღრესად ინოვაციური SAG–FSO ქსელის არქიტექტურის პოტენციალს.

6G კომუნიკაციებისთვის, მოსალოდნელია, რომ ინტეგრირებული თანამგზავრულ–სახმელეთო ქსელი უზრუნ–ველყოფს მრავალფეროვან სერვისებს გლობალური დაფარვით. ასეთი ინტეგრირებული ქსელის წარმატებული დანერგვის პირველი ნაბიჯი არის თანამგზავრული ქსელის შექმნა, რომელსაც შეუძლია შეუფერხებლად იმუშაოს თავის ტერესტრიალურ პარტნიორთან. თუმცა, რამდენადაც თანამგზავრები დედამიწის გარშემო ბრუნავენ ძალიან მაღალი სიჩქარით და ისინი დაკავშირებულია ძალიან გრძელი უსადენო ლინკებით, თითქმის შეუძლებელია ტერესტრიალური სქემების გამოყენება ცვლილების გარეშე. ქსელის ფენებად დაყოფა არის მრავალი უნიკალური ლოგიკური და ვირტუალიზებული ქსელის შექმნის მეთოდი საერთო მრავალ დომენურ ინფრასტრუქტურაზე. ქსელის თითოეული ფენა არის იზოლირებული გამჭოლი (ბოლოების დამაკავშირებელი) ქსელი, რომელიც მორგებულია კონკრეტული აპლიკაციის მიერ მოთხოვნილი სხვადასხვა მოთხოვნის შესასრულებლად. **მეცხრე თავში**, ქსელის ვირტუალიზაცია ქსელის ფენებად დაყოფით, რომელიც აქამდე აქტიურად იყო გამოკვლეული ტერესტრიალურ ქსელებში, გაანალიზებულია თანამგზავრული სისტემებისთვის. თანამგზავრული ქსელის ფენების დაგეგმვის (SNSP) მეთოდები შემოთავაზებულია ვირტუალური ქსელისთვის (VN), ამ ქსელის რესურსების დარეზერვირებისთვის მომსახურების საჭირო დროის განმავლობაში. პროცესი მოდელირებულია VN მოთხოვნებით (VNR), რადგან მიზანია VNR–ების ეფექტიანად ჩაშენება და VN–ის შენარჩუნება მისი მომსახურების საჭირო დროის დასრულებამდე. წარმოდგენილია SNSP–ის კანდიდატი მეთოდები თანამგზავრული მეგათანავარსკვლავედის ქსელებში, რომლებიც შემდეგ ფასდება სხვადასხვა მეტრიკით შესაბამისი მეთოდის მოსაძებნად. ასევე იდენტიფიცირებულია SNSP–ის ძირითადი პარამეტრები და სისტემური ბარიერი, რომელსაც ვუწოდებთ სისტემის „ვიწრო ადგილს“. დაბოლოს, კომპიუტერული სიმულაციის შედეგების საფუძველზე განიხილება სისტემის ფუნქციონირება, SNSP–სთან დაკავ–შირებული კომპრომისები და ღია საკითხები.

დამატებით აღვნიშნავთ, რომ წიგნის ბოლოს წარმოდგენილია გამოყენებული ინგლისურენოვანი აბრევიატუ–რებისა და აკრონიმების მნიშვნელობები და მათი შესატყვისი ქართული თარგმანები.

ვფიქრობთ, რომ მასალა სასარგებლო იქნება და დახმარებას გაუწევს საინფორმაციო ტექნოლოგიებისა და კომუნიკაციების დარგში მომუშავე სპეციალისტებსა და აკადემიურ პერსონალს, ბაკალავრიატის მაღალი კურსის სტუდენტებს, მაგისტრანტებსა და დოქტორანტებს.

თავი 1 მომდევნო თაობის მეგათანამგზავრული ქსელები თანასწორი წვდომისთვის: შესაძლებლობები, გამოწვევები და ეფექტიანობა

1.1. შესავალი

მოდერნიზაციის თანამედროვე მიდგომა ეფუძნება გაციფრულებას, გამოთვლებსა და ინტერნეტით საყოველადგილო წვდომას. მათი ელემენტების ზემოქმედება გავლენას ახდენს ჩვენს ცხოვრებაზე, სოციალურ ურთიერთქმედებებზე, თანამედროვე ეკონომიკაზე, ჯანდაცვისა და განათლების სისტემებზე. დაწყებული, როგორც ინფორმაციის გაზიარების წინდახედული მიდგომა, ინტერნეტთან წვდომა ახლა აუცილებლობაა ადამიანის ძირითადი საჭიროებების დასაკმაყოფილებლად. თუმცა, ინტერნეტის ხელმისაწვდომობამ, საიმედოობამ და დაფარვამ ვერ მიაღწია ჭეშმარიტად გლობალურ მასშტაბებს. „ციფრული განხეთქილება“ არის ტერმინი, რომელიც აღნიშნავს უფსკრულს განვითარებულ რეგიონებს, რომლებსაც აქვთ წვდომა თანამედროვე საინფორმაციო და საკომუნიკაციო ტექნოლოგიებზე (ICT) და იმ რეგიონებს შორის, რომლებსაც საერთოდ არ აქვთ ან აქვთ შეზღუდული წვდომა. ციფრული განხეთქილება არის სამოქალაქო უფლებების საკითხი, რომელიც უფრო მძიმედ აისახება არაპრივილეგირებულ და დაუცველ თემებზე. აქედან გამომდინარე, აუცილებელია ეფექტიანი სტრატეგიებისა და გადაწყვეტილებების შემუშავება, რომლებიც აღმოფხვრის არსებულ ციფრულ განხეთქილებას და, შესაბამისად, უზრუნველყოფს სამართლიან და ჭეშმარიტად გლობალურ დაფარვას.

ამჟამინდელი ქსელის ინფრასტრუქტურა, სადენიანი იქნება ეს თუ უსადენო, დომინირებს ტერესტრიალური (მიწისპირა) საკომუნიკაციო სერვისებით, რომელთა განლაგება ძირითადად განპირობებულია მოკლევადიანი მოგებით, რაც ამძაფრებს წვდომის უთანასწორობის პრობლემას შორ მანძილებზე არსებულ ტერიტორიებთან არასაკმარისი კავშირის გამო, რომლებსაც არ გააჩნიათ საკმარისი ბიზნესმოტივები. არატერესტრიალური ქსელები (NTN) ახლახან გამოჩნდა, როგორც პერსპექტიული გადაწყვეტა ტერესტრიალური ქსელების კავშირის გასაძლიერებლად გაფართოებული დაფარვის უზრუნველყოფის გზით. NTN-ების ერთ-ერთი მთავარი კომპონენტია თანამგზავრული ქსელები, მათ შორის ბოლო პერიოდში ფართოდ გამოყენებული დედამიწის დაბალი ორბიტის (LEO) თანამგზავრული მეგათანავარსკვლავედები. მოსალოდნელია, რომ შემდეგი თაობის თანამგზავრული საკომუნიკაციო სერვისები უზრუნველყოფენ უწყვეტ კავშირს სოფლად და შორეულ რეგიონებში ინტეგრირებული კავშირით, თუნდაც მკვრივ ურბანულ გარემოში.

LEO თანამგზავრული თანავარსკვლავედების გამოყენება გლობალური კომუნიკაციებისთვის ნიშნავს პარადიგმის შეცვლას ჩვეულებრივი ტერესტრიალურის დაფარვის სრული დამოკიდებულებიდან. არსებობს ტენდენცია ჰიბრიდული სისტემის შექმნისა, რომელიც აერთიანებს შემდეგი თაობის ტერესტრიალურ ქსელებს და არატერესტრიალური ქსელების სერვისებს უწყვეტ კონტინუუმში. ამ ახალ შესაძლებლობებს თან ახლავს ახალი საინჟინრო გადაწყვეტები და მრავალი ტექნიკური გამოწვევა, რომელიც დაკავშირებულია ქსელის წვდომის სტანდარტიზაციასთან, თანამგზავრებს შორის კომუნიკაციებთან, ჰენდოვერთან, ტერესტრიალურ ინტეგრაციასთან, თანაარხის ინტერფერენციებთან და ბევრ სხვა ფაქტორთან, რომლებიც ერთობლივად გავლენას ახდენენ ქსელის მუშაობაზე.

თანამგზავრული ქსელის მუშაობა ჩვეულებრივ ფასდება სპეციალიზებული პროგრამული პლატფორმებით, რომლებიც იყენებენ მორგებულ კომპიუტერულ სიმულაციებს. მიუხედავად იმისა, რომ სიმულატორები უზრუნველყოფენ საკმაოდ საიმედო შედეგებს ისეთი დელიკატური დეტალების აღრიცხვით, როგორიცაა ანტენის გაძლიერების კოეფიციენტები, დედამიწის რელიეფი და ზუსტი თანამგზავრული ორბიტები, ისინი ვერ ქმნიან გამოსადეგ ანალიზურ მოდელებს. ასეთ მოდელებს გადამწყვეტი მნიშვნელობა აქვს ქსელის მუშაობაზე სხვადასხვა პარამეტრების გავლენის დასაფიქსირებლად, რაც ოპტიმიზაციის სწრაფ მიღწევას უზრუნველყოფს.

უფრო მეტიც, სიმულაციების სირთულე კიდევ უფრო პრობლემატურია მეგათანავარსკვლავედებისთვის, რომლებიც შედგება დიდი რაოდენობით ურთიერთდაკავშირებული თანამგზავრებისგან, რაც ზრდის სისტემის ოპტიმიზაციის სირთულეს. აქედან გამომდინარე, საჭიროა ანალიზური მოდელები, რომლებიც უზრუნველყოფენ კომპრომისს რეალურ განლაგებასა და დახვეწილ სიმულაციურ პლატფორმებს შორის, რომლებიც ჩვეულებრივ არ არის დამუშავებადი. სტოქასტური გეომეტრიის (SG) ინსტრუმენტებზე დაფუძნებული ანალიზური მოდელირება ფართოდ გამოიყენება ტერესტრიალური ქსელებისთვის მათი მუშაობის აღსაბეჭდად და, როგორც ბოლოდროინდელმა კვლევებმა აჩვენა, რომ ასეთი მიდგომა სიცოცხლისუნარიანია თანამგზავრული მეგა–თანავარსკვლავედებისთვის.

ამ თავში განხილული ოთხი ძირითადი შედეგი შეიძლება ჩამოყალიბდეს შემდეგნაირად:

1. ასახულია LEO თანამგზავრული მეგათანავარსკვლავედების უპირატესობები და წარმოდგენილია ინფორ–მაცია მათ მიერ გამოყენებული სხვადასხვა შესაძლებლობების შესახებ;

2. ხაზგასმულია ის გამოწვევები, რომლებიც გამომდინარეობს მათი განლაგებიდან;

3. მოცემულია სხვადასხვა ქსელური არქიტექტურის მახასიათებლების ანალიზის თანამედროვე მეთოდების დეტალური აღწერა;

4. განხილულია ახლად შექმნილი სიმულაციური მიდგომები, რომლებიც შესაფერისია თანამგზავრების მეგათანავარსკვლავედების კვლევისა და განვითარებისთვის.

ეს თავი ასევე გვიჩვენებს ანალიზური მოდელების გამოყენების უპირატესობებს რთულ მეგათანამგზავრულ ქსელებში სწრაფი აღქმის უზრუნველსაყოფად. ნახ. 1.1–ზე წარმოდგენილია LEO მეგათანავარსკვლავედების ძირითადი მახასიათებლები.

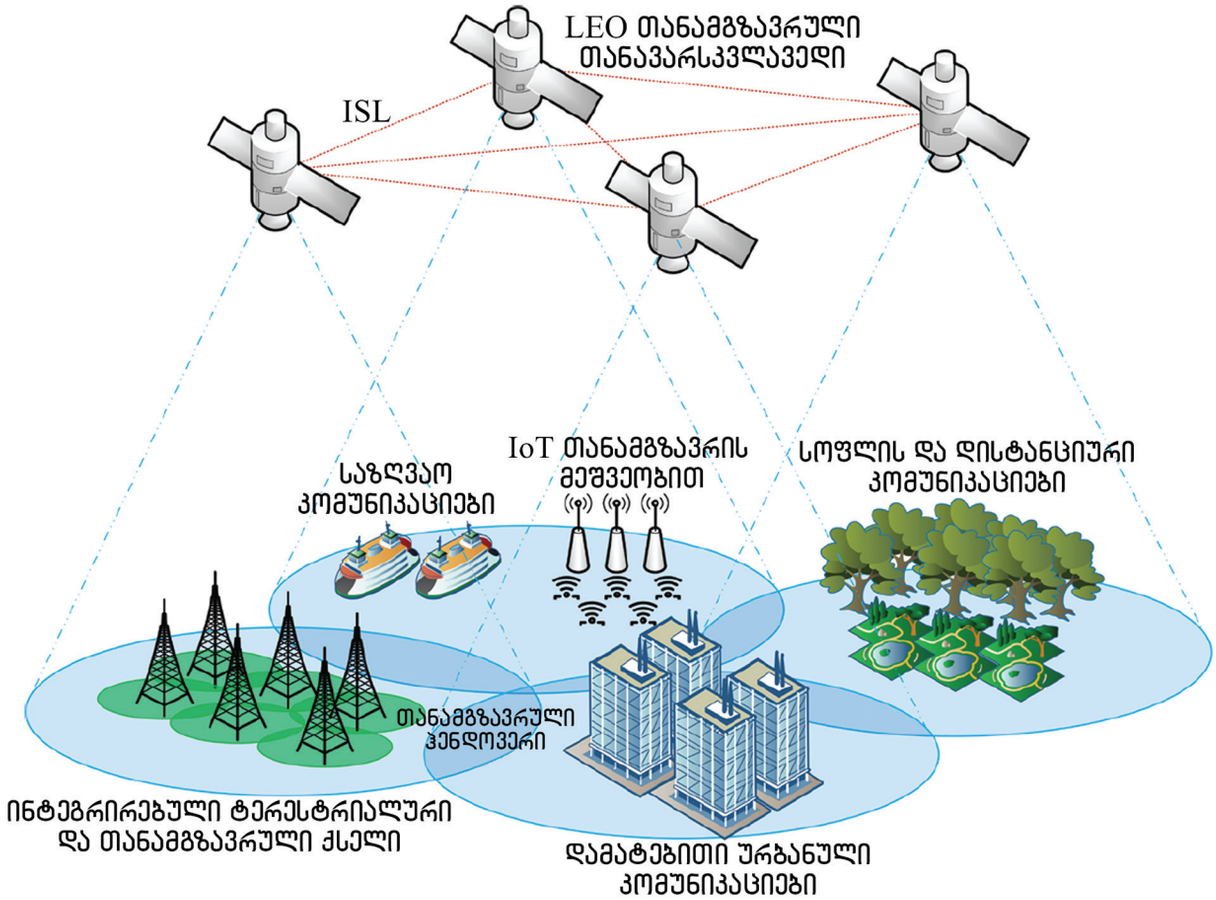
1.2. მეგათანავარსკვლავედების შესაძლებლობები

სამართლიანი და გლობალური დაფარვა:

მეხუთე თაობისა (5G) და მისი შემდგომი პერიოდის კომუნიკაციების განვითარებასთან დაკავშირებული გამოყენების შემთხვევების მხარდასაჭერად საჭიროა საყოველადგილო დაკავშირება და მონაცემთა გადაცემის მაღალი სიჩქარე. თუმცა, ტერესტრიალური სერვისები სულაც ვერ უზრუნველყოფს მომხმარებლის თანმიმდევრულ და სამართლიან სამომხმარებლო გამოცდილებას შორეულ რეგიონებში კავშირის განხორ–ციელებასთან დაკავშირებული სირთულეების გამო. თანამგზავრები ჩნდება, როგორც დამატებითი საშუალება, რათა უზრუნველყოს ფართოზოლოვანი კომუნიკაციები ურბანული ტერიტორიების მიღმა. საკმარისად დიდი (ფართო) სხივის გამოყენებით, LEO თანამგზავრს შეუძლია უზრუნველყოს დედამიწის ზედაპირის 3 და 12 პროცენტის ეკვივალენტური დაფარვა, ზღვის დონიდან შესაბამისად, 400 და 2 000 კმ სიმაღლეებზე განთავსების შემთხვევაში. აქედან გამომდინარე, სოფლისა და შორეული (დისტანციური) ტერიტორიები შეიძლება ეფექტიანად დაიფაროს ციფრული განხეთქილების შესამცირებლად. თანამგზავრული დაფარვა ასევე შესაფერისია საზღვაო კომუნიკაციებისთვის და მაღალსიჩქარიანი მოძრავი პლატფორმებისთვის. ერთ–ერთი მაგალითია მაღალსიჩქარიანი საიმედო უსადენო კავშირის უზრუნველყოფა თვითმფრინავებთან ან მაღალსიჩქარიან მატარებლებთან თანამგზავრული საკომუნიკაციო ლინკების საშუალებით, რომელსაც შეუძლია სალონში ინტერნეტსერვისების მიწოდება. გარდა ამისა, საზღვაო კავშირი აუმჯობესებს უსაფრთხოებას და გემების მოძრაობის ეფექტიანობას.

IoT თანამგზავრის მეშვეობით:

საგნების ინტერნეტმა (IoT) მნიშვნელოვანი იმპულსი მოიპოვა ბოლო ათწლეულის განმავლობაში. იგი ემსახურება ბევრ აპლიკაციას, რომელებიც ეყრდნობა მასობრივ უსადენო სენსორულ ქსელებს, რომელთა გამოყენების სფეროა ჭკვიანი ქალაქები, ტრანსპორტი, დისტანციურად მართული სოფლის მეურნეობა და საზღვაო მონიტორინგი. კონკრეტულად, დაბალი სიმძლავრის ფართო არეალის ქსელები დიდწილად წარმატებით აკავშირებენ IoT–ს დიდ ტერიტორიებზე ტერესტრიალური ქსელების მეშვეობით და ისინი შესაფერისია ბატარეით მომუშავე მოწყობილობებისთვის. თუმცა, მრავალი სხვა გამოყენების შემთხვევა მოითხოვს დაკავშირებას სოფლად და შორეულ რეგიონებში, რისი მიღწევაც რთულია ჩვეულებრივი ტერესტრიალური



ნახ. 1.1. LEO თანამგზავრული თანავარსკვლავედის ქსელის მიმოხილვა, რომელიც აჩვენებს მის დაფარვას და პერსპექტიულ შესაძლებლობებს

ლინკების გამოყენებით. ახლახან შემოთავაზებული იქნა თანამგზავრული თანავარსკვლავედები IoT ქსელების მხარდასაჭერად, თუმცა, აქ ბევრი გამოწვევა ჩნდება:

- პოპულარული IoT პროტოკოლები ძირითადად ეყრდნობა შემთხვევითი წვდომის ტექნიკას, რის შედეგადაც უფრო მაღალი დონის თანაარხის ინტერფერენცია წარმოიქმნება მოწყობილობების დიდი რაოდენობის გამო, რომლებიც კონკურენციას უწევენ სიხშირული სპექტრის წვდომას აპლინკზე (რაც იწვევს პრობლემებს თანამგზავრის დიდი დაფარვის ზონის გამო);
- IoT მოწყობილობები, როგორც წესი, შეზღუდულია ენერგომოხმარებით, რაც ართულებს აპლინკის ენერგიის ბიუჯეტის დიზაინს, თუნდაც დაბალი ორბიტის თანამგზავრებისთვის.

შედეგად, IoT-ისთვის მიძღვნილ პროტოკოლებს თანამგზავრზე სჭირდებათ თავსებადი მექანიზმების დანერგვა, რათა შეამცირონ თანაარხის ინტერფერენცია მინიმალური ენერგეტიკული ბიუჯეტებით.

შემცირებული შეყოვნება:

თანამგზავრების საშუალებით გლობალური დაფარვა შეიძლება განხორციელდეს დედამიწის გეოსტაციონარული ორბიტის (GEO), დედამიწის საშუალო ორბიტის (MEO) და LEO თანამგზავრების გამოყენებით. მიუხედავად იმისა, რომ GEO თანამგზავრი ფარავს ზედაპირის გაცილებით დიდ რეგიონს, ტიპური გადაცემის ორმხრივი დრო (RTT) 250–350 მწმ-ზე მეტია, რაც მათ არაპრაქტიკულს ხდის შეყოვნებისგან თავისუფალი აპლიკაციებისთვის. ანალოგიურად, მიუხედავად იმისა, რომ MEO თანამგზავრების განთავსების სიმაღლე ოდნავ დაბალია, მათი RTT მაინც შედარებით დიდია. GEO-სა და MEO-ზე დაფუძნებულ თანამგზავრულ ქსელებთან შედარებით, LEO თანავარსკვლავედებს უჭირავთ გაცილებით დაბალი სიმაღლე ზღვის დონიდან (ჩვეულებრივ 400–2000 კმ). ეს შედარებითი სიახლოვე მნიშვნელოვნად აძლიერებს ლინკის ბიუჯეტს (45–60 დბ გაუმჯობესება

GEO-სა და LEO-ს შორის) და ამცირებს კომუნიკაციის შეყოვნებას (მაგალითად, 30 მწმ RTT-ზე ნაკლები). თუმცა, ეს სიახლოვე ასევე იწვევს თანამგზავრის დაფარვის არეალის შემცირებას; შესაბამისად, აღნიშნულის კომპენსირება აუცილებელია თანავარსკვლავედში მეტი თანამგზავრის განთავსებით. დაბალი სიმაღლე ასევე იწვევს თანამგზავრის გაშვების ხარჯების შემცირებას, განსაკუთრებით მცირე და საშუალო ზომის გამშვები მოწყობილობების გაჩენით. ამიტომ, LEO მეგათანამგზავრულმა ქსელებმა ბოლო დროს მიიპყრო ინტენსიური ინტერესი. ასეთი ქსელები, ამჟამად განლაგებულია მაგალითად, OneWeb-ისა და Starlink-ის მიერ.

მრავალმომხმარებლიანი MIMO:

ნაჩვენებია, რომ მრავალშესასვლელიან და მრავალგამოსასვლელიან (MIMO) უსადენო სისტემებს შეუძლიათ მნიშვნელოვნად გაზარდონ სპექტრული ეფექტიანობა სივრცითი მულტიპლექსირებისგან მიღებული მოგების გამოყენებით. სივრცითი მულტიპლექსირებით მაღალი მოგების მისაღწევად, საჭიროა ანტენებს შორის დაბალი სივრცითი კორელაცია, რაც ჩვეულებრივ მიიღწევა, როდესაც ანტენები ერთმანეთისაგან საკმარისად არიან დაშორებული. მრავალმომხმარებლიანი MIMO-სთვის შეიძლება განიხილებოდეს სხვადასხვა კონფიგურაცია თანამგზავრზე საანტენო მესრის ფორმირებისთვის:

- ერთი თანამგზავრი, რომელიც იყენებს თანამგზავრს მრავალი ანტენით;
- თანამდებარე თანამგზავრები, რომლებიც იყენებენ რამდენიმე თანამგზავრს (თითოეული აღჭურვილია ერთი ანტენით) იმავე ორბიტულ სიბრტყეში;
- მრავალი თანამგზავრი, რომლებიც იყენებენ შემთხვევას, სადაც თითოეული თანამგზავრი აღჭურვილია ერთი ანტენით სხვადასხვა ორბიტულ სიბრტყეში.

როდესაც მრავალი თანამგზავრი ქმნის საანტენო მესერს, სინქრონიზაცია თანამგზავრთაშორის ლინკების საშუალებით ხდება კრიტიკული, ვინაიდან ანტენები (ან თანამგზავრები) სივრცულად არიან განაწილებული. მეორე მხრივ, შესაძლო ანტენების რაოდენობა შეზღუდულია, როდესაც ერთი თანამგზავრი გამოიყენება მრავალმომხმარებლიან MIMO სქემაში. არხის მდგომარეობის შესახებ ინფორმაციის (CSI) მიღება მიიღწევა მონაცემების წინ წინასწარ განსაზღვრული ორთოგონალური სიგნალების განთავსებით. თუმცა, ეს რთული ამოცანაა, ტერესტრიალური მობილური არხების სწრაფად ცვალებადი ბუნების გამო.

ადრეული LEO თანამგზავრების მიმოხილვა:

Iridium: ის ექსპლუატაციაში შევიდა Motorola-ს მიერ 1998 წელს, როგორც ერთ-ერთი ყველაზე ადრეული LEO თანავარსკვლავედი, რომელმაც გამოიყენა Walker-ის თანავარსკვლავედის ნიმუში. თერთმეტი თანა-მგზავრები თანაბრად არის განაწილებული ექვს ორბიტულ სიბრტყეზე 780 კმ სიმაღლეზე ზღვის დონიდან და შეუძლიათ იმუშაონ სხვადასხვა რეჟიმში, როგორებიცაა მრავალჯერადი წვდომა დროითი დაყოფით (TDMA) და მრავალჯერადი წვდომა სიხშირული დაყოფით (FDMA).

Globalstar: Iridium-ისგან განსხვავებით, Globalstar-მა გამოიყენა Walker Delta ნიმუში, რომელიც ასევე ცნობილია როგორც Rosette, მიაღწია დაფარვის საუკეთესო მრავალფეროვნებას საშუალო განედებზე, მაგრამ ვერ დაფარა პოლუსები. ის კომერციულად ხელმისაწვდომი გახდა 1998 წლის ბოლოს. ორმოცდარვა LEO თანამგზავრი განთავსებულია 1414 კმ სიმაღლეზე, რომელიც იყენებს მრავალჯერად წვდომას კოდური დაყოფით (CDMA) და გამოიყენება თანამგზავრულ ტელეფონიაში და მონაცემთა გადაცემის ვიწროზოლოვანი სერვისებისთვის.

Teledesic: მან ასევე დაიწყო მუშაობა 1998 წელს და თავდაპირველად სცადა აეშენებინა უდიდესი თანავარსკვლავედი 840 თანამგზავრით 700 კმ სიმაღლეზე, რომელიც მხარს დაუჭერდა კოსმოსურ ფართო-ზოლოვან ინტერნეტს. რამდენიმე რეორგანიზაციისა და შერწყმის შემდეგ, Teledesic-მა თანდათან შეამცირა თავისი თანამგზავრების რაოდენობა 288-მდე.

LEO-ს უახლესი განვითარების მაგალითები:

OneWeb: ეს არის გლობალური საკომუნიკაციო ქსელი, რომლის ფორმირება ამჟამად მიმდინარეობს LEO თანამგზავრების თანავარსკვლავედის განლაგების პროცესში. 650 თანამგზავრის თავდაპირველი განლაგება უზრუნველყოფს დაკავშირებას ფიქსირებულ, საზღვაო და საავიაციო მომხმარებელთა ტერმინალებთან, მთავრობებისთვის, თემებისთვის და ბიზნესისთვის, რომლებიც ბოჭკოვან-ოპტიკური ქსელებისთვის მიუწ-ვდომელია. თავად თანამგზავრების გარდა, სისტემა მოიცავს ურთიერთდაკავშირებულ მიწისპირა სადგურების,

მოსახლეობის ყოფნის წერტილებისა და ოპერაციული ცენტრების გლობალურ ტერესტრიალურ ქსელს. ეს უზრუნველყოფს ხელმისაწვდომ, მაღალი გამტარუნარიანობისა და დაბალი შეყოვნების საკომუნიკაციო სერვისებს, რომლებიც საშუალებას მისცემს მომავლის IoT სისტემებს და 5G-ის შემდგომი პერიოდის მობილურ სისტემებს იფუნქციონირონ ყველასთვის და ყველგან. მოსალოდნელია, რომ მიღწეული იქნება 400 მბიტი/წმ-მდე დაუნლინკის და 30 მბიტი/წმ-მდე აპლინკის სიჩქარე მომხმარებლის სპეციალური ტერმინალების მეშვეობით.

SpaceX: SpaceX-ის Starlink არის კიდევ ერთი გლობალური საკომუნიკაციო ქსელი, რომელიც უზრუნველ-ყოფს ინტერნეტსერვისებს დედამიწის ზედაპირის დიდ ნაწილზე. Starlink აპირებს გაუშვას დაახლოებით 42 000 LEO თანამგზავრი, რომლებიც ქმნიან ყველაზე დიდ თანავარსკვლავედს, ორბიტის რამდენიმე სხვადასხვა სიმაღლეზე. მოწყობის საწყის ეტაპზე განლაგდება დაახლოებით 12 000 თანამგზავრი ორბიტული სიმაღლის 2 ჯგუფით (335.9–345.6 კმ 7518 თანამგზავრისთვის და 540–570 კმ 4 408 თანამგზავრისთვის), ხოლო დასკვნით ეტაპზე განლაგდება კიდევ 30 000 თანამგზავრი. როგორც განვითარებადი სისტემა, ეს არის პირველი თანავარსკვლავედი, რომელმაც მიმართა V (40–75 გჰც) და E (60–90 გჰც) სიხშირული დიაპაზონების გამოყენებას, რათა მხარი დაუჭიროს მოწინავე სერვისებს ფართოზოლოვანი ინტერნეტით გლობალურად, კომერციული, საცხოვრებელი და სამთავრობო სცენარების ჩათვლით. დაყოფილია ხუთ განსხვავებულ გარსად, კომბინირებული თანამგზავრთაშორისი ლინკებით (ISL), რომლებიც თანამგზავრებს ერთმანეთთან კომუნიკაციის საშუალებას აძლევს.

Amazon: Amazon-მა გამოაცხადა თავისი თანავარსკვლავედის, სახელად Kuiper-ის გაშვება კოსმოსში 2 024 წლის პირველ ნახევარში რათა, დედამიწას (გარდა მისი ორი პოლუსისა) ინტერნეტსერვისი გაუწიოს. მოსალოდნელია, რომ ეს თანაგზავრული თანავარსკვლავედი 630 კმ სიმაღლეზე სულ 3 236 თანამგზავრს დაიტევს.

1.3. მეგათანავარსკვლავედებთან დაკავშირებული გამოწვევები

რადიოარხები LEO ორბიტებისთვის:

LEO თანამგზავრული ლინკები უზრუნველყოფს ლინკების ენერგიის უფრო გაუმჯობესებულ ბიუჯეტს, ვიდრე თანამგზავრები, რომლებიც მდებარეობს მაღალ სიმაღლეზე, რაც მათ უფრო მიმზიდველს ხდის NTN-ის მომდევნო თაობაში. თუმცა, თანამგზავრულ რადიოარხში, ჩნდება დედამიწის მოძრაობასთან დაკავშირებული რამდენიმე პრობლემა. ჩვეულებრივი გეოსტაციონარული ლინკებისგან განსხვავებით, LEO თანამგზავრებს აქვთ უფრო მცირე ორბიტული პერიოდები. მაგალითად, LEO თანამგზავრს, რომელიც მდებარეობს 400 კმ სიმაღლეზე, დაახლოებით 1.5 საათი სჭირდება დედამიწის გარშემო თავისი ორბიტული სვლის დასრულებისათვის, ხოლო 2 000 კმ-ზე მდებარე თანამგზავრებს ამისთვის სჭირდება 2.1 საათამდე. ეს ნიშნავს, რომ თანამგზავრი მხოლოდ 6.25-დან 12.5 წუთამდე რჩება ხმელეთზე მყოფი მომხმარებლის ხედვის ველში.

ვინაიდან LEO თანამგზავრები საოცრად მაღალი სიჩქარით მოძრაობენ ხედვის ველის ფანჯარაში, ადგილი აქვს ხმელეთზე მომხმარებლის სიმაღლის კუთხის დიდ ცვალებადობას (სიმაღლის კუთხე არის კუთხე, რომელიც იქმნება ჰორიზონტალურ ხაზსა და მხედველობის ხაზს შორის). ეს სიმძლავრის ლინკის ბიუჯეტში დიდ რყევებს იწვევს. თავისუფალი სივრცეში გზის დაკარგვა, რომელიც დამოკიდებულია თანამგზავრსა და სახმელეთო მომხმარებელს შორის მანძილზე, მერყეობს მისი მინიმალური მნიშვნელობიდან, როდესაც თანამგზავრი მდებარეობს მომხმარებლის ზენიტში, ლოკალურ ჰორიზონტზე არსებულ მაქსიმალურ მნიშვნელობამდე (აღნიშნული ასტრონომიული განმარტებები დეტალურად იქნება განხილული მეორე თავში). უფრო მეტიც, LEO ლინკებისთვის პირდაპირი ხედვის ხაზით (LoS) კომუნიკაციის მიღწევის ალბათობა დიდად არის დამო-კიდებული სიმაღლის კუთხეზე. გადაადგილებითი სიჩქარის (რომლითაც მოძრაობენ LEO თანამგზავრები) კიდევ ერთი შედეგი არის დოპლერის წანაცვლების ეფექტით გამოწვეული, მაღალი სიხშირული წანაცვლება, რომელიც წარმოიშობა მიწისპირა ტერმინალის გადაადგილების სიჩქარისგან დამოუკიდებლად. გარდა ამისა, ამჟამად მიმდინარეობს სიხშირული სპექტრის უფრო მაღალი უბნების შესწავლა, როგორიცაა Q (33–50 გჰც) და V (40–75 გჰც) სიხშირული დიაპაზონები და მათ ზემოთ არსებული ზოლი, მათი პოტენციური გამოყენებისთვის LEO მეგათანავარსკვლავედებში. ეს ზოლები გვთავაზობენ უზარმაზარ სპექტრულ ვაკანსიას

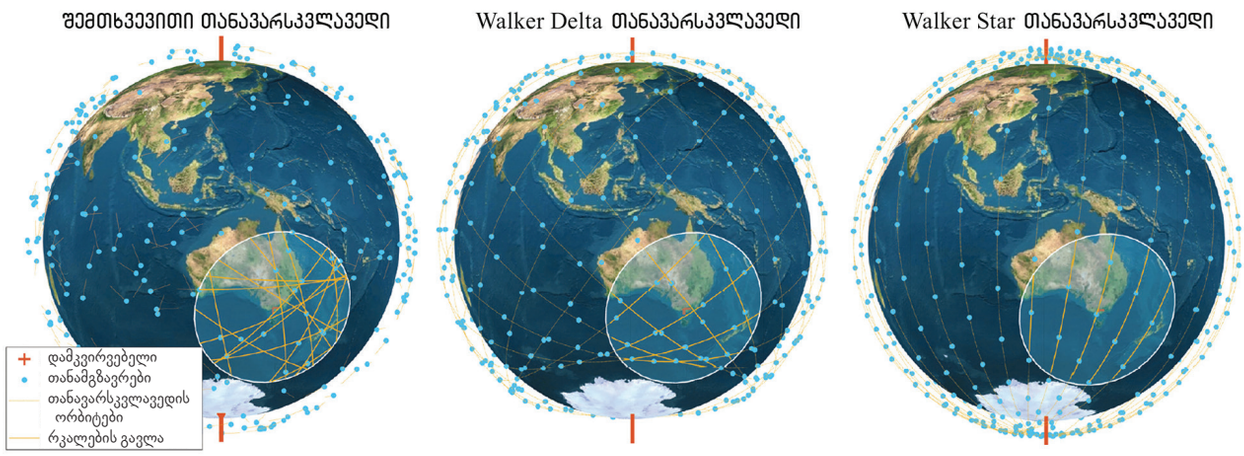
გაზრდილი არახელსაყრელი პირობების ხარჯზე, რომელთა შორისაა გაზრდილი ატმოსფერული შთანთქმა და მგრძნობიარობა უკიდურესი რყევების გამო. აღსანიშნავია, რომ არხის რობასტული პროგნოზირება იძლევა ადაპტირების შესაძლებლობას თანამგზავრულ სისტემებში, როდესაც საქმე ეხება რადიოარხში დიდ ცვალებადობას.

თანაარხის ინტერფერენცია:

რადიოსიხშირული სპექტრი არის შეზღუდული რესურსი, რომელსაც ინაწილებს უამრავი უსადენო გადამცემი. უსადენო ტექნოლოგიების მზარდი რაოდენობის გამო, რომლებიც მუდმივად კონკურენციაში არიან შეზღუდული სპექტრის გამო, სპექტრული რესურსების ხელახალი გამოყენება სასიცოცხლო მნიშვნელობის გახდა, რათა მივაღწიოთ უფრო მაღალ სპექტრულ ეფექტიანობას მრავალჯერადი წვდომის ტექნოლოგიების გამოყენებით. ამიტომ, როდესაც დიდი რაოდენობით გადაცემები ცდილობენ ერთობლივ წვდომას სიხშირულ ზოლებზე, წარმოიქმნება თანაარხის ინტერფერენციის უფრო მაღალი დონე. ამრიგად, შემდეგი თაობის თანამგზავრული წვდომის სისტემებმა უნდა გამოიყენონ ინტელექტუალურად განაწილებული მრავალჯერადი წვდომის მექანიზმები და შესაბამისი დაგეგმარება, რათა უზრუნველყონ გადაცემების თანაარსებობა. უფრო მეტიც, თანაარხის ინტერფერენცია, რომელიც გამოწვეულია უფრო მაღალ სიმაღლეზე განთავსებული თანამგზავრებით, როგორიცაა GEO, უნდა აღმოიფხვრას. კონკრეტულად, LEO თანავარსკვლავედები განიცდიან უფრო მაღალ თანაარხის ინტერფერენციას GEO ლინკებთან შედარებით, როგორც დაუნლინკში, ასევე აპლინკში.

დაუნლინკისთვის, LEO თანავარსკვლავედში განლაგებული თანამგზავრების დიდი რაოდენობა (თითო თანავარსკვლავედზე 1000 თანამგზავრზე მეტი) ძირითადად იყენებს ერთსა და იმავე სპექტრულ ზოლს. მაშასადამე, მიწისზედა მომხმარებლის ლოკალურ გუმბათში (თანავარსკვლავედის სფეროს ნაწილი), რომლის ფარგლებშიც თანამგზავრებს შეუძლიათ მიწისზედა მომხმარებელთან დაკავშირება, როგორც ნაჩვენებია ნახ. 1.2-ზე, მათ პოტენციურად შეიძლება ხელი შეუშალონ ერთმანეთს. თანაარხის ინტერფერენცია (მოცემულ თანავარსკვლავედში) შეიძლება მნიშვნელოვნად შემცირდეს სხივის გონივრულად ფორმირების, ფრაქციული სიხშირის ხელახალი გამოყენებისა და თანამგზავრთაშორისი ინტერფერენციის აღმოფხვრის პროტოკოლების გამოყენებით. თუმცა, სპექტრის გადანაწილება სხვადასხვა თანავარსკვლავედებს შორის ან თანამგზავრულ და ტერესტრიალურ სერვისებს შორის გაცილებით რთული პრობლემაა კოორდინაციის თანდაყოლილი ნაკლებობის გამო. ამიტომ, ქსელის წვდომის ტექნოლოგიების პარამეტრების დასარეგულირებლად საჭიროა სიხშირული სპექტრის ფრთხილად და გონივრულად მართვა.

ანალოგიურად, აპლინკისთვის მიწისზედა მომხმარებელთა დიდი რაოდენობის მიერ წარმოქმნილმა ინტერ-ფერენციამ შეიძლება გამოიწვიოს მახასიათებლების მნიშვნელოვანი დეგრადაცია, თუ სპექტრული ზოლები გაზიარებულია ტერესტრიალურ სერვისებთან. ეს პრობლემა გამწვავებულია LEO თანამგზავრებისკენ გზაში დანაკარგების შემცირების გამო. უფრო მეტიც, თანამგზავრების დიდი დაფარვის კვალით (მის ტერესტრიალურ



ნახ. 1.2. მყისიერი დროითი სურათი, რომელიც აჩვენებს თანამგზავრების გეომეტრიულ განაწილებას შემთხვევითი, Walker Delta და Walker Star თანავარსკვლავედებისთვის

ანალოგთან შედარებით), აპლინკისთვის საჭიროა უფრო დიდი საკოორდინაციო რეგიონი. დაუნლინკში გამოყენებული მეთოდების მსგავსად, შეიძლება გამოყენებულ იქნეს ინტერფერენციის აღმოფხვრის რამდენიმე სქემა. დამატებით ბარიერს წარმოადგენს თანამგზავრული სერვისების გლობალური ბუნება, რაც მოითხოვს მრავალი სტანდარტისა და სხვადასხვა მარეგულირებელი ორგანოების ჰარმონიზაციას მთელ მსოფლიოში. გარდა ამისა, მექანიზმები, რომლებსაც შეუძლიათ გააუმჯობესონ აპლინკი, როგორიცაა სიმძლავრის მართვა, უკიდურესად რთულია, განსხვავებით ტერესტრიალური და გეოსინქრონული კომუნიკაციებისგან, LEO თანამგზავრებში არხის სწრაფად ცვალებადობის გამო.

ინტეგრაცია ტერესტრიალურ ქსელებთან:

5G კომუნიკაციების შემდგომი პერიოდისთვის, ინტეგრირებული ტერესტრიალური და თანამგზავრული ქსელები (ITSN) მოსალოდნელია, ერთობლივად მოიცავდეს ორივე ტიპს, მათი უპირატესობების გაერთიანების მიზნით. ასეთ ჰიბრიდულ სქემაში, ტერესტრიალური ქსელების მონაცემთა გადაცემის მაღალი სიჩქარე და თანამგზავრების დიდი დაფარვის კვალი გაერთიანებულია უწყვეტი კონტინუუმის შესაქმნელად. თანამგზავრული საკომუნიკაციო პროტოკოლები, როგორც ფიზიკური, ასევე წვდომის ფენების ჩათვლით, რომლებიც ამჟამად გამოიყენება განლაგებულ ქსელებში, ძირითადად კერძო საკუთრებაშია. მესამე თაობის პარტნიორობის პროექტი (3GPP) აქტიურად სწავლობს NTN-ების ინტეგრაციას მომავალ 5G-ის შემდგომ გამოშვებებში, ფიზიკური ფენისა და ქსელების სხვადასხვა არქიტექტურის ჩათვლით. აქ ჩნდება შემდეგი ძირითადი გამოწვევები:

- ჯვარედინი კოორდინაცია თანამგზავრულ და ტერესტრიალურ რადიორესურსებს შორის;
- პლატფორმებს შორის ჰენდოვერის ორგანიზება;
- მახასიათებლების მოდელირება, ვალიდაცია და ოპტიმიზაცია.

ქსელში წვდომის სტანდარტიზაცია:

ისტორიულად, არსებობს თანამგზავრული სერვისებისთვის ქსელში წვდომის სტანდარტიზაციის შეზღუდული მაგალითები, სადაც GEO თანამგზავრი, ჩვეულებრივ, მოქმედებს როგორც „მოხრილი მილების“ არქიტექტურა, გამოყოფილი მოდემებით, რომლებიც დაწყვილებულია მომხმარებლის ტერმინალებსა და კარიბჭეებს (gateways) შორის. მიუხედავად იმისა, რომ კომპონენტები ურთიერთშემცვლელი ან ზოგადია (მაგალითად, პარაბოლური ანტენები), მოდემის ვენდორებს (მომწოდებლებს) შორის თავსებადობა ტიპური არ არის. სტანდარტიზაციის მცდელობის მაგალითია მობილური თანამგზავრული სერვისები GEO მობილური რადიო-ინტერფეისებისთვის 1 და 2, ტერესტრიალური მობილური ტელეფონის სტანდარტების არსებითად ხელახალი გამოყენების მიზნით. მიუხედავად იმისა, რომ ორივე სტანდარტიზებულია ევროპის სატელეკომუნიკაციო სტანდარტების ინსტიტუტის (ETSI) მიერ, მათ არა აქვთ მრავალი სისტემის მხარდაჭერა, რათა უზრუნველყოფილ იქნეს მასშტაბებთან დაკავშირებული ეკონომია. მას შემდეგ რაც ამ სტანდარტების შემუშავება შეფერხდა, თანამგზავრული სერვისების სტანდარტიზაცია ხელახლა დაიწყო და ამჟამად მიმდინარეობს 3GPP-ის მიერ. აღსანიშნავია, რომ LEO მეგათანავარსკვლავედებისთვის ქსელში წვდომის სტანდარტიზაციას აქვს დამატებითი გამოწვევები GEO-სთან შედარებით:

- ორბიტული პარამეტრები მოიცავს ზღვის დონიდან სიმაღლეს, დახრილობას და ორბიტული თვითმფრინავებისა და თანამგზავრების რაოდენობას;
- ფიზიკური ტექნიკური შეზღუდვები მოიცავს თანამგზავრის ზომას, წონას და სიმძლავრეს;
- არსებობს სხვადასხვა ბიზნესმოთხოვნები სხვადასხვა ოპერატორებისთვის;
- მარეგულირებელი შეზღუდვები მოიცავს სიხშირულ დიაპაზონს და ბაზარზე წვდომას.

რამდენიმე მიმართულებით ეს განსხვავებები გავლენას ახდენს ტექნოლოგიურ არჩევანზე და, შედეგად, ქსელში წვდომის სტანდარტიზაციის შესაძლებლობაზე. მაგალითად, GEO თანამგზავრებისგან განსხვავებით, LEO თანავარსკვლავედებს შეუძლიათ მოქმედება სხვადასხვა სიმაღლეზე, ორბიტულ სიბრტყეზე და დახრილობაზე, რაც თავის მხრივ წარმოქმნის მნიშვნელოვან განსხვავებებს სისტემებს შორის შეყოვნებისა და გზაში დანაკარგების თვალსაზრისით. ერთი სისტემის არქიტექტურისთვის სტანდარტის ოპტიმიზაციამ შეიძლება შეაფერხოს სხვათა მუშაობა ან გააუარესოს სხვათა მუშაობის მახასიათებლები. ზოგიერთი ოპერატორის ბიზნესმოთხოვნები შეიძლება მორგებული იყოს კომერციულ და სამთავრობო სერვისებზე, რომლებიც მოითხოვენ მომსახურების კონტროლირებად ხარისხს, ზოგი კი შეიძლება მორგებული იყოს სამომხმარებლო

მომსახურებას მაქსიმალური ეფექტიანობით. სისტემური არქიტექტურები ამჟამად გარკვეულწილად ცვალებადია და მუდმივი გადასინჯვის ქვეშაა. მაგალითად, SpaceX-ის Starlink სისტემის პარამეტრები რამდენჯერმე შეიცვალა მის განხორციელებამდე და მისი განხორციელების დროს და აშშ-ის კომუნიკაციების ფედერალური კომისიის (FCC) უახლესი წარდგინებით ვარაუდობენ ორ განსხვავებულ სამომავლო არქიტექტურას გამშვები მანქანების პოტენციურ ხელმისაწვდომობაზე დაყრდნობით. სისტემის ადრეული განლაგების კონკურენტული ბუნება და სისტემის არქიტექტურის მუდმივი განახლება მნიშვნელოვანი შემაფერხებელი ბარიერია თანამგზავრულ ქსელში წვდომის სტანდარტიზაციისთვის.

თანამგზავრთაშორისი კავშირი:

ISL-ები სასურველია თანამგზავრული ქსელების განსახორციელებლად, განსაკუთრებით LEO თანავარსკვლავედებში თანამგზავრების დიდი რაოდენობით. ISL-ები უზრუნველყოფს მონაცემთა გადაცემას, ურთიერთკავშირს და ინფორმაციის სარელეო გადაცემას თანამგზავრებს შორის. ISL-ების გარეშე, მეგა-თანამგზავრული ქსელები საჭიროებენ კარიბჭეების დიდ რაოდენობას რეალურ დროში გლობალური დაფარვის უზრუნველსაყოფად. უფრო მეტიც, ISL-ები ძალიან სასურველია შორ მანძილზე დაბალი შეყოვნების კომუნიკაციებისთვის, სადაც LEO თანამგზავრული ქსელის ISL-ებთან გამოყენებამ შეიძლება შეამციროს შეყოვნება ბოჭკოვან-ოპტიკურ სისტემებზე დაფუძნებულ ტერესტრიალურ ქსელებთან შედარებით. აქედან გამომდინარე, ISL-ებს შეუძლიათ უზრუნველყონ შეყოვნებისადმი მგრძნობიარე სერვისები, როგორიცაა ფინანსური აპლიკაციები (მაგალითად, დაბალი შეყოვნების კავშირები ფინანსურ ცენტრებს შორის). უფრო მეტიც, ბორტზე დამუშავების და თანამგზავრების ინტელექტის გაზრდის ტენდენციები ასევე მოითხოვს ISL-ებისგან ქსელის ავტომატური მართვის განხორციელებას. როგორც რადიოსიხშირე, ასევე ოპტიკური ზოლები შეიძლება შესწავლილი იყოს ISL-ებისთვის. რადიოსიხშირეებზე დაფუძნებულ გადაწყვეტილებებთან შედარებით, მიუხედავად იმისა, რომ ISL-ებისთვის ოპტიკური სპექტრის გამოყენება მოითხოვს სხივის მიმართულების ზუსტ განსაზღვრას, ამ უკანასკნელს აქვს ძირითადი უპირატესობები უფრო მაღალი გამტარუნარიანობის, ენერგიის დაბალი მოხმარებისა და დაბალი ინტერფერენციების გამო. ამიტომ, ოპტიკური ISL-ების გამოყენებამ შეიძლება უზრუნველყოს მონაცემთა გადაცემის უფრო მაღალი სიჩქარე და გაუმჯობესებული სიგნალისა და ხმაურის თანაფარდობა (SNR). მიუხედავად იმისა, რომ ISL-ები ფართოდ იქნა შესწავლილი და განვითარებული, არსებობს მთელი რიგი კრიტიკული საკითხები, რომელთა მოგვარებაც საჭიროა. ერთ-ერთი მთავარი გამოწვევაა ჰენდოვერი სხვადასხვა თანამგზავრებს შორის, განსაკუთრებით მაშინ, როდესაც თანამგზავრების დიდი რაოდენობაა სხვადასხვა ორბიტულ სიმაღლეზე. ეს პრობლემა კიდევ უფრო უარესდება ოპტიკური ISL-ების შემთხვევაში, სხივის სივიწროვის გამო, რომელიც მოითხოვს სხივის ზუსტ პოვნას, მისთვის თვალყურის დევნებას და დამიზნებას, ასევე ხშირ ჰენდოვერს. გარდა ამისა, LEO-ზე დაფუძნებული თანამგზავრული ქსელების დინამიური ბუნება ასევე იწვევს ქსელის ტოპოლოგიის ცვლილებებს და, შესაბამისად, სიგნალის ოვერჰედის (ზედნადები ხარჯების) ზრდას.

ჰენდოვერი:

LEO თანამგზავრები ორბიტაზე მოძრაობენ ძალიან მაღალი სიჩქარით, რითაც მხოლოდ რამდენიმე წუთის განმავლობაში რჩებიან მომხმარებლის ანტენის დიაპაზონში. ეს არის ძალიან მოკლე პერიოდი და მის ფარგლებში, ქსელმა უნდა შეასრულოს ჰენდოვერის რთული პროცედურა, რათა შენარჩუნდეს მომხმარებლის უწყვეტი სესია. ჰენდოვერის პროცედურები საკმაოდ კარგადაა შემუშავებული ტერესტრიალურ ქსელებში და 5G-ის საგზაო რუკა მუდმივად ვითარდება უფრო საიმედო ჰენდოვერებისკენ, დაბალი შეყოვნებით. ასეთ ქსელებში ჰენდოვერის პროცედურა ჩვეულებრივ იწყებს მოქმედებას მომხმარებლის მობილურობის გამო. ამის საპირისპიროდ, თანამგზავრების ჰენდოვერი ხორციელდება თანამგზავრების სწრაფი ფარდობითი მოძრაობის გამო, ქსელის მუდმივად ცვალებად ტოპოლოგიასთან ერთად. ხშირ ჰენდოვერებთან არის დაკავშირებული რამდენიმე გამოწვევა, მათ შორის

- გაზრდილი სიგნალური ოვერჰედი;
- ტრაფიკის უფრო ხშირი გადამისამართება (და შესაბამისად გაზრდილი შეყოვნება);
- მექანიკურად მართვადი ანტენების გაზრდილი ცვეთა.

გარდა ამისა, ძალიან მნიშვნელოვანია ჰენდოვერის რაოდენობრივი მახასიათებელი.

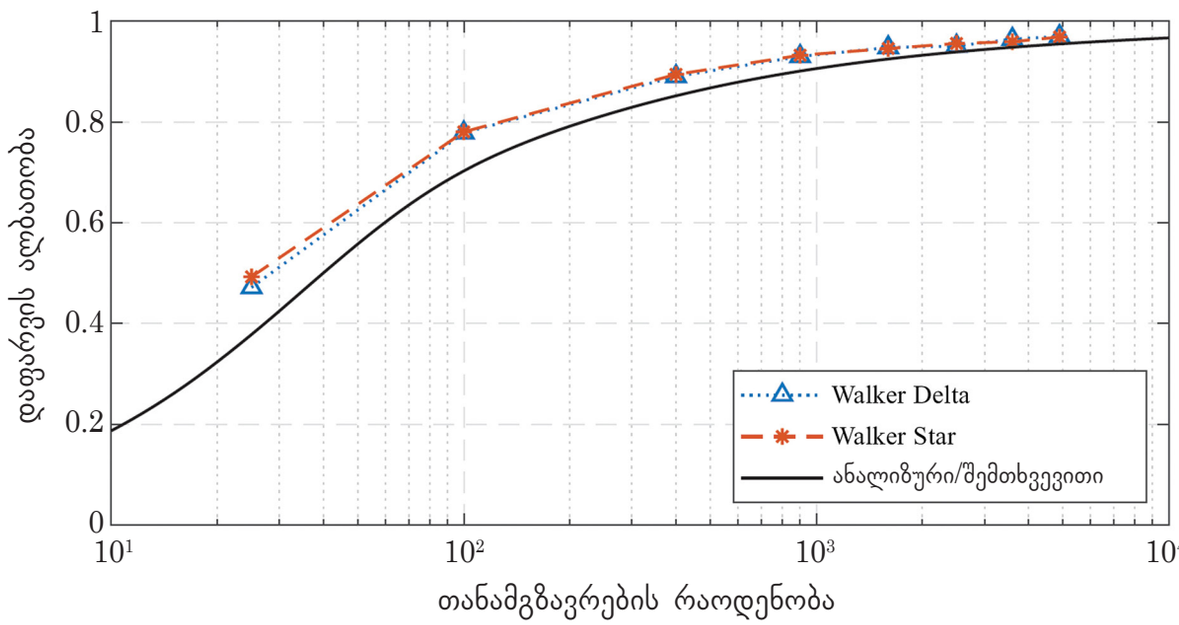
1.4. მეგათანავარსკვლავედების მახასიათებლები

თანავარსკვლავედების გეომეტრიული მოდელირება:

განვიხილოთ ორი პოპულარული თანავარსკვლავედის შაბლონი, რომელიც ამჟამად გამოიყენება ბოლო-დროინდელ განლაგებში. ეს შაბლონებია:

- Walker Delta, მიღებული Starlink-ის მიერ;
- Walker Star, მიღებული OneWeb-ის მიერ.

ასეთი უაღრესად რეგულარული შაბლონები არ ექვემდებარება ანალიზურ შესწავლას და შეიძლება დაეყრდნოს მხოლოდ ამომწურავ სიმულაციურ მიდგომებს, რომლებიც არ არის დამუშავებული. მეორე მხრივ, SG მიდგომები (დეტალურად იქნება განხილული მეორე თავში) ახლახან გავრცელდა LEO მეგათანავარსკვლავედების ქსელებზე. ტერესტრიალური ქსელებისგან განსხვავებით, LEO თანავარსკვლავედები უწყვეტ ორბიტულ მოძრაობაში არიან. ანალიზური შეფასებების მისაღწევად, შემოთავაზებულია შემთხვევითი თანავარსკვლავედის მოდელი, რაც შესაძლებლობას იძლევა გამოყენებულ იქნეს პუასონის წერტილოვანი პროცესის (PPP) თანდაყოლილი მახასიათებლები. სამი განსხვავებული თანავარსკვლავედის ვიზუალური შედარება ნაჩვენებია ნახ. 1.2-ზე. შემთხვევითი მოდელის თანამგზავრები მიჰყვებიან შემთხვევით წრიულ ორბიტებს ერთნაირად, შემთხვევითი საწყისი წერტილით. ეს საწყისი წერტილები შემთხვევითია და თანაბრად ნაწილდება სფერულ ზედაპირზე ბინომიალური წერტილოვანი პროცესის (BPP) მიხედვით. თუმცა, ადგილობრივი დამკვირვებლის თვალსაზრისით, თანამგზავრული წერტილების განაწილება ადგილობრივი თანამგზავრის გუმბათში შეიძლება მიახლოებული იყოს PPP-სთან, რადგან ის თანავარსკვლავედის სფეროს გაცილებით მცირე ქვეჯგუფია. ამრიგად, PPP მოდელი საშუალებას იძლევა დამუშავდეს კონტაქტის კუთხის სტატისტიკური თვისებები, რაც აიოლებს ინტერფერენციისა და დაფარვის ანალიზს. მართლაც, ეს შემთხვევითი მოდელი არ იმეორებს კარგად შემუშავებულ პრაქტიკულად მკვრივ თანავარსკვლავედებს; თუმცა, დადასტურებულია, რომ შემთხვევით თანავარსკვლავედებს შეუძლიათ უზრუნველყონ ზუსტი აღქმა და მიახლოებები პრაქტიკული განლაგების შესახებ, ან შეუძლიათ სწრაფად აითვისონ მახასიათებლების ქცევის საზღვრები. ნახ. 1.3 გვიჩვენებს აპლინკის დაფარვის ალბათობის ტენდენციას და ქვედა საზღვარს, რომელიც მიღებულია ანალიზური მოდელირების საშუალებით პრაქტიკაში გამოყენებულ თანავარსკვლავედებთან შედარებით. გამოყენებული ანალიზური



ნახ. 1.3. აპლინკში დაფარვის ალბათობების შედარება ანალიზურ მოდელებსა და პრაქტიკაში არსებულ ქსელებს შორის. ანალიზური მოდელი Walker Star და Walker Delta თანავარსკვლავედებისთვის წარმოგვიდგენს ქვედა საზღვარს

მოდელირება და პარამეტრები რეპროდუცირებულია პრაქტიკული თანავარსკვლავედებისთვის ჩატარებულ კომპიუტერულ სიმულაციებთან შედარების მიზნით.

თანამგზავრული ქსელის მახასიათებლები:

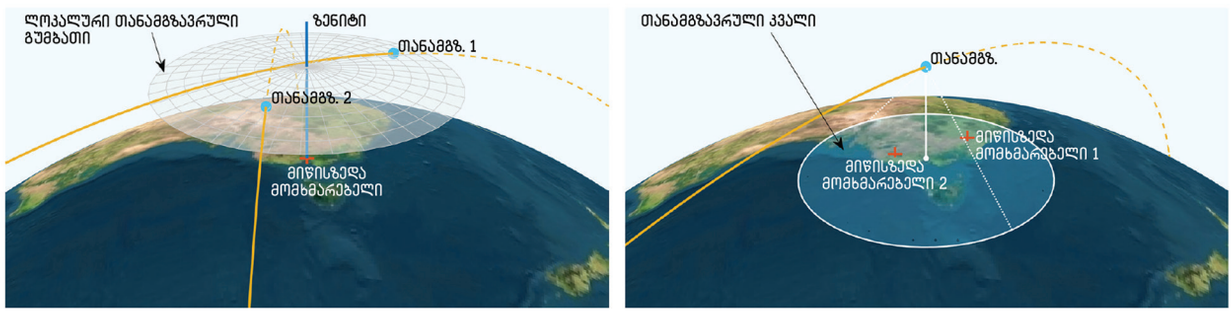
ქსელის ანალიზური მახასიათებელი ჩვეულებრივ ფასდება რადიოპაკეტის წარმატებით მიღების საშუალო ალბათობით. თანამგზავრულ საკომუნიკაციო ლინკში წარმატება დამოკიდებულია რადიოარხის მდგომარეობაზე და გამოყენებულ გარემოსთან წვდომის მართვაზე (MAC). გარდა ამისა, ქსელის მუშაობის ანალიზი განსხვავებულია დაუნლინკის და აპლინკის საკომუნიკაციო სისტემებისთვის. ნახ. 1.4 ასახავს განსხვავებას მომხმარებელზე ორიენტირებულ და თანამგზავრზე ორიენტირებულ მოდელებს შორის, შესაბამისად, დაუნლინკისა და აპლინკის ანალიზისთვის.

<u>დაუნლინკი:</u> დაუნლინკში კარგი საკომუნიკაციო მახასიათებელი მიიღწევა მომხმარებელზე ორიენტირებული მოდელის გამოყენებით, სადაც ივარაუდება, რომ ტიპური მომხმარებლის მდებარეობა დედამიწის ზედაპირზე შემთხვევითი წესით არის განსაზღვრული. ნებისმიერ აქტიურ თანამგზავრს, რომელიც იმყოფება მომხმარებლის ლოკალურ თანამგზავრულ გუმბათში, შეუძლია უზრუნველყოს საკომუნიკაციო ლინკი შესაბამის მომხმარებელთან. ლოკალური თანამგზავრული გუმბათის ფართობი მონოტონურად იზრდება მაქსიმალური ზენიტის კუთხის შესაბამისად. შეთანხმება გულისხმობს უახლოესი თანამგზავრის, როგორც მომსახურე თანამგზავრის გამოყოფას. ამიტომ, გუმბათის შიგნით არსებული ყველა სხვა აქტიური თანამგზავრი ინტერფერენციის პოტენციურ წყაროდ ითვლება.

<u>აპლინკი:</u> მეორე მხრივ, აპლინკის მახასიათებელი შეფასებულია თანამგზავრზე ორიენტირებული მოდელის გამოყენებით, სადაც ტიპური სახმელეთო მომხმარებელის მდებარეობა შემთხვევითი წესით არის განსაზღვრული მისი კვალის შიგნით (ანუ მომსახურების ზონაში). ამრიგად, სახმელეთო მომხმარებლები, რომლებიც განლაგებულია იმავე კვალში, განიხილება ინტერფერენციის პოტენციურ წყაროებად. ინტერფერენციის დონე მნიშვნელოვნად იქნება დამოკიდებული მრავალჯერადი წვდომის სქემაზე და სახმელეთო მომხმარებლების სიმკვრივეზე. თუმცა, სახმელეთო მომხმარებელთა მოსალოდნელი დიდი რაოდენობის გამო, ანალიზური მიდგომები იყენებს ინტერფერენციების მყისიერი სიმძლავრის დაბალ ვარიაციებს და, შესაბამისად, ინტერფერენციები შეიძლება ადეკვატურად იყოს წარმოდგენილი მათი საშუალო მნიშვნელობით.

ჰიბრიდული ITSN მოდელები:

ინტეგრირებული ტერესტრიალური და თანამგზავრული ქსელები წარმოქმნიან უკიდურესად რთულ საპროექტო პრობლემებს; საბედნიეროდ, თანამედროვე სწრაფი ანალიზური მოდელირება ამარტივებს



მომხმარებელზე ორიენტირებული მოდელი **თანამგზავრზე ორიენტირებული მოდელი**

ნახ. 1.4. განსხვავება მომხმარებელსა და თანამგზავრზე ორიენტირებულ ანალიზს შორის, შესაბამისად, დაუნლინკისა და აპლინკისათვის. ინტერფერენცია წარმოიქმნება თანამგზავრების მიერ ლოკალური გუმბათის შიგნით, დაუნლინკის შემთხვევაში, ხოლო სახმელეთო მომხმარებლების მიერ შესაბამისი კვალის ფარგლებში, აპლინკის შემთხვევაში

სირთულეს და იძლევა წვდომას ქსელის მუშაობის სწრაფ აღქმაზე. ITSN–ების ანალიზური მოდელირება დიზაინერებს აძლევს საშუალებას უხეშად შეაფასონ საჭირო ქსელური ინფრასტრუქტურა, როგორც ტერესტრიალური, ისე თანამგზავრული კომპონენტების ზომების კუთხით. გარდა ამისა, SG–ის გამოყენებით თანამგზავრული თანავარსკვლავედის მახასიათებლების მოდელირების თანდაყოლილი უპირატესობა არის ტერესტრიალური ქსელის კარგად ჩამოყალიბებული მოდელების ხელმისაწვდომობა, რომლის მიხედვითაც ITSN მახასიათებლების თანმიმდევრულად მიღება შესაძლებელია ორი მოდელის კომბინაციით. შეიძლება განიხილებოდეს ორი ცნობილი ITSN კონფიგურაცია.

<u>სარელეო ITSN:</u> ეს იყენებს ტერესტრიალურ საბაზო სადგურებს, თანამგზავრებსა და სახმელეთო მომხმარებლებს შორის სარელეო გადაცემის მიზნით, რათა შეამციროს სიგნალის დეგრადაცია, რომელიც ხდება დაჩრდილვის გამო. BPP მოდელის კომბინაციით თანავარსკვლავედში თანამგზავრების წარმოსადგენად დამოუკიდებელ PPP–ისთან ტერესტრიალური საბაზო სადგურებისთვის, გაუმჯობესებული დაფარვა სოფლის რეგიონებში შეიძლება მიღებულ იქნეს ანალიზის საფუძველზე.

<u>ჰეტეროგენული ITSN:</u> ეს საშუალებას აძლევს თანამგზავრებს და ტერესტრიალურ საბაზო სადგურებს ერთობლივად ჰქონდეთ წვდომა ერთსა და იმავე სპექტრულ რესურსზე კოორდინირებული რადიოტექნოლოგიის საფუძველზე, იქნება ეს ცენტრალურად კოორდინირებული თუ განაწილებული. ვინაიდან სახმელეთო მომხმარებლებს შეიძლება მოემსახუროს ორივე ქსელი ერთდროულად, მახასიათებლები დამოკიდებულია ორივე არხზე. სისტემას, რომელიც განათავსებს ორ დამოუკიდებელ PPP–ის, როგორც თანამგზავრული თანავარსკვლავედისთვის, ასევე ტერესტრიალური საბაზო სადგურებისთვის, შეუძლია დააფიქსიროს თანავარსკვლავედის ზომისა და საბაზო სადგურების განთავსების სიმკვრივის გავლენა საკომუნიკაციო ლინკის მახასიათებელზე.

გავლის ხანგრძლივობა:

გავლის ხანგრძლივობა არის ინტერვალი, რომლის დროსაც თანამგზავრი ხელმისაწვდომია მოცემულ სახმელეთო მომხმარებელთან საიმედო კავშირის დასამყარებლად. თანამგზავრების გავლის პროგნოზირება და არაგეოსინქრონული ორბიტების თვალყურის დევნება მნიშვნელოვანი ფუნქციაა თითქმის ყველა თანამგზავრზე დაფუძნებული კომუნიკაციიის, ზონდირებისა და პოზიციონირების სისტემებისთვის. ამ სისტემებში პროგნოზირების ალგორითმები იძლევა ზუსტ შეფასებას იმ მომენტისა, როდესაც თანამგზავრი შედის დამკვირვებლის ხედვის ველში, კოორდინატების ვექტორის ჩათვლით გავლის ხანგრძლივობის მიხედვით. გამარტივებული ზოგადი პერტურბაციის (SGP) მოდელები ჩვეულებრივ გამოიყენება დედამიწის მახლობლად მყოფი თანამგზავრების თვალყურის დევნებისთვის, რომელიც ეფუძნება პარამეტრებს, რომლებიც აღწერს ორბიტას დროის მოცემულ მომენტში. ამრიგად, აშკარაა, რომ გამოთვლითი სიმძლავრის მატებასთან ერთად ძნელი არ არის გარკვეული თანამგზავრული თანავარსკვლავედის გავლის ხანგრძლივობის სტატისტიკური განაწილების მიღება. თუმცა, ასეთი გამოთვლები არ ექვემდებარება დამუშავებას და ევრისტიკულად ვერ ხერხდება მათი ინვერსია (ანუ, ისინი არ იძლევა ორბიტული პარამეტრების მიღების შესაძლებლობას გავლის ხანგრძლივობის სასურველ სტატისტიკაზე დაყრდნობით). თანავარსკვლავედის გავლის ხანგრძლივობის შეფასება საშუალებას იძლევა უკეთ გავაცნობიეროთ მრავალი პრაქტიკული ასპექტი; მათ შორის, მაგალითად,

- საჭირო სასიგნალო ოვერჰედი თანამგზავრებს შორის ჰენდოვერისთვის;
- მაქსიმალური უწყვეტი საკომუნიკაციო სესია, რომელიც შეიძლება დამყარდეს თანამგზავრსა და მომხმარებელს შორის;
- საჭირო გაღვიძების დრო ელექტროენერგიით შეზღუდული IoT მოწყობილობებში, ისეთი რომ, მათ ატვირთონ საჭირო სენსორული ინფორმაცია და აუცილებლობის შემთხვევაში მიიღონ დაუნლინკის ბრძანებები.

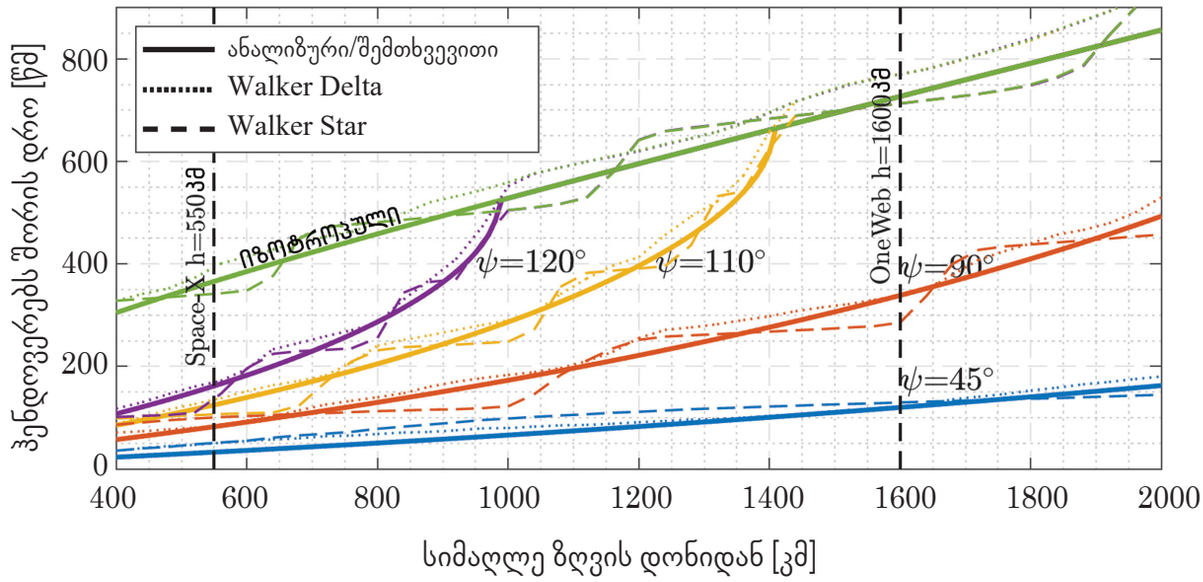
ლიტერატურაში წარმოდგენილია ანალიზური კვლევა, რომელიც გვთავაზობს მოსახერხებელ მიდგომას თანამგზავრის გავლის ხანგრძლივობის განაწილების გამოსათვლელად, მხოლოდ ზღვის დონიდან თანავარსკვლავედის სიმაღლეზე და ანტენის სხივის სიგანეზე დაყრდნობით. ნახ. 1.5 ასახავს გავლის ხანგრძლივობისთვის მჭიდრო შესატყვისობას, ანალიზური მოდელების გამოყენებას და პრაქტიკაში არსებული ქსელების ხანგრძლივი სიმულაციების შედეგად მიღებულ მახასიათებლებს შორის.

ოპტიმიზაცია:

SG-ზე დაფუძნებული ანალიზური მოდელირების გამოყენების უპირველესი სარგებელი არის მახასიათებლების სწრაფი ოპტიმიზაციის უნარი. ეს ოპტიმიზაცია შეიძლება მიღწეული იყოს ანალიზური (დიფერენცირების გამოყენებით) ან კარგად ჩამოყალიბებული რიცხვითი ალგორითმების მეშვეობით. მაგალითად, LEO მეგა-თანავარსკვლავედებისთვის ოპტიმიზაცია შეიძლება განხორციელდეს წარმატების ალბათობის მაქსიმიზაციის საფუძველზე ქსელის ძირითადი პარამეტრების დარეგულირებით. ბევრ მნიშვნელოვან პარამეტრს შორის, რომელიც გავლენას ახდენს მახასიათებლებზე, არის თანავარსკვლავედში თანამგზავრების რაოდენობა, მათი საშუალო სიმაღლე ზღვის დონიდან და ანტენის სხივის სიგანე, რომელსაც თანამგზავრი ან მიწისზედა მომხმარებლები იყენებენ ქსელში. უფრო მეტიც, ოპტიმიზაციის მიდგომები შეიძლება გაფართოვდეს ჰიბრიდულ ITSN-ზე ტერესტრიალური და თანამგზავრული ქსელის პარამეტრების ერთობლივად დასარეგულირებლად.

1.5. კომპიუტერულ სიმულაციაზე დაფუძნებული მიდგომები

ორბიტული პროპაგატორები (orbital propagators) შესაძლებელს ხდის თანამგზავრების პოზიციების პროგნოზირებას დროის გარკვეულ მომენტებში, დროის სხვა მომენტში ცნობილი პოზიციისა და სიჩქარის გათვალისწინებით. არსებობს ორბიტული პროპაგატორის მუშაობის მრავალი ალგორითმი სხვადასხვა დონის სიზუსტით და აპლიკაციებით; თუმცა, ჩვენ შეგვიძლია ზოგადად დავყოთ ორბიტული პროპაგატორები ანალიზურ და რიცხვით პროპაგატორებად. რიცხვითი პროპაგატორები იყენებენ ციფრულ ინტეგრაციას თანამგზავრის ორბიტის პროგნოზირებისთვის და მაღალი სიზუსტის შედეგის უზრუნველსაყოფად; აქედან გამომდინარე, ეს უფრო შესაფერისია თანამგზავრის მუშაობისა და კონტროლისთვის. მეორეს მხრივ, ანალიზური პრო-



ნახ. 1.5. ჰენდოვერის დროის შედარება ანალიზურ მოდელსა და პრაქტიკაში გამოყენებულ ორივე თანავარსკვლავედს (Walker Delta და Walker Star) შორის, სადაც ψ ანტენის სხივის სიგანეა

პაგატორები იყენებენ გამარტივებულ, ჩაკეტილი ფორმის, მიახლოებულ გადაწყვეტილებებს, რათა უზრუნ–ველყონ ორბიტის სწრაფი შეფასება დაბალი სიზუსტის ხარჯზე და, შესაბამისად, ეს უფრო შესაფერისია პარ–მეტრების სწრაფი ოპტიმიზაციისთვის და სხვადასხვა სცენარების განსახორციელებლად. თანამგზავრული მეგათანავარსკვლავედების მახასიათებლები შეიძლება ზუსტად იყოს გამოსახული სპეციალიზებული პროგრ–ამული პლატფორმების განლაგებით, რომლებიც გვთავაზობენ სპეციფიკურ სიმულაციებს. თუმცა, გამოყენებული დეტალიზაციის დონის გამო, სიმულაციური მიდგომები არ იძლევა სასურველ ახსნად შედეგებს და მოითხოვს ვრცელ და შრომატევად განმეორებით გამოთვლებს. ისინი საჭიროებენ დეტალებს, რომლებიც სხვაგვარად არ შეიძლება განზოგადდეს სხვა ქსელებზე, რაც სიმულატორებს სისტემისთვის სპეციფიკურს ხდის. აქედან გამომდინარე, გათვალისწინებულია, რომ ანალიზური მოდელები შეიძლება გამოყენებულ იქნეს დიზაინის ადრეულ ეტაპებზე, რათა დიზაინერებს მიაწოდონ ინფორმაცია ქსელის ძირითადი მახასიათებლების შესახებ (განლაგების სიმაღლე, თანავარსკვლავედში თანამგზავრების რაოდენობა, ორბიტული სიბრტყეები და ა. შ.). უფრო მოწინავე ეტაპებზე, განსაკუთრებით განლაგებისა და ექსპლუატაციის ეტაპებზე, ხანგრძლივი და მოწინავე კომპიუტერული სიმულაციები უზრუნველყოფენ უფრო ზუსტ შედეგებს კონკრეტული სცენარებისთვის.

1.6. პირველი თავის დასკვნა

გლობალურად მზარდი ციფრული განხეთქილების ფონზე, საჭიროა არსებული ქსელის ინფრასტრუქტურის შეცვლა, რაც საშუალებას მოგვცემს ხელახლა წარმოვადგინოთ ქსელის ძირითადი კომპონენტები, რომლებიც ქმნიან ჩვეულებრივ ქსელებს და ხელახლა შევაფასოთ ქსელების მუშაობის მეტრიკები. ამ თავში მოცემულია LEO თანამგზავრული მეგათანავარსკვლავედების მიმოხილვა, რომელთა გამოყენება შესაძლებელი იქნება შემდეგი თაობის უსადენო საკომუნიკაციო ქსელებში. იგი აღწერს გარკვეულ შესაძლებლობებს, რომლებიც აყალიბებენ LEO თანავარსკვლავედებს, როგორც პერსპექტიულ გადაწყვეტას გლობალური დაფარვის მისაღწევად. უფრო მეტიც, ხაზგასმულია ის გამოწვევები, რომლებიც წარმოიქმნება ქსელების ჰიბრიდიზაციის პროცესში და ტექნიკური ასპექტები, რომლებიც დაკავშირებულია მათ განლაგებასთან. გარდა ამისა, წარმოდგენილია LEO თანამგზავრული მეგათანავარსკვლავედების ყოვლისმომცველი ანალიზი, რომელიც ითვალისწინებს ანალიზურ და კომპიუტერულ სიმულაციაზე დაფუძნებულ მოდელირებას.

თავი 2 LEO თანამგზავრებზე დაფუძნებული ულტრა მკვრივი საკომუნიკაციო სისტემები: მოდელირების ახალი ტექნიკა

2.1. შესავალი

ბოლო რამდენიმე წლის განმავლობაში ჩვენ გავხდით დიდი ბუმის მოწმენი, დედამიწის დაბალი ორბიტის (LEO) თანამგზავრული ქსელების ინდუსტრიაში. ისეთი თანავარსკვლავედები, როგორებიცაა Starlink და OneWeb, გეგმავენ ორბიტაზე განათავსონ ან უკვე განათავსეს ათასობით თანამგზავრი. შედარებით დიდი გამტარუნარიანობით და დაბალი შეყოვნებით, LEO თანამგზავრები უზრუნველყოფენ ხელმისაწვდომ გადაწყვეტილებებს უწყვეტი ქსელით დაფარვის პროცესში, რაც უზრუნველყოფს თანასწორი წვდომის შესაძლებლობებს. თუმცა, საიმედო და მოსახერხებელი მათემატიკური საფუძველი ჯერ კიდევ შესამუშავებელია LEO თანამგზავრული საკომუნიკაციო სისტემების მახასიათებლების გასაანალიზებლად. კერძოდ, დედამიწიდან განსხვავებულ სიმაღლეზე განლაგებული თანამგზავრების მეგათანავარსკვლავედისთვის, სრულყოფილი ანალიზი საშუალებას მოგვცემს გავიგოთ თანამგზავრების საჭირო რაოდენობა და ზღვის დონიდან მათი სიმაღლეები სისტემის ეფექტიანი ფუნქციონირების მაქსიმალურად გაზრდის მიზნით. გარდა ამისა, შეიძლება დავადგინოთ ისიც, თუ რამდენი მიწისპირა სადგურია საჭირო LEO თანამგზავრული საკომუნიკაციო სისტემის შეუფერხებლად მუშაობისთვის.

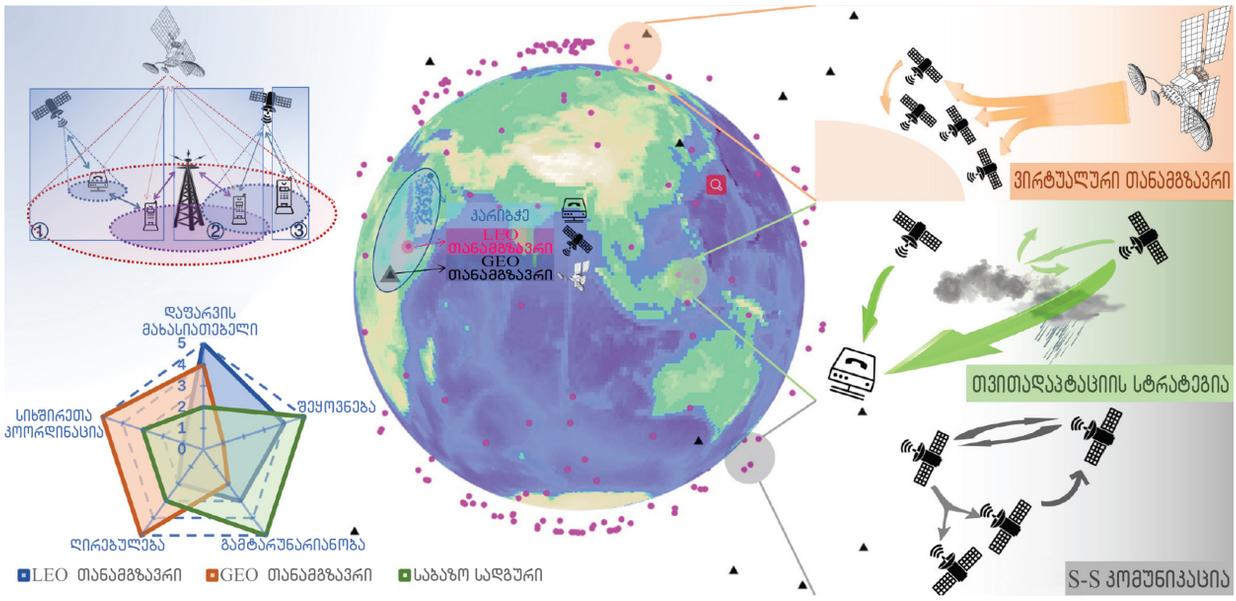
ზემოაღნიშნულიდან გამომდინარე, ამ თავის სტრუქტურა შემდეგნაირია: პირველ რიგში, უფრო დეტალურად აღვწერთ LEO თანამგზავრების უპირატესობებსა და ნაკლოვანებებს, შემდეგ განვსაზღვრავთ სტოქასტური გეომეტრიის (SG) გამოყენების მოტივაციას LEO თანამგზავრულ ქსელებში. SG-ზე დაყრდნობით, ეს თავი მიმოიხილავს ზოგიერთ ბოლოდროინდელ პუბლიკაციას და იძლევა თანამგზავრული მდებარეობების განაწილებისა და არხის მოდელების ტიპურ პარამეტრებს, ასევე ძირითადი ინდიკატორების არატექნიკურ აღწერას. გარდა ამისა, შემოთავაზებულია სიმულაციური კონფიგურაცია, რათა ხაზი გაესვას SG-ის გამოყენების პოტენციურ სარგებელს LEO თანამგზავრული საკომუნიკაციო სისტემების მოდელირებასა და ანალიზში სისტემური დონის სასარგებლო ინფორმაციით. დაბოლოს, ჩვენ ვიწინასწარმეტყველებთ სამომავლო სცენარებს თანამგზავრულ ქსელებში SG-ის გამოყენების შემთხვევებისთვის.

2.2. LEO თანამგზავრული სისტემის უპირატესობები და გამოწვევები

ამ პარაგრაფში გაანალიზებულია LEO თანამგზავრული სისტემის უპირატესობები და გამოწვევები GEO თანამგზავრულ სისტემასთან და ტერესტრიალურ სისტემასთან მისი შედარებით. ნახ. 2.1-ის ქვედა მარცხენა კუთხეში რადარული დიაგრამა ვიზუალურად აჩვენებს ხარისხობრივი შედარების წერტილებს.

LEO თანამგზავრულ სისტემას შეუძლია უზრუნველყოს მრავალი რეგიონის უწყვეტი დაფარვა მთელ მსოფლიოში, რომლებსაც აქვთ ნაწილობრივი კავშირი ან საერთოდ არა აქვთ კავშირი და ამ სისტემას შეუძლია უზრუნველყოს შეუდარებელი უპირატესობები წვდომის თანასწორობის კუთხით. მიუხედავად ერთი, ცალკე აღებული GEO თანამგზავრის უზარმაზარი დაფარვისა, ასეთ სისტემას აქვს „ბრმა არეალები“ პოლუსებზე. ტერესტრიალური სისტემების დაფარვა შეზღუდულია რელიეფით. შორეულ რაიონებში, რომლებსაც არ აქვთ ინფრასტრუქტურა, არსებული მიწისპირა ქსელები ვერ უზრუნველყოფენ სრულყოფილ დაფარვას, რადგან ბოჭკოვან-ოპტიკური სისტემის ხაზების მიყვანა ამ ადგილებამდე ან პრაქტიკულად ძნელად განსახორციელებელია, ან ძალიან ძვირია.

LEO თანამგზავრულ სისტემას აქვს შედარებით მაღალი გამტარუნარიანობა და დაბალი შეყოვნება. ერთსა და იმავე რეგიონში, LEO თანამგზავრული სისტემები უზრუნველყოფენ ბევრად მაღალ გამტარუნარიანობას ვიდრე GEO თანამგზავრული სისტემები, მაგრამ ნაკლებს, ვიდრე ტერესტრიალური სისტემები. გამტარუნარიანობა



ნახ. 2.1. სისტემურ დონეზე მეტრიკების შედარება სამი სისტემისთვის და სამი სამომავალო სცენარისთვის

საკმარისია სოფლად და შორეულ რაიონებში მაღალი სიჩქარით კომუნიკაციისთვის, მაგრამ არ არის საკმარისი მჭიდროდ დასახლებული ქალაქების საჭიროებების დასაკმაყოფილებლად. LEO თანამგზავრების შეყოვნება რამდენიმე მწმ–დან ათეულ მწმ–დე მერყეობს, რამაც შეიძლება დააკმაყოფილოს აპლიკაციების სცენარების უმეტესობის საჭიროებები. ისეთი აპლიკაცია, როგორიცაა სატრანსპორტო საშუალებების ინტერნეტი, მოითხოვს რეალურ დროში კარგ მახასიათებლებს და კვლავ დიდად არის დამოკიდებული საბაზო სადგურებზე (BS). GEO თანამგზავრული სისტემის დიდი საკომუნიკაციო მანძილი იწვევს ბევრად მეტ შეყოვნებას, ვიდრე სხვები.

თუმცა, LEO თანამგზავრული სისტემები მნიშვნელოვანი გამოწვევების წინაშე დგანან ღირებულებისა და სიხშირის კოორდინაციის თვალსაზრისით. დიდი მასშტაბის LEO თანამგზავრული სისტემა მოითხოვს მაღალ სამშენებლო და ტექნიკურ ხარჯებს. საბედნიეროდ, აერონავტიკის მწარმოებლებმა შეამცირეს გაშვების ხარჯები, ხოლო გამარტივებული წარმოება ამცირებს თანამგზავრების წარმოების ღირებულებას. სიხშირეების ლიცენზირების თვალსაზრისით, ტელეკომუნიკაციის საერთაშორისო კავშირი (ITU) პრიორიტეტს სიხშირულ რესურსებზე GEO თანამგზავრებს ანიჭებს. პირველი მოთხოვნის — პირველი ფლობის პრინციპის გამო, როდესაც ეს უზარმაზარი თანავარსკვლავედები აშენდება, ადვილი არ იქნება ახალი თანავარსკვლავედებისთვის სიხშირული სპექტრის გამოყოფა. ასევე არსებობს გარკვეული არხების გადაფარვა LEO თანამგზავრულ სისტემებსა და 5G მიწისპისპირა BS სისტემებს შორის, რაც კიდევ უფრო ართულებს სპექტრული რესურსების განაწილების პრობლემებს.

როგორც მძლავრი მათემატიკური ინსტრუმენტი, SG ფართოდ გამოიყენება საკომუნიკაციო ქსელებში. SG–ზე დაფუძნებული მოდელირებისა და ანალიზის უპირატესობები LEO თანამგზავრულ სისტემაში მოცემულია შემდეგნაირად:

თანამგზავრული სისტემების ანალიზის არსებული მეთოდები ძირითადად განკუთვნილია კონკრეტული თანავარსკვლავედის დასაპროექტებლად. თუმცა, ასეთი დიდი სისტემისთვის, თითოეული LEO თანამგზავრის დეტალური მოდელირება დიდ ძალისხმევას მოითხოვს. გაცილებით უფრო ადვილია SG–ზე დაფუძნებული სისტემის ანალიზის ჩატარება სისტემურ დონეზე, ვიდრე თითოეული თანამგზავრის ქცევის განსაზღვრა და შესწავლა. SG მოდელირება არ საჭიროებს დაეყრდნოს ორბიტულ მეტრიკასა და სპეციფიკური თანავარსკვლავედის ფორმას. უნივერსალური და მოქნილი შემთხვევითი ქსელი არის ის, რასაც მოითხოვს დინამიური ქსელების ფეთქებადი ზრდა.

თანამგზავრული სისტემებისთვის მეტი თანამგზავრი და ზღვის დონიდან დაბალი სიმაღლე ნიშნავს მათ გაზრდილ სიმკვრივეს. ამ შემთხვევაში, ინტერფერენცია იქნება მნიშვნელოვანი ფაქტორი, რომელიც

გავლენას ახდენს სისტემის მუშაობაზე. თუმცა, SG–ის გარდა, ჯერ კიდევ არ არსებობს პრაქტიკული ანალიზური ინსტრუმენტები, რომლებიც გამოსადეგია თანამგზავრების მიერ შექმნილი ინტერფერენციების სიმულაციისთვის.

არსებულ არა–SG მოდელებში, თანამგზავრები ხშირად განლაგებულია რეგულარულ წრიულ ან ექვსკუთხა უჯრედებში ერთნაირი დაფარვით. თუმცა, თანამგზავრების განაწილება დამოკიდებულია განედზე და მათი დაფარვა უმეტეს შემთხვევაში მნიშვნელოვნად განსხვავდება. ამიტომ, ტრადიციული ანალიზის მეთოდების შედეგები შეიძლება მნიშვნელოვნად განსხვავდებოდეს ფაქტობრივი სიტუაციისგან. SG შესაფერისია არა–რეგულარული ტოპოლოგიური ქსელების მოდელირებისთვის და ანალიზისთვის. ბოლო კვლევებში, LEO თანა–მგზავრულ ქსელებში გამოყენებული სხვადასხვა ტიპის წერტილოვანი პროცესები განაწილების კომპიუტერული სიმულაციისთვის რამდენიმე მეთოდის გამოყენების საშუალებას იძლევა.

SG–ის გამოყენება მოითხოვს იმ პირობის შესრულებას, რომ თანამგზავრები დამოუკიდებელია და, შესაბამისად, მათი გამოყენება შესაძლებელია მხოლოდ სისტემის მუშაობის ქვედა საზღვრების შესასწავლად. თუმცა, დადასტურდა, რომ დაფარვის ალბათობის ქვედა საზღვარი და საშუალო მიღწევადი სიჩქარე SG მოდელში ისეთივე მჭიდროა (ზუსტია), როგორც მათემატიკური ბადით (mesh) წარმოდგენილი მოდელის (mesh model) ზედა საზღვარი. LEO თანამგზავრული სისტემისთვის, SG მოდელის მახასიათებლები მჭიდროდ ემთხვევა დეტერმინირებული თანავარსკვლავედის მახასიათებელს დაფარვის ალბათობისა და საშუალო მიღწევადი სიჩქარის თვალსაზრისით.

2.3. SG–ზე დაფუძნებული ანალიზური ჩარჩო

ამ პარაგრაფში ჩვენ განვიხილავთ ანალიზურ ჩარჩოს, რომელიც შესწავლილია SG–ისთან დაკავშირებულ ბოლო ნაშრომებში. ცხრილი 2.1 გვთავაზობს ამ ჩარჩოს მოკლე მიმოხილვას. მოდელის წარმოდგენამდე ჩვენ ჯერ მოვიყვანთ რამდენიმე განმარტებას ასტრონომიიდან:

<u>განედი:</u> განედი არის კუთხე, დედამიწის ცენტრიდან მოცემულ წერტილამდე გავლებულ ხაზსა და ეკვატორის სიბრტყეს შორის, რომელიც ითვლება 0–დან 90°–მდე, ეკვატორის ორივე მხარეს. გეოგრაფიული განედი, რომელიც ჩრდილოეთ ნახევარსფეროში მდებარეობს (ჩრდილოეთის განედი) დადებითად ითვლება, სამხრეთ ნახევარსფეროში კი უარყოფითად.

<u>ზენიტის კუთხე:</u> ზენიტის კუთხე არის კუთხე მზესა და ვერტიკალს შორის. ზენიტის კუთხე მსგავსია სიმაღლის კუთხისა, მაგრამ იზომება ვერტიკალურიდან ჰორიზონტალურის ნაცვლად, ამიტომ ზენიტის კუთხე უდრის 90°–ს გამოკლებული სიმაღლე.

<u>ჰორიზონტი:</u> ჰორიზონტი არის ცის საზღვარი დედამიწასთან ან წყლის ზედაპირთან. ის ასევე არის ორგანზომილებიანი სიბრტყე, რომელიც ეხება დედამიწას აღქმის წერტილის მეშვეობით, რომელიც შეიძლება იყოს კარიბჭის (GW) ან მომხმარებლის მდებარეობა. GW–ის თვალსაზრისით, ჰორიზონტის ქვემოთ ნებისმიერი თანამგზავრი მხედველობის მიღმაა, რადგან დედამიწა მოქმედებს, როგორც მაბლოკირებელი ობიექტი.

არსებული ლიტერატურის უმეტესობაში ვარაუდობენ, რომ თანამგზავრები, ისევე როგორც მომხმარებლები, ასევე თანამგზავრული GW–ები და BS–ები დამოუკიდებელი და თანაბრად განაწილებული არიან. შემდეგ პარაგრაფებში განხილულია თანამგზავრული ქსელების განაწილების სამი წერტილოვანი პროცესი.

PPP–ისთვის, რომელიც უკვე განვიხილეთ პირველ თავში, წერტილების რაოდენობას წინასწარ განსაზღვრულ არეალში აქვს პუასონის განაწილება, ხოლო მათი მდებარეობები თანაბრად არის განაწილებული ამავე არეალში. როგორც ერთ–ერთი ყველაზე ხშირად გამოყენებული წერტილოვანი პროცესი, PPP შეიძლება კარგად მოერგოს მიწისპირა ქსელს ისეთი მახასიათებლების ანალიზისთვის, როგორიცაა დაფარვის ალბათობა და მონაცემთა მიღწევადი სიჩქარე. ამრიგად, აქ LEO თანამგზავრის პოზიციები მოდელირებულია, როგორც PPP ფიქსირებული სიმაღლის მქონე სფერულ ზედაპირებზე. PPP–ის ერთ–ერთი ყველაზე მნიშვნელოვანი უპირატესობა ის არის, რომ მას შეუძლია წინასწარ განსაზღვროს წერტილების გარკვეული რაოდენობის ალბათობა სფერულ რეგიონში ფართობის გარკვეული ზომით.

მიუხედავად იმისა, რომ PPP–ის დიდი პრაქტიკული მნიშვნელობა აქვს, ის არ არის საუკეთესო არჩევანი

სცენარები	თანამგზავრების განაწილება	მცირემასშტაბიანი ფედინგი	სისტემის მეტრიკები	სისტემის ტიპები
პირდაპირი კომუნიკაცია	არაჰომოგენური PPP BPP	ფედინგის გარეშე რელეის ფედინგი რაისის ფედინგი	დაფარვის ალბათობა საშუალო მიღწევადი სიჩქარე	ხმაურით შეზღუდული სისტემა ინტერფერენციით შეზღუდული სისტემა ზოგადი სისტემა
ჰიბრიდული ქსელი	PPP	რელეის ფედინგი	დაფარვის ალბათობა	იდეალური სისტემა ხმაურით შეზღუდული სისტემა ზოგადი სისტემა
მრავალნახტომიანი სისტემა GW-რეტრანსლირებული	BPP	რაისის დაჩრდილული ფედინგი	დაფარვის ალბათობა	ხმაურით შეზღუდული სისტემა

ცხრილი 2.1. ლიტერატურაში გამოყენებული მოდელები

სასრული ქსელის მოდელირებისთვის, სადაც კვანძების რაოდენობა შეზღუდულია, რადგან თანამგზავრების პოზიციები სფერულ ზედაპირებზეა და მათი რაოდენობა დაფიქსირებულია დეტერმინირებული თანავარ-სკვლავედებისთვის. აქედან გამომდინარე, თანამგზავრის პოზიციის მოდელირება, როგორც BPP, რომელიც ასევე განხილული იყო წინა თავში, ეფექტიანი გამოსავალია. კერძოდ, ის ათავსებს წერტილების ფიქსირებულ რაოდენობას ფიქსირებული რადიუსის სფეროზე. აქ ზენიტი (სიმაღლე) და აზიმუტის კუთხე თანაბრად არის განაწილებული.

პუასონის წერტილოვანი არაერთგვაროვანი პროცესი (NPPP) აუმჯობესებს PPP მოდელს უფრო სხვა პერსპექტივიდან. ვინაიდან დეტერმინირებული თანამგზავრული თანავარსკვლავედების განაწილება არ არის ერთგვაროვანი სხვადასხვა განედზე (ანუ, თანამგზავრების რაოდენობა დახრილობის ზღვარზე რეალურად მეტია ვიდრე ეკვატორულ რეგიონში), NPPP-ში თანამგზავრების ეფექტური რაოდენობა განედზე გამოიყენება არათანაბარი სიმკვრივის კომპენსაციისთვის.

ნახ. 2.1-ის ზედა მარცხენა ნაწილის შესაბამისად, არსებობს სისტემის სამი ტიპური ვარიანტი: GW-ზე დაფუძნებული სარელეო სისტემა (GW-რეტრანსლატორი), ტერესტრიალური სადგური და LEO თანა-მგზავრული ჰიბრიდული ქსელი, და თანამგზავრის და მომხმარებლის პირდაპირი კომუნიკაცია. GW-ის შეუძლია უზრუნველყოს მიმართული გადაცემა თანამგზავრზე. GW-ის სარელეო სისტემის სახით განლაგებით, თანამგზავრული დაფარვა შეიძლება მნიშვნელოვნად გაუმჯობესდეს. თანამგზავრულ ქსელს ასევე შეუძლია დაეხმაროს მიწისპირა ქსელს სისტემის გამტარუნარიანობის შემდგომ გაზრდასა და საგანგებო სიტუაციებში კომუნიკაციების უზრუნველყოფაში. თანამგზავრებს ასევე შეუძლიათ უშუალო კომუნიკაცია მომხმარებლებთან, რაც, რა თქმა უნდა, მოითხოვს მომხმარებლის სპეციალურ აღჭურვილობას პირდაპირი კომუნიკაციის გასააქტიურებლად. ვინაიდან GW-ის ან BS-ის დაფარვის რადიუსი უმნიშვნელოა დედამიწის ზედაპირის ფართობთან შედარებით, GW-ები და BS-ები შეიძლება ჩაითვალოს წერტილებად, რომლებიც მდებარეობს დიდ ორგანზომილებიან სიბრტყეში, და PPP შესაფერისია მათი მდებარეობის მოდელირებისთვის. როგორც ნაჩვენებია ნახ. 2.1-ის შუა ნაწილში, GEO და LEO თანამგზავრები ქმნიან ორ დამოუკიდებელ BPP-ის, რომლებიც განაწილებულია სხვადასხვა სფეროზე, ხოლო მიწისპირა GW-ები ქმნიან PPP-ის.

2.4. არხის მოდელი

მიღებული სიგნალის სიმძლავრე განისაზღვრება გამოსახულებიდან: $\rho\eta G r^{-\alpha}$, სადაც ρ გასხივებული სიმძლავრეა ანტენის გაძლიერების გათვალისწინებით; η მილევაა არხში ფართომასშტაბიანი ფედინგის პირობებში, G მილევაა მცირემასშტაბიანი ფედინგის დროს და α არის გზაში (r მანძილზე) დანაკარგების ექსპონენტის მაჩვენებელი.

მაგალითისთვის ავიღოთ დაუნლინკის პირობებში სიგნალის გადაცემა. აქ ორი ძირითადი მოდელი გვხვდება. პირველ მოდელში თანამგზავრებს აქვთ ერთნაირი გაძლიერება ყველა მიმართულებით, რასაც ეფექტიანი იზოტროპულად გასხივებული სიმძლავრის (EIRP) რეჟიმი ეწოდება. მეორე მოდელში თანამგზავრებს

აქვთ უფრო დიდი გაძლიერება კონკრეტული მიმართულებით, რომელიც რეალიზებულია სხივის (გასხივების დიაგრამის) ფორმირების ტექნოლოგიით. ამ მოდელში GW-ს ან მომხმარებელს შეუძლია მიიღოს სიმძლავრის მთავარი წილი, ხოლო ინტერფერენციის წყაროს სიმძლავრე მიდრეკილია გვერდითი გასხივების წილისკენ, რამაც შეიძლება გაუმჯობესოს სისტემის სიგნალისა და ინტერფერენციის თანაფარდობა (SIR).

გზაში დანაკარგების ექსპონენტის მაჩვენებელი, ჩვეულებრივ, არის რიცხვი 2-დან 4-მდე. ჩავთვალოთ, რომ თანამგზავრიდან მიწასთან კავშირი ხორციელდება თავისუფალ სივრცეში; უმეტეს შემთხვევაში, $\alpha = 2$ კმაყოფილდება ღია ტერიტორიებისთვის. თუმცა, როდესაც მიწიდან არეკვლისას გარემო შთანთქავს სიგნალის ენერგიას, მრავალგზიანი გავრცელების ეფექტის იგნორირება შეუძლებელია, რის შედეგადაც ვიღებთ $\alpha = 4$. ინტუიციური შედეგი არის ის, რომ როდესაც $\alpha = 2$, ინტერფერენცია ხდება სისტემის მუშაობის შეზღუდვის მთავარი ფაქტორი, და როდესაც $\alpha = 4$, ხმაურის გავლენა გაცილებით მეტი იქნება, ვიდრე ინტერფერენციისა.

ფართომასშტაბიანი ფედინგი, როგორც წესი, მოდელირებულია, როგორც ლოგარითმული ნორმალური კანონით განაწილებული დაჩრდილვა დამატებითი გაძლიერების აღსაწერად. იგი უკუპროპორციულია გადამტანი სიხშირის კვადრატისა. გარდა ამისა, ზოგიერთ ლიტერატურაში გათვალისწინებულია წყლის ორთქლის რეზონანსით გამოწვეული შთანთქმის შესუსტება ჰაერში, რასაც წვიმით გამოწვეული შესუსტება ეწოდება. ის იცვლება გეოგრაფიული პირობების მიხედვით, როგორიცაა, მაგალითად უდაბნო და ტროპიკული ტყე.

მცირემასშტაბიანი ფედინგი შემთხვევითი სიდიდეა, რომელიც აღწერს არხში ფედინგის სიმძლავრის მატებას. თავისუფალ სივრცეში იდეალური გავრცელებისას მცირემასშტაბიან ფედინგს ადგილი არ აქვს. ფედინგის არარსებობა ხელს უწყობს სისტემის მახასიათებლის ზედა საზღვრის შეფასებას და პირიქით, რელეის ფედინგი ხელს უწყობს ქვედა საზღვრის შეფასებას, რასაც ადგილი აქვს მაშინ, როდესაც წარმოიქმნება სერიოზული მრავალგზიანი დამახინჯება. რაისის ფედინგი შესაფერისია ზოგადი სიტუაციისთვის და ფართოდ გამოიყენება მახასიათებლის ზუსტი შეფასებების გასაკეთებლად. რაისის დაჩრდილული (SR) ფედინგი არის რაისის ფედინგიანი არხი LoS ფლუქტუაციური კომპონენტებით. ეს ფედინგიანი არხის ყველაზე ზუსტი მოდელია, განსაკუთრებით ლინკებისთვის სივრცე-დედამიწა. ლიტერატურაში არსებობს არხის რამდენიმე სხვა ხელმისაწვდომი მოდელიც, მაგალითად ისეთი, როგორიცაა ლუს (Loo) განაწილება და ნაკაგამი-*m* ფედინგი. თუმცა, ყველაზე ხშირად გამოყენებული SG მოდელებიდან ლიტერატურაში გვხვდება SR მოდელი, რელეის და რაისის ფედინგი.

არაპირდაპირი ხედვის ხაზში (NLoS) ინტერფერენციის მართვა არხის მოდელის სიზუსტის ერთ-ერთი გასაღებია. ჰორიზონტის ქვემოთ მდებარე თანამგზავრებმა შეიძლება ვერ უზრუნველყონ საიმედო მომსახურება, მაგრამ დიფრაქციულმა სიგნალმა მაინც შეიძლება ხელი შეუშალოს მომხმარებელს. ამავდროულად, თანა-მგზავრმა შეიძლება ვერ უზრუნველყოს LoS კავშირი დედამიწიდან დაბრკოლებების გამო. პირველი, ხშირად განიხილება როგორც ნულოვანი ან რაიმე მცირე მუდმივი სიდიდე და არა როგორც შემთხვევითი ცვლადი სიდიდე, რადგან სიგნალი შედარებით სუსტია. მეორე, შეიძლება აღწერილი იყოს SR ფედინგით. სიმულაციით დადასტურდა, რომ SR ფედინგს შეუძლია ზუსტად მოახდინოს არხის მოდელის სიმულაცია NLoS ინტერფერენციის პირობებში. გარდა ამისა, გამრავლება კოეფიციენტზე, რომელიც წარმოადგენს სარეზერვო გზების დანაკარგებს ფართომასშტაბიანი ფედინგის დროს, ასევე ეფექტიანი გამოსავალია. ეს კოეფიციენტი მოდელირებულია, როგორც ლოგარითმული ნორმალური კანონით განაწილებული შერეული შემთხვევითი ცვლადი სიდიდე ორი კომპონენტით და შერევის თანაფარდობა მოცემულია LoS და NLoS ალბათობით. გასათვალისწინებელია ის გარემოება, რომ LoS კავშირის დამყარების ალბათობა განისაზღვრება მხოლოდ ზენიტის კუთხით.

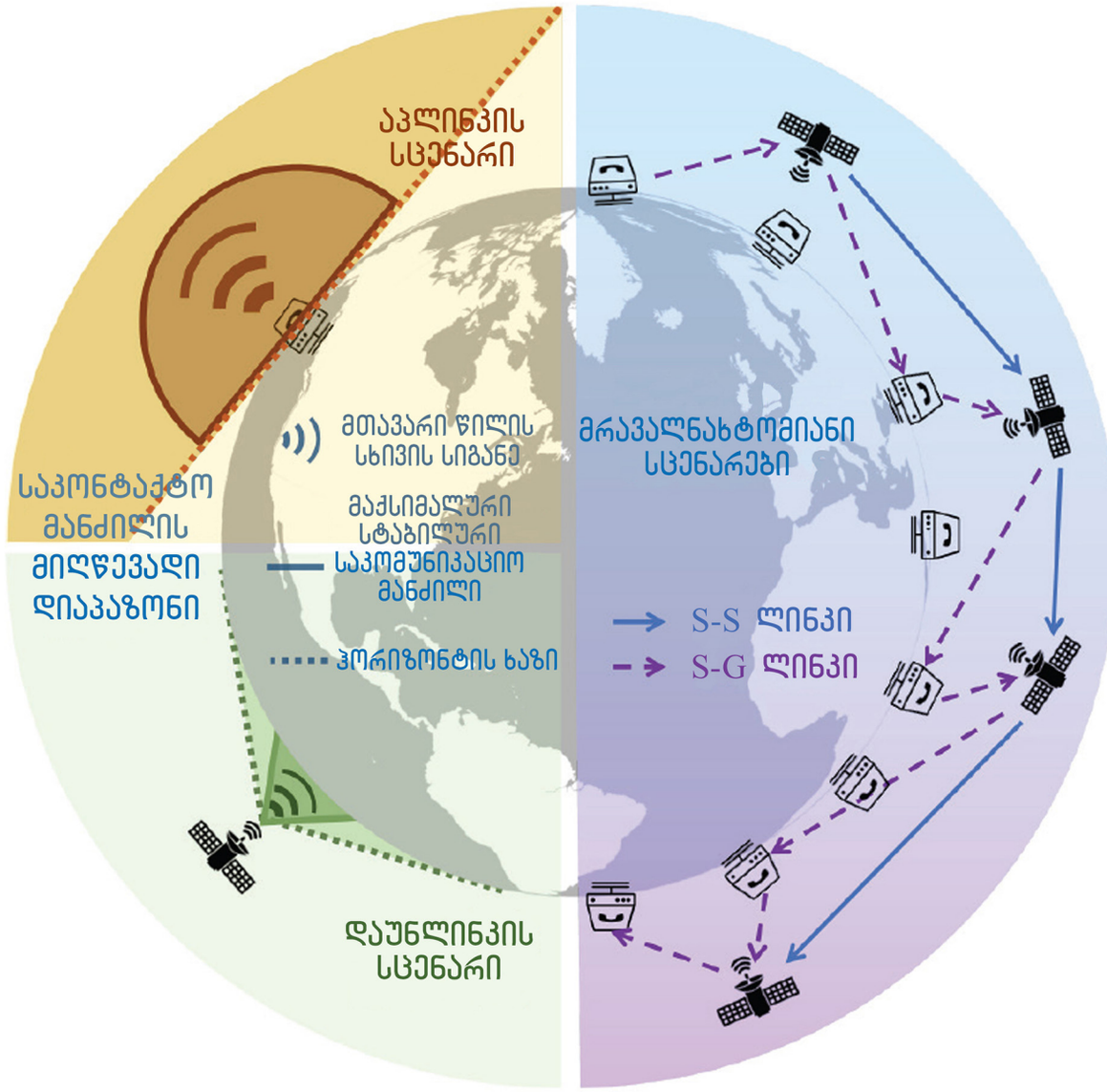
საკონტაქტო მანძილი და თანამგზავრის ხელმისაწვდომობა:

საკონტაქტო მანძილი არის მანძილი მომხმარებელს/GW-სა და ასოცირებულ (მომსახურების მიმწო-დებელ) უახლოეს თანამგზავრს შორის. ლიტერატურაში წარმოდგენილია BPP-ისთვის საკონტაქტო მანძილის განაწილების ორი გამოსახულება. როგორც შემთხვევითი ცვლადი სიდიდისთვის, d_0 საკონტაქტო მანძილის დამატებითი კუმულაციური განაწილების ფუნქცია განსაზღვრულია იმის ალბათობით, რომ არ არის თანა-მგზავრები იმ სფერულ სეგმენტში, რომელიც მიიღება სფერული ზედაპირის კვეთით (რომელზედაც ნაწილდება თანამგზავრები) კონუსთან, რომლის გვერდის სიგრძეა d_0 და აქვს ცენტრი მომხმარებლის, ან GW რეგიონის მდებარეობაში, რომელიც ყველაზე ახლოსაა მომხმარებელთან. საკონტაქტო კუთხე განისაზღვრება, როგორც

მინიმალური ზენიტის კუთხე მომხმარებელსა და თანამგზავრს შორის. ნაჩვენებია რომ, საკონტაქტო კუთხე შეიძლება განიხილებოდეს, როგორც საკონტაქტო მანძილის წარმოდგენა სფერული კოორდინატებით.

სივრცითი განაწილების თვალსაზრისით, თანამგზავრები, GW-ები და მომხმარებლები განლაგებულია სფერულ ზედაპირებზე. ნახ. 2.2-ის ზედა მარცხენა ნაწილი გვიჩვენებს მომსახურე LEO თანამგზავრის შესაძლო მდებარეობის დიაპაზონს მომხმარებლის/GW-ის მოცემული მდებარეობისთვის დაუნლინკზე. ეს დიაპაზონი ძირითადად განისაზღვრება, როგორც ადრე იყო ახსნილი, ჰორიზონტით, რომლის ქვემოთ LoS თანამგზავრები არ არიან ხელმისაწვდომები. სხივის ფორმირების გამოყენებისას, მთავარი წილის მქონე სხივის სიგანე ასევე ერთ-ერთი შეზღუდვაა. მიღწევადი საკონტაქტო მანძილების დიაპაზონი არის გადაკვეთის რეგიონი ჰორიზონტის ხაზს ზემოთ და სხივის მთავარი წილის სიგანეში.

უახლოეს მეზობლამდე მანძილი გამოიყენება არჩეული თანამგზავრიდან მეორემდე უმოკლესი მანძილის აღსაწერად. ეს არის მრავალნახტომიანი ქსელის ანალიზის მნიშვნელოვანი ნაწილი. განსხვავება უახლოეს მეზობელამდე მანძილს და საკონტაქტო მანძილს შორის არის ის, რომ მომხმარებელი/GW არ ეკუთვნის თანამგზავრულ წერტილოვან პროცესს, ხოლო უახლოესი მეზობლის სახით არჩეული თანამგზავრი კი ეკუთვნის.



ნახ. 2.2. LEO თანამგზავრული სისტემის სტრუქტურული დიაგრამა

როდესაც თანამგზავრები განლაგებულია სხვადასხვა სიმაღლეზე გადამცემი სიმძლავრის განსხვავებული მნიშვნელობებით, შემოტანილი უნდა იქნეს ასოცირების ალბათობის კონცეფცია. თანამგზავრული ადგილ-მდებარეობები დაყოფილია მრავალ წერტილოვან პროცესად სიმაღლისა და გადაცემის სიმძლავრის მიხედვით. მოცემულ იარუსთან ასოცირების ალბათობა არის ალბათობა იმისა, რომ ამ იარუსის უახლოესი თანამგზავრი უზრუნველყოფს უფრო მაღალ მიღებულ საშუალო სიმძლავრეს, ვიდრე უახლოესი თანამგზავრები ყველა სხვა იარუსიდან.

თანამგზავრის ხელმისაწვდომობა ნიშნავს, რომ მინიმუმ ერთი თანამგზავრი მაინც იმყოფება მომხმარებლის/GW-ის ხილულ დიაპაზონში. პატარა, დაბალ სიმაღლეზე განლაგებულ თანავარსკვლავედებში, ჩვეულებრივ, ჰორიზონტს მაღლა თანამგზავრების გამოყენება ხელსაყრელი არ არის. არსებულ ლიტერატურაში თანამგზავრის ხელმისაწვდომობის პრობლემის გადასაჭრელად სამი მეთოდი არსებობს:

1. თანამგზავრების სიმკვრივის გაზრდით შემცირებული იქნეს გამოსაყენებელი თანამგზავრების არარსებობის ალბათობა მისაღები ზღურბლის ქვემოთ;

2. გაიზარდოს თანამგზავრების არსებობის ალბათობა სიმაღლისა და გადაცემის სიმძლავრის ერთდროულად გაზრდით;

3. გამოთვლილი იქნეს LoS თანამგზავრის არარსებობის ალბათობა და ინტერფერენცია-პლუს-ხმაურთან თანაფარდობა (SINR) ნულამდე იქნეს დაყვანილი, თუ LoS თანამგზავრები არ არის ხელმისაწვდომი.

პირველი ორი წინადადება იძლევა მითითებებს თანავარსკვლავედის დიზაინერებისთვის, ხოლო ბოლო წინადადება უზრუნველყოფს სისტემის მუშაობის მახასიათებლების ყველაზე ზუსტ შეფასებას შექმნილი თანავარსკვლავედისთვის.

დაფარვის ალბათობა და საშუალო მიღწევადი სიჩქარე:

ამ ნაწილში ჩვენ ვსწავლობთ SG-ის გამოყენებას სისტემის მუშაობის მახასიათებლების ანალიზისთვის. სამი დაკავშირებული სიდიდე აღნიშნულის გასაზომად არის:

1. SINR — გამოიყენება სისტემის კომუნიკაციის ხარისხის გასაზომად;

2. დაფარვის ალბათობა — განისაზღვრება, როგორც ალბათობა იმისა, რომ SINR აღემატება წინასწარ განსაზღვრულ დასაშვებ ზღვარს. ის წარმოადგენს იმის ალბათობას, რომ სისტემას შეუძლია უზრუნველყოს საიმედო კავშირები;

3. საშუალო მიღწევადი სიჩქარე — წარმოადგენს ერგოდიულ გამტარუნარიანობას შენონ-ჰარტლის თეორემის მიხედვით ფედინგის შემცველი საკომუნიკაციო ლინკისთვის.

მას შემდეგ, რაც ასოცირებულ თანამგზავრამდე მანძილი განისაზღვრება საკონტაქტო მანძილით, სხვა LoS თანამგზავრების სიმძლავრეების ჯამი არის ინტერფერენციული. ამიტომ, SINR-ის გამოთვლა შესაძლებელია; შემდეგ გამოითვლება დაფარვის ალბათობა და საშუალო მიღწევადი სიჩქარე. როდესაც LEO თანამგზავრი იყენებს მრავალ ორთოგონალურ ზოლს, საშუალო მიღწევადი სიჩქარე უნდა გაიყოს ორთოგონალური ზოლების რაოდენობაზე.

დაფარვის ალბათობა გამოყენების სხვადასხვა სცენარში განსხვავებულად არის გამოხატული. როდესაც LEO თანამგზავრები ეყრდნობიან მიწისპირა GW-ის, როგორც რეტრანსლატორს, მომხმარებელი დაფარულია თანამგზავრით, და მაშინ თანამგზავრი-GW-ის და GW-მომხმარებლის ლინკები აკმაყოფილებენ SINR მოთხოვნებს. ტერესტრიალური BS და LEO თანამგზავრული ჰიბრიდული ქსელის სცენარში, თანამგზავრები და BS-ები დამოუკიდებლად ქმნიან ქსელს. მომხმარებელი ითვლება გათიშულად, როდესაც მომხმარებელი-GW ლინკის ან GW-თანამგზავრი ლინკის SINR არის ზღურბლს ქვემოთ.

ლიტერატურაში განხილულია სხვადასხვა ტიპის სისტემის დაფარვის ალბათობა. იდეალურ სისტემაში გადაცემულ სიგნალზე არ მოქმედებს არანაირი ინტერფერენცია და ხმაური. სანამ თანამგზავრი მუშაობს, მომხმარებელს ყოველთვის შეუძლია განახორციელოს წარმატებული გადაცემა. ასეთი სისტემები გამოიყენება სისტემის მახასიათებლებისა და თანამგზავრის ხელმისაწვდომობის ზედა საზღვრების შესასწავლად. ხმაურით შეზღუდული სისტემა გვაქვს გარემოში, სადაც ხმაურის სიმძლავრე ბევრად უფრო ძლიერია, ვიდრე ინტერფერენციის სიმძლავრე. ინტერფერენციის სიმძლავრე ხშირად განიხილება როგორც ნულოვანი ან მცირე მუდმივი სიდიდე. ეს ხდება მაშინ, როდესაც ინტერფერენცია წარმოიქმნება დიფრაქციული სიგნალიდან.

ინტერფერენციით შეზღუდულ სისტემაში, ინტერფერენციის სიმძლავრე დომინანტურია. ორთოგონალური არხების გამოყენება მნიშვნელოვნად ამცირებს თანაარხის ინტერფერენციას და აუმჯობესებს დაფარვის ალბათობას; თუმცა, თითოეულ თანამგზავრს შეუძლია გამოიყენოს სისტემის გამტარუნარიანობის მხოლოდ ნაწილი, რაც ამცირებს სიმძლავრეს და მონაცემთა გადაცემის სიჩქარეს. აქედან გამომდინარე, არსებობს ორთოგონალური არხების ოპტიმალური რაოდენობა ინტერფერენციით შეზღუდულ სისტემებში საშუალო მიღწევადი სიჩქარის მაქსიმიზაციისთვის. ზოგადი სისტემა ითვალისწინებს როგორც ინტერფერენციას, ასევე ხმაურის სიმძლავრეს.

დაფარვის ალბათობას და საშუალო მიღწევად სიჩქარეს სხვადასხვა ტიპის მცირემასშტაბიანი ფედინგისას აქვთ სრულიად განსხვავებული მათემატიკური გამოსახულებები. დაფარვის ალბათობა და საშუალო მიღწევადი სიჩქარე ზოგად სისტემაში ფედინგის გარეშე და რელეის ფედინგის პირობებში შესწავლილია ლიტერატურაში. რაისის ფედინგისა და SR ფედინგის პირობებში, ასოცირებული თანამგზავრული სიგნალი გადაიცემა პირდაპირი გზით, ხოლო ინტერფერენციის შემომტანი თანამგზავრული სიგნალები გადაიცემა არეკვლის გზით. ამ შემ-თხვევაში, სისტემა შეზღუდულია ხმაურით. ლიტერატურაში ასევე შესწავლილია დაფარვის ალბათობა SR ინტერფერენციის პირობებში ხმაურით შეზღუდულ სისტემაში.

დაბოლოს, აღვნიშნავთ, რომ ნებისმიერი ტიპის მცირემასშტაბიანი ფედინგის პირობებში, ინტერფერენციების აღწერისათვის შეიძლება გამოყენებულ იქნეს ლაპლასის გარდაქმნა, დაფარვის ალბათობისა და მიღწევადი სიჩქარის გამოთვლის პროცესში.

2.5. SG-ზე დაფუძნებული კომპიუტერული სიმულაციის დაყენება

დავუშვათ, რომ დედამიწის მოპირდაპირე ბოლოებზე მდებარე ორი GW, ზენიტის კუთხეებით 0 და π, საჭიროებენ კომუნიკაციას. თანამგზავრები მოდელირებულია როგორც BPP, დედამიწასთან კონცენტრირებულ სფეროზე. თანამგზავრთაშორისი კავშირისა და თანამგზავრული-მიწისპირა კავშირის სიგნალებს აქვთ სინათლის სიჩქარე. როგორც ნაჩვენებია ნახ. 2.2-ზე, ლურჯი ფერის ისარი წარმოადგენს თანამგზავრი-თანამგზავრი (S-S) ლინკს, ხოლო იასამნისფერი ისარი წარმოადგენს თანამგზავრი-კარიბჭე (S-G) ლინკს. GW-ებს შეუძლიათ გაგზავნონ შეტყობინებები ასოცირებულ თანამგზავრებზე, ხოლო თანამგზავრებს შეუძლიათ დაუკავშირდნენ GW-ებს LoS დიაპაზონში. ჩვენ განვიხილავთ ორ სცენარს:

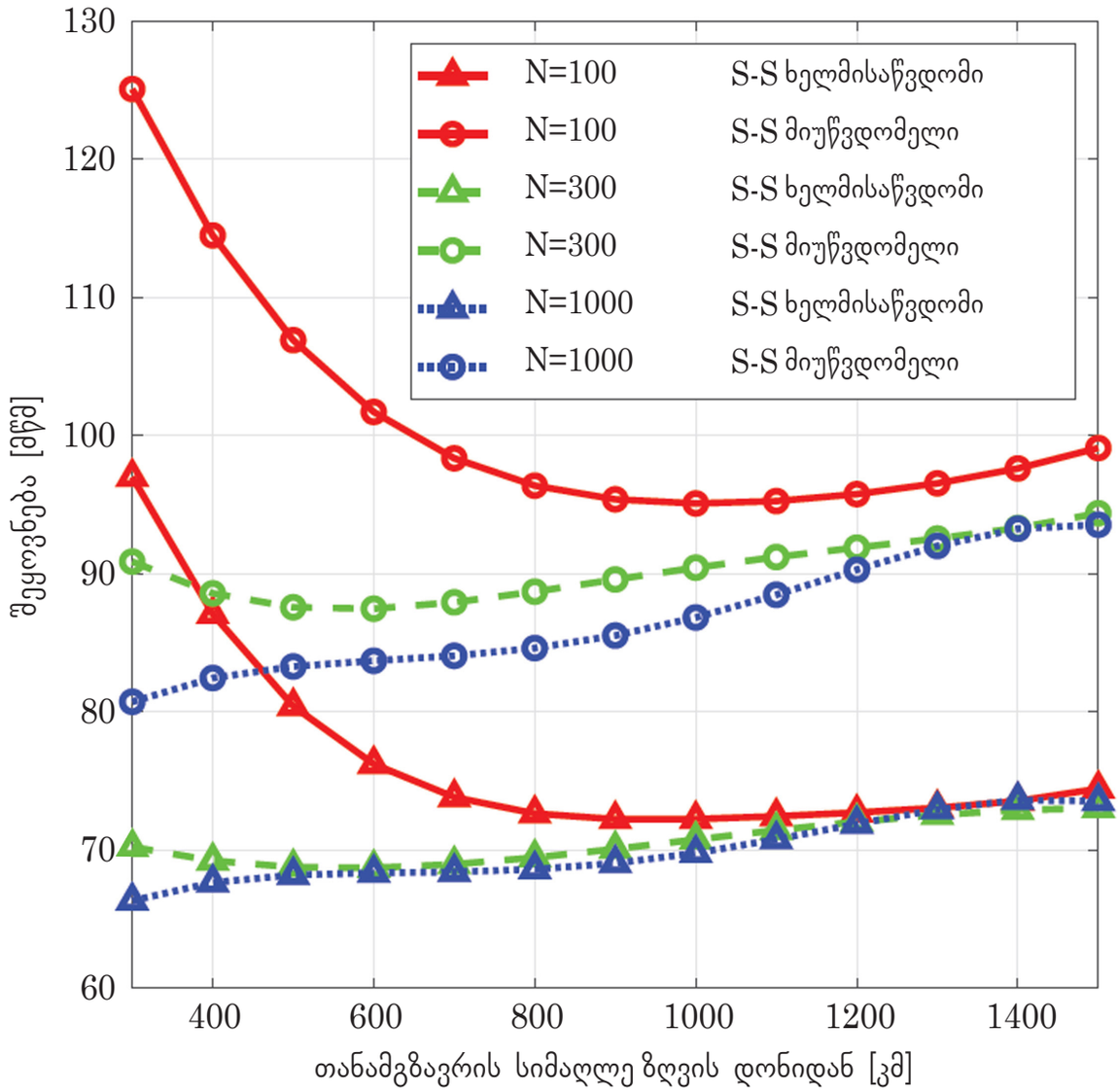
1. თანამგზავრთაშორისი ლინკების სცენარში, თანამგზავრი იყენებს GW-ებს მონაცემების სხვა თანამგზავ-რებზე გადასამისამართებლად, სანამ შეტყობინება არ მიეწოდება დანიშნულების ადგილს;

2. იმის ნაცვლად, რომ მოითხოვოს GW რეტრანსლატორი, თანამგზავრი აგზავნის შეტყობინებას უშუალოდ შემდეგ გადასასვლელ (ნახტომის) ადგილზე თანამგზავრთაშორისი ლინკების სცენარის მიხედვით.

ორივე სცენარის მაგალითები ნაჩვენებია ნახ. 2.2-ზე.

ნახ. 2.3-დან ჩანს, რომ როდესაც თანამგზავრების რაოდენობა არასაკმარისია, გადაცემის პროცესში შეყოვნება მცირდება ზღვის დონიდან სიმაღლის მატებასთან ერთად. ეს იმიტომ ხდება, რომ როდესაც თანა-მგზავრი ეძებს შემდეგი ნახტომის ადგილს, მას შეუძლია მხოლოდ სცადოს LoS-ში თანამგზავრების პოვნა, რომლებსაც შეუძლიათ სიგნალების გადაცემა. სიმაღლის მომატებასთან ერთად თანამგზავრის ხედვის დიაპაზონი ფართოვდება, რაც საშუალებას აძლევს მას აირჩიოს რამდენიმე თანამგზავრიდან ის, რომელიც უკეთეს მდგომარეობაშია. თუმცა, თანამგზავრების საკმარისი რაოდენობისთვის, სიმაღლის მატებასთან ერთად, გაიზრდება როგორც S-S ლინკის, ასევე S-G ლინკის მანძილი.

მთლიანობაში, როდესაც S-S კომუნიკაცია მიუწვდომელია, შეყოვნება იზრდება დაახლოებით 30 პროცენტით, იმ შემთხვევასთან შედარებით სადაც S-S კომუნიკაცია ხელმისაწვდომია. როდესაც თანამგზავრების რაოდენობა იზრდება 100-დან 300-მდე, სისტემის შეყოვნება შეიძლება მნიშვნელოვნად შემცირდეს. 300-დან 1000-მდე თანამგზავრების რაოდენობის გაზრდისას, სისტემის მახასიათებელი დიდად აღარ უმჯობესდება. კერძოდ, როდესაც S-S კომუნიკაცია მიუწვდომელია, 300 თანამგზავრისა და 1000 თანამგზავრის მახასიათებლების მრუდები ერთმანეთს ემთხვევა და თანამგზავრების შემდგომი დამატება არ მოიტანს დამატებით სარგებელს



ნახ. 2.3. თანამგზავრული სისტემების საშუალო შეყოვნება სხვადასხვა სიმაღლეზე და სხვადასხვა მასშტაბებში

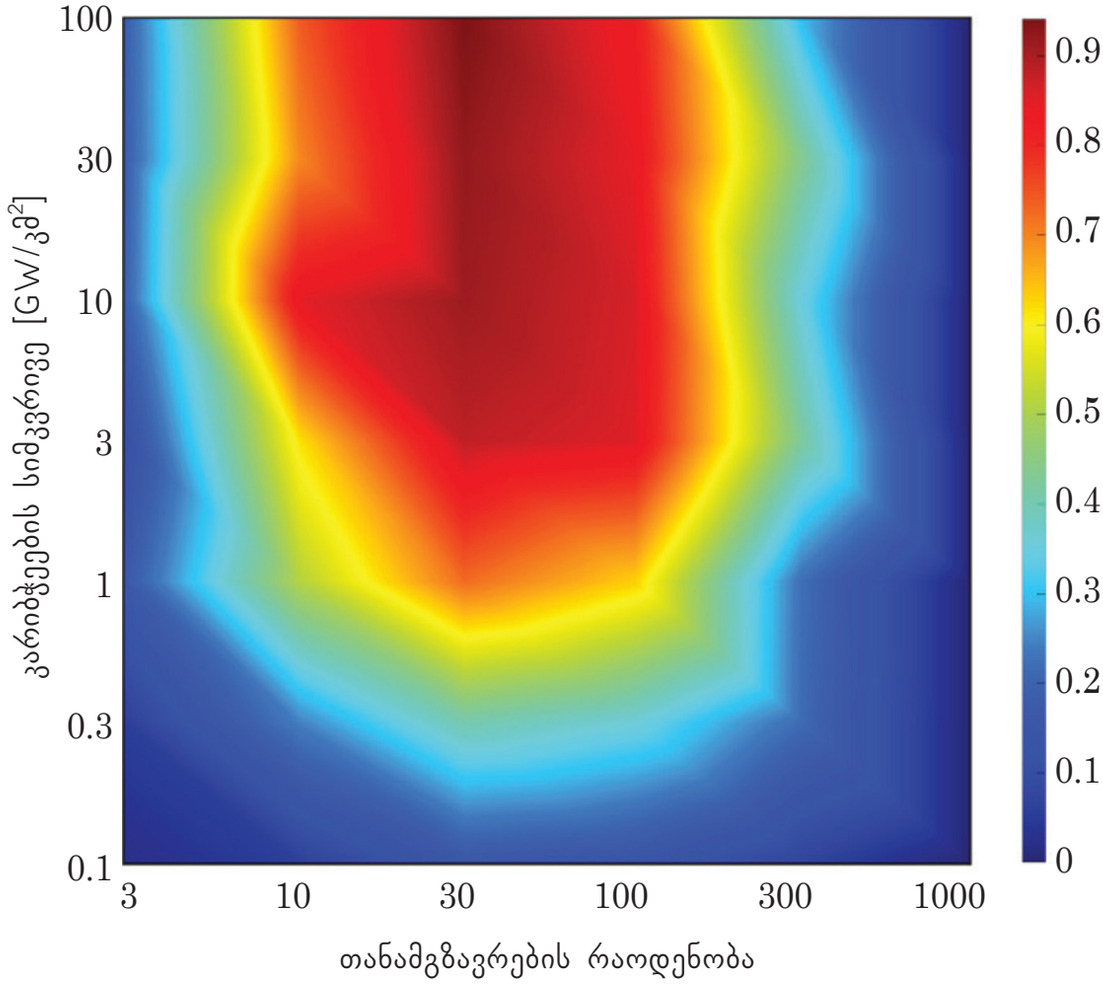
შეყოვნების თვალსაზრისით. სიმაღლის მატებასთან ერთად, ორ განხილულ სცენარს აქვს განსხვავებული შეყოვნების მნიშვნელობა. სამი მრუდის ტენდენცია, როდესაც S-S კომუნიკაცია ხელმისაწვდომია, უფრო სწრაფად შეთანხმებადია. სიმაღლის გაზრდა, თანავარსკვლავედის ზომის გაზრდა და თანამგზავრებს შორის ურთიერთქმედების დაშვება იწვევს უფრო მეტი თანამგზავრის არსებობას თანამგზავრის ხელმისაწვდომობაში. როდესაც დიაპაზონში საკმარისი თანამგზავრია, ამ მეთოდებით მიღებული მახასიათებლების გაუმჯობესება შეზღუდულია და მრუდების ტენდენცია მუდმივობისკენაა მიმართული.

ნახაზებზე 2.4 და 2.5, ჩვენ ვაანალიზებთ თანამგზავრთა რაოდენობის, GW სიმკვრივისა და თანა-ვარსკვლავედის განლაგების სიმაღლის გავლენას სისტემის დაფარვის ალბათობაზე. თანამგზავრები მიჰყვებიან BPP-ის, ხოლო GW-ები მიჰყვებიან PPP-ის. ჩვენ ვვარაუდობთ, რომ თანამგზავრის გადამცემი სიმძლავრეა 15 დბვტ. სისტემის მთლიანი დაფარვის ალბათობა არის ორი ლინკის (თანამგზავრი-GW და GW-მომხმარებელი) დაფარვის ალბათობების ნამრავლი.

თანამგზავრი-GW ლინკისა და GW-მომხმარებელი ლინკის შემთხვევებში არხისთვის განიხილება ერთი და იგივე ფედინგი, ფართომასშტაბიანი ფედინგი არის 0 დბ LoS დიაპაზონში, მცირემასშტაბიანი ფედინგი

არის SR (1.29, 0.158, 19.4) და გზაში დანაკარგების ექსპონენტის მაჩვენებელი არის 2. კერძოდ, 0 დბ-ის ფართომასშტაბიანი ფედინგი ნიშნავს, რომ ტალღის სიგრძის, არამიმართული ანტენის გაძლიერების და წვიმით გამოწვეული შესუსტების ეფექტები ნორმალიზდება. დავუშვათ, რომ თანამგზავრები და კარიბჭეები იყენებენ ერთსა და იმავე სიხშირულ ზოლს და არსებობს თანაარხის ინტერფერენცია. დაფარვის ალბათობის გაანგარიშებისას SINR-ის ზღურბლი არის -10 დბ.

ნახ. 2.4-ზე თანამგზავრები განლაგებულია 1000 კმ სიმაღლეზე, ანუ განაწილებულია სფერულ ზედაპირზე 7371 კმ რადიუსით (დედამიწის რადიუსია 6371 კმ). როდესაც თანამგზავრების რაოდენობა არასაკმარისია, სისტემას არ გააჩნია ხელმისაწვდომი თანამგზავრები დაფარვის უზრუნველსაყოფად, ან ასოცირებული თანამგზავრები ძალიან შორს არიან. პირიქით, ძალიან ბევრმა თანამგზავრმა შეიძლება გამოიწვიოს მნიშვნელოვანი ინტერფერენცია. ამიტომ, თანამგზავრების რაოდენობის ზრდასთან ერთად, დაფარვის ალბათობა გვიჩვენებს ჯერ ზრდის, შემდეგ კი კლების ტენდენციას. გარდა ამისა, 1000 კმ სიმაღლეზე თანამგზავრების ოპტიმალური რაოდენობა დაფარვის ალბათობისთვის არის დაახლოებით 30. თანამგზავრების ოპტიმალური რაოდენობა არ არის დამოკიდებული GW-ების სიმკვრივეზე. თანამგზავრებისგან განსხვავებით, GW-ების სიმკვრივის გაზრდა გონივრულ დიაპაზონში გააუმჯობესებს სისტემის დაფარვის მაჩვენებელს, ხოლო GW ქვესისტემა წარმოგვიდგენს სისტემის მახასიათებლებს შეზღუდული ხმაურით.



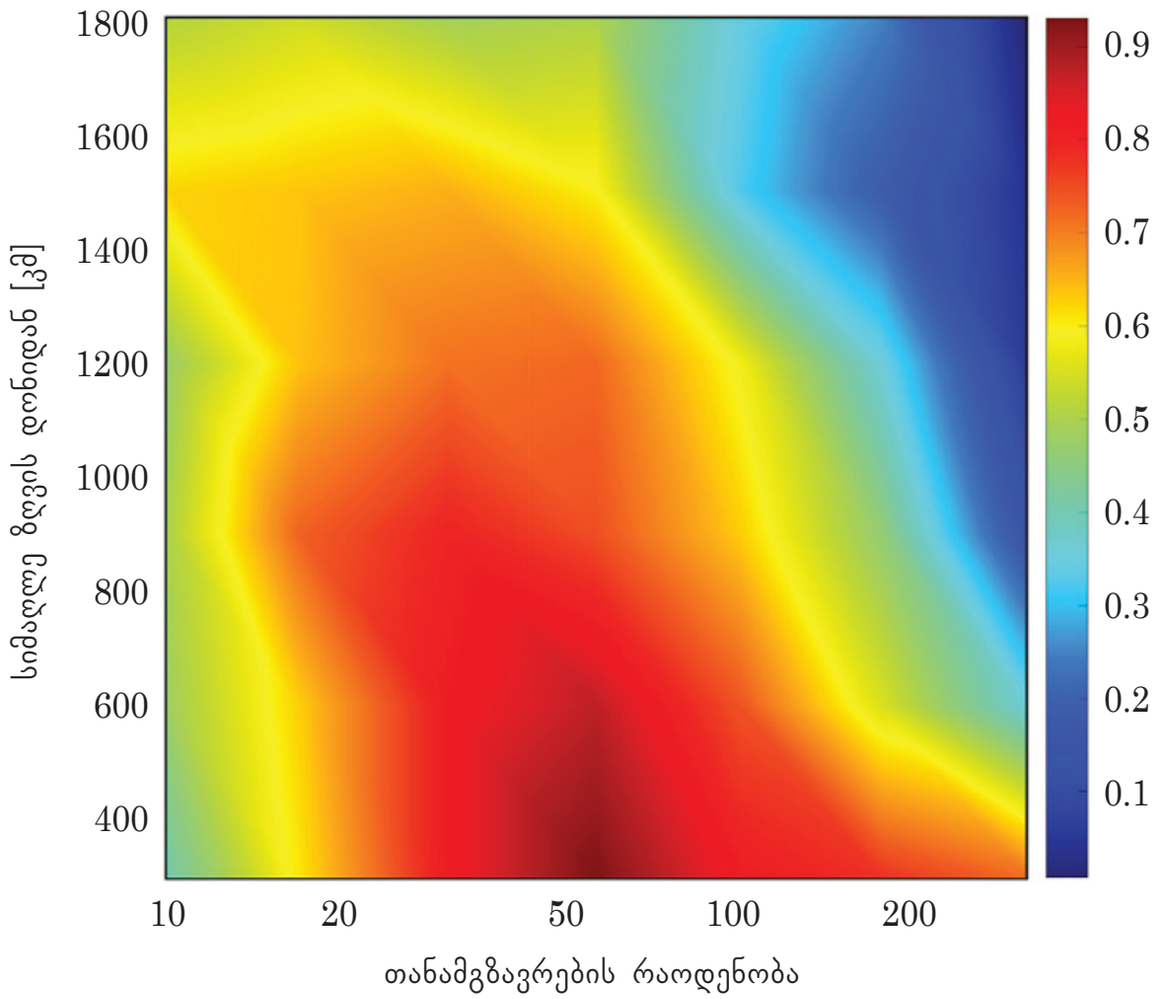
ნახ. 2.4. თანამგზავრების რაოდენობის და GW-ების სიმკვრივის ზემოქმედება დაფარვის ალბათობაზე

ნახ. 2.5-ზე GW-ების სიმკვრივე ფიქსირდება 3/კმ²-ზე. თანავარსკვლავედის განლაგების სიმაღლის ზრდა შეამცირებს დაფარვის ალბათობას. არსებობს თანამგზავრების ოპტიმალური რაოდენობა მოცემული სიმაღლისთვის. თანავარსკვლავედის განლაგების სიმაღლის მატებასთან ერთად მცირდება შესაბამისი თანამგზავრების რაოდენობა, რომლებიც უზრუნველყოფენ ოპტიმალურ დაფარვას.

2.6. გამოწვევები და მომავლის სცენარები

მიუხედავად იმისა, რომ SG-ის ბევრი უპირატესობა აქვს სისტემის მუშაობის მახასიათებლების ანალიზის კუთხით, ტრადიციულ SG ანალიზის ჩარჩოს აქვს გარკვეული შეზღუდვები და არსებობს მრავალი გამოწვევა SG-ის გამოყენებისას უფრო რთული და დახვეწილი თანამგზავრული სისტემებისათვის მომავალში. ამიტომ, ნახ. 2.1-ის მარჯვენა ნაწილში ჩვენ წარმოვადგინეთ რამდენიმე სამომავლო სცენარი. ამ სცენარების მოდელირება, ანალიზი და შეფასება შესაძლებელია SG-ზე დაფუძნებული მოდელების გამოყენებით, როგორც ეს აღწერილია ამ თავში.

S-S კომუნიკაცია: ზემოთ ჩვენ ვივარაუდეთ, რომ თანამგზავრები ერთმანეთისგან დამოუკიდებელი არიან და გავაანალიზეთ სისტემის მუშაობის ქვედა საზღვარი. თუმცა, მომავალ თანამგზავრულ სისტემებში იქნება მეტი



ნახ. 2.5. თანამგზავრების რაოდენობის და თანავარსკვლავედის განლაგების სიმაღლის ზემოქმედება დაფარვის ალბათობაზე

S–S კომუნიკაცია, რაც მნიშვნელოვნად გაუმჯობესებს სისტემის მუშაობის მახასიათებლებს. ურთიერთქმედების საშუალებით, თანამგზავრებს შეუძლიათ შეიტყონ მეტი, გარემო პირობების შესახებ, როგორიცაა ახლომდებარე თანამგზავრების რაოდენობა და მათ მიერ გამოყენებული სიხშირული ზოლები. თანამგზავრებთან კომუნიკაცია ტრაექტორიის წინასწარ განსაზღვრამდე მათ საშუალებას აძლევს იწინასწარმეტყველონ მომავალი საკომუნიკაციო გარემო. არასაკმარისი გამტარუნარიანობისა და მონაცემთა გადაცემის მიღწევადი სიჩქარის პრობლემა შეიძლება ეფექტიანად მოგვარდეს თანამგზავრებს შორის ასოციაციისა და ჰენდოვერის მეთოდების გონივრულად შემუშავებით. პირიქით, ორთოგონალური არხების გამოყენებით, შესაძლებელია მაღალი SINR-ის მიღწევა, მაშინაც კი, თუ მომხმარებელი/GW ასოცირდება არაოპტიმალურ თანამგზავრთან ჰენდოვერის შემდეგ.

<u>გარემოსთან თვითადაპტაცია:</u> მეორე გამოწვევა, რომელსაც აწყდება ტრადიციული SG ანალიზის ჩარჩოები, არის ის, რომ რეალურად, თანამგზავრები არ რჩებიან უმოქმედო, როდესაც კომუნიკაციებს აქვთ მტყუნებები მკაცრ გარემოში. განსხვავებულ ასტრონომიულ და გეოგრაფიულ პირობებთან შეჯახებისას, მნიშვნელოვანია გარემოს აქტიური აღქმა და სწორი ადაპტაციური სტრატეგიების შერჩევა. მაგალითად, თანამგზავრს ყოველთვის შეუძლია მიმართოს სიმძლავრის მთავარი წილი იმ ტერიტორიისკენ, სადაც ყველაზე დიდი მოთხოვნაა სერვისებზე, რაც მნიშვნელოვნად აუმჯობესებს ადგილობრივ დაფარვას.

<u>ვირტუალური თანამგზავრი:</u> S–S კომუნიკაციების გარდა, შესაძლოა არსებობდეს პირდაპირი ურთიერთობა თანამგზავრებს შორის. ვირტუალური ჰოსტინგის იდეის მსგავსად, მრავალი თანამგზავრი ერთი და იმავე მისიით შეიძლება იყოს ინტეგრირებული ვირტუალურ თანამგზავრში. ვირტუალურ თანამგზავრს შეუძლია განსაზღვროს ორთოგონალური არხების რაოდენობა და გამოყოს კონკრეტული სიხშირეები არხებში. გარდა ამისა, LEO თანამგზავრები შეიძლება გამოყენებულ იქნეს როგორც GEO თანამგზავრების დამხმარე საშუალება, რათა შეავსონ იმ რეგიონების დაფარვა, რომლებსაც ერთი GEO დამოუკიდებლად ვერ უზრუნველყოფს.

გარდა ამისა, პროგრამული უზრუნველყოფით განსაზღვრული ქსელის კონცეფცია მნიშვნელოვან როლს თამაშობს თანავარსკვლავედების მართვაში. ქსელის ფუნქციების ვირტუალიზაციის გამოყენება და სერვისის ფუნქციების ჯაჭვის ჩაშენება თანამგზავრული სისტემების განვითარების პერსპექტიული მიმართულებებია.

2.7. მეორე თავის დასკვნა

ეს თავი იკვლევს SG-ის გამოყენებას LEO თანამგზავრული საკომუნიკაციო სისტემების სიმულაციისა და ანალიზისთვის; წარმოდგენილია თანამგზავრების განაწილების რამდენიმე ვარიანტი და გაანალიზებულია ლიტერატურაში მოცემული არხის მოდელების მსგავსებები და განსხვავებები. არატექნიკური პერსპექტივიდან, ჩვენ აღვწერთ დაფარვის ალბათობას სხვადასხვა სცენარში, საშუალო მიღწევად სიჩქარეს და საკონტაქტო მანძილს. ეს თავი აანალიზებს რამდენიმე ფაქტორს, რომლებიც გავლენას ახდენენ შეყოვნებასა და დაფარვის ალბათობაზე SG-ზე დაფუძნებული მოდელების გამოყენებით და იძლევა შემდეგ დასკვნებს: თანამგზავრების რაოდენობისა და თანავარსკვლავედის განლაგების სიმაღლის გაზრდას კონკრეტულ დიაპაზონში შეუძლია ეფექტიანად შეამციროს შეყოვნება; თანამგზავრების ერთმანეთთან კომუნიკაციის უნარი არსებით გავლენას ახდენს შეყოვნების მნიშვნელობის 30%-ით შემცირებაზე. ეს მიუთითებს იმაზე, რომ ბოლო ტექნოლოგიური მიღწევები S–S კომუნიკაციებით უზრუნველყოფაში მნიშვნელოვნად გააფართოებს აპლიკაციების რაოდენობას, რომელიც შეიძლება დაეყრდნოს LEO თანამგზავრულ კომუნიკაციებს.

თავი 3 ორბიტული პერიფერიის განტვირთვა LEO თანამგზავრების მეგათანავარსკვლავედებზე გამოთვლითი კუთხით თანასწორი წვდომისთვის

3.1. შესავალი

ახალი ტექნოლოგიები ხშირად გვთავაზობს ფანჯარას ჩვენს საზოგადოებაში იმის გასაგებად, თუ როგორ მოხდა მათი ინტეგრირება სოციალურ აქტივობებში და როგორია მათი გავლენა ინსტიტუციების განვითარებაზე და სოციალურ პროგრესზე. კომპიუტერული და საკომუნიკაციო ტექნოლოგიები ამის თვალსაჩინო მაგალითია. კითხვა, თუ როგორ იმოქმედებს გამოთვლითი პლატფორმები ჩვენს საზოგადოებაში შესაძლებლობების თანასწორობაზე, გვაიძულებს ვაღიაროთ, რომ გარკვეული რეალობები არ შეესაბამება ჩვენს იდეალებს ცხოვრების, კულტურისა და გენდერული თანასწორობის შესახებ. მაშასადამე, წვდომისა და გამოთვლითი თანასწორობის უზრუნველყოფა კვლევისთვის უაღრესად მნიშვნელოვანი მისიაა.

თანამგზავრული და საჰაერო კომუნიკაციები უკვე დადასტურებულია, როგორც სიცოცხლისუნარიანი რესურსი დაუკავშირებელი ან ცუდად დაკავშირებული ტერიტორიების დასაკავშირებლად. როდესაც საქმე ეხება LEO თანამგზავრების მეგათანავარსკვლავედებს, კოსმოსური ინდუსტრია გვპირდება მნიშვნელოვან გაუმჯობესებას დაფარვის გაზრდისა და შეყოვნების შემცირებაში. სასარგებლო დატვირთვის (payload) რაციონალურად გამოყენებამ შეიძლება ასევე უზრუნველყოს მონაცემთა ქეშირება და ღრუბლოვანი გამოთვლითი შესაძ-ლებლობები ქსელის პერიფერიაზე. განვმარტავთ, რომ გამოთვლით ტექნიკასა და ტელეკომუნიკაციაში, სასარგებლო დატვირთვა გადაცემული მონაცემების ნაწილია, რომელიც წარმოადგენს რეალურად გადასაცემ შეტყობინებას, ხოლო სათაურები და მეტამონაცემები იგზავნება მხოლოდ სასარგებლო დატვირთვის მიწო-დების გასააქტიურებლად. მრავალ აპლიკაციას შეუძლია ისარგებლოს თანამგზავრული გამოთვლითი ინფრასტრუქტურით, კერძოდ, ორბიტული პერიფერიებით (OE), მობილური ინტერნეტის, საგნების ინტერნეტის (IoT) და შემდგომი თაობის ტაქტილური ინტერნეტით. ფაქტობრივად, მრავალი აპლიკაცია სულ უფრო და უფრო ერწყმის ხელოვნურ ინტელექტს (AI) და მანქანური სწავლების (ML) ალგორითმებს, რომლებიც საჭიროებენ ურთიერთსიახლოვეს გამოთვლითი ამოცანების განტვირთვისთვის.

თუმცა, რადგან ბევრ მომხმარებელს შეიძლება დასჭირდეს რეალურ ან თითქმის რეალურ დროში გამო-თვლითი ოპერაციების ჩატარება, ღრუბელზე მონაცემების დამუშავების შეყოვნება ყოველთვის ვერ იქნება დამაკმაყოფილებელი, განსაკუთრებით იმ რეგიონებში, სადაც ტერესტრიალური კავშირი არ არის და თანა-მგზავრები ერთადერთი გამოსავალია. პერიფერიული გამოთვლითი პარადიგმა ახალი პასუხია ასეთი ბაზრისა და სერვისის საჭიროებებზე. ეს საშუალებას იძლევა გამოთვლითი პროცესი უფრო ახლოს იყოს მონაცემთა მწარმოებელ ობიექტებთან, რამაც შეიძლება მაქსიმალურად შეამციროს რეაგირების დრო. ის უზრუნველყოფს მომსახურების სასურველ ხარისხს (QoS) საბოლოო მოწყობილობების გამოთვლით შესაძლებლობებსა და ენერგორესურსებზე დაყრდნობის გარეშე, რაც შეიძლება იყოს მწირი და ძვირი. მეხუთე თაობის შემდგომი (B5G) და მეექვსე თაობის (6G) მობილური ქსელები გათვალისწინებულია, როგორც კანდიდატი ტექნოლოგიები, რათა გამოიყენონ AI, როგორც სერვისი. ფაქტობრივად, სტანდარტიზაციის პროცესი ასევე მოიცავს NTN-ების ინტეგრაციის საგზაო რუკას, რომელიც განიხილავს როგორც საჰაერო, ასევე კოსმოსურ სეგმენტებს, როგორც 3GPP-ის საკვანძო ინოვაციური სფეროებს.

ამ თავში ჩვენ წარმოვადგენთ პერიფერიულ გამოთვლით პლატფორმას, რომელიც ითვალისწინებს LEO თანამგზავრებზე გამოთვლების ჩატარებას, როგორც სერვისის შესაძლებლობებს ორბიტაზე გამოთვლითი კონტინუუმის დანერგვის მიზნით გამოთვლებზე თანაბარი წვდომისთვის. ჩვენ განვიხილავთ პერიფერია-ღრუბელი პროცესების უწყვეტობის კონცეფციას, მათ შორის OE გამოთვლებს (OEC) და მისი მიზანშეწონილობის მოკლე მიმოხილვას. ჩვენ ვუჩვენებთ საცნობარო სცენარის კონცეფციის მიზანშეწონილობას, ხოლო შემდეგ აღვწერთ განტვირთვის პრობლემას, რომელიც დაკავშირებულია გაანალიზებულ OE ინფრასტრუქტურასთან.

კომპიუტერული სიმულაციების საშუალებით, ჩვენ წარმოვადგენთ ხედვას იმის შესახებ, თუ როგორ შეიძლება განტვირთვა მომგებიანი იყოს OE პლატფორმებისთვის. თავის ბოლოს წარმოდგენილია დასკვნითი მოსაზრებები და ღია გამოწვევები.

3.2. პერიფერია-ღრუბელი პროცესების უწყვეტობა და ორბიტული პერიფერიული გამოთვლების შესაძლებლობები

დღესდღეობით, ისეთ ტექნოლოგიებს, როგორიცაა მობილური, პერიფერიული და ღრუბლოვანი გამომთვლელები, აქვთ პოტენციალი ერთობლივად შექმნან გამოთვლითი უწყვეტი პროცესები ახალი „გამრღვევი" აპლიკაციებისთვის. ლიტერატურაში შემოთავაზებულია მოდელის ინფრასტრუქტურა მობილური პერიფერია-ღრუბელი პროცესების უწყვეტობის რეალიზაციისთვის, სახელწოდებით A3-E. შემოთავაზებული ინფრასტრუქტურა იყენებს გამოთვლით პარადიგმას — „ფუნქცია, როგორც სერვისი", რაც საშუალებას აძლევს ჰეტეროგენულ მომწოდებლებს ავტონომიურად ამოიღონ, განათავსონ და მიაწოდონ გამარტივებული ფუნქციები მდგომარეობის შენახვის გარეშე, ასევე მიაწოდონ ისინი მიკროსერვისების სახით. ვინაიდან ცალკეული პროვაიდერები და ინფრასტრუქტურები ვერ შეძლებენ ავტონომიურად კოორდინაციას და იმის გადაწყვეტას, თუ ვინ უნდა მოემსახუროს კლიენტის მოთხოვნას, A3-E ინფრასტრუქტურა უზრუნველყოფს კლიენტისა და მიმწოდებლის ურთიერთთანამშრომლობას, რაც საშუალებას აძლევს მიკროსერვისებს მოქნილად და კონტექსტზე დამოკიდებულად განთავსდეს კონტინუუმში. პერიფერია-ღრუბელი პროცესების უწყვეტობის იდეა არის ღრუბლოვანი პლატფორმის შესაძლებლობების გაფართოება ქსელის პერიფერიამდე, კერძოდ ახლო პერიფერიაზე (NE) და შორეულ პერიფერიაზე (FE) ღრუბლიდან დაშორების მანძილის შესაბამისად. იგი მხარს უჭერს მონაცემთა დამუშავებას გამოთვლითი რესურსების საერთო აუზის მეშვეობით, რაც საშუალებას იძლევა შემცირდეს გადასაცემი მონაცემების რაოდენობა, ქსელის ლინკებზე გამტარუნარიანობის მოთხოვნა და აპლიკაციებისა და სერვისების შეყოვნება.

ტრადიციული თანამგზავრები მკაცრად ადაპტირებული სისტემებია. საბორტო რესურსები შექმნილია კონკრეტული აპლიკაციებისთვის და ფუნქციონალობა არ შეიძლება შეიცვალოს მათი სავარაუდო სიცოცხლის განმავლობაში, რაც ართულებს მათზე პერიფერიული გამოთვლების ჩატარებას. ლიტერატურაში შემოთავაზებული ინტელექტუალური თანამგზავრი, სახელწოდებით iSat, რომელიც შესაფერისია თანამგზავრული პერიფერიული გამოთვლებისთვის. iSat არის მრავალფუნქციური თანამგზავრების კლასი, მძლავრი სტანდარტიზებული აპარატურული პლატფორმით და მტყუნებების მიმართ მდგრადობის გაფართოებადი თანამგზავრული ოპერაციული სისტემით. მას შეუძლია სხვადასხვა აპლიკაციების ჩამოტვირთვა და მოთხოვნის შემთხვევაში საბორტო რესურსების გაზიარება სხვა თანამგზავრებთან, რაც უზრუნველყოფს უფრო საიმედო და მოქნილ პერსონალიზებულ კოსმოსურ სერვისს.

მაშინაც კი, თუ პერიფერიული გამოთვლის და ღრუბლოვანი პარადიგმების ერთობლივმა გამოყენებამ შეიძლება შეამციროს შეყოვნება და დააჩქაროს გამოთვლა, ეს გამოსავალი შეიძლება არ იყოს საკმარისი ზოგიერთ სცენარში. მაგალითად, საყოველადგილოდ გავრცელებულმა და მონაცემთა მაღალი სიჩქარის მქონე სენსორებმა, რომლებიც მოიცავს დიდ გეოგრაფიულ არეალს, შეიძლება წარმოქმნან მონაცემთა დიდი მოცულობები, რომელთა მიწოდება შეუძლებელია, თუ არ არის პროპორციულად გაზრდილი გამტარუნარიანობა სენსორებიდან მონაცემთა ცენტრებამდე. მაგალითად, ასეთი შემთხვევაა ნანო-თანამგზავრული თანავარსკვლავედები აღჭურვილი მონაცემთა მაღალსიჩქარიანი კამერებით, სადაც მონაცემთა დამუშავება ხორციელდება მიწისპირა სადგურის მიერ ცენტრალიზებული წესით. მიწისპირა სადგურის მდებარეობა და ორბიტის პარამეტრები ზღუდავს ლინკის ხელმისაწვდომობას, რაც ართულებს მონაცემთა გადაცემის სიჩქარის ეფექტიანად მასშტაბირებას. უფრო მეტიც, წყვეტის შემცველი და ხშირად არასანდო ლინკები ზრდიან შეყოვნებას მონაცემთა შეგროვებასა და დამუშავებას შორის, რაც მოითხოვს ორბიტულ მონაცემთა ბუფერებს. OEC შეიძლება იყოს ეფექტიანი ალტერნატივა ამ სცენარში. ლიტერატურაში შემოთავაზებულია მცირე, იაფფასიანი თანამგზავრების აღჭურვა სენსორებითა და მონაცემთა დამუშავების დახვეწილი აპარატურით, რათა მინიატურულ CubeSat

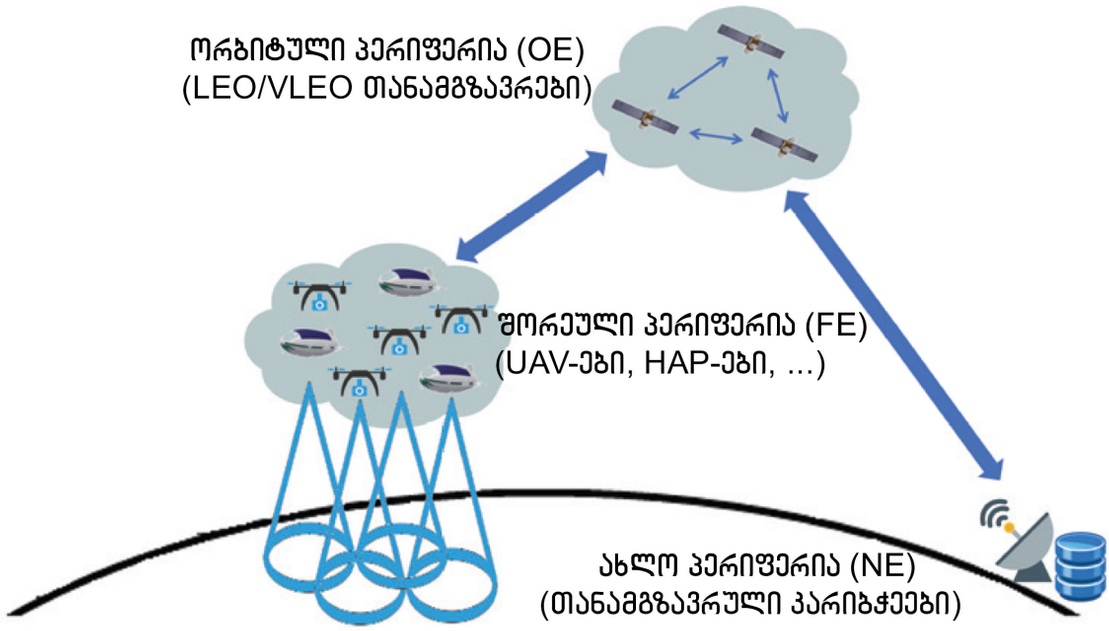
თანავარსკვლავედს შეეძლოს შეასრულოს მონაცემთა ანალიზის ამოცანები და უზრუნველყოს მახასიათებლების ანალიზი მოცულობის, მასის, ენერგიის შენახვის, სიმძლავრის, ღირებულების თვალსაზრისით. ასევე შესაძ-ლებელი უნდა იყოს ღრმა სწავლებაზე დაფუძნებული გამოთვლითი მახასიათებლების მიღება გამოსახულების კომპლექსური დამუშავების მხარდასაჭერად. ლიტერატურაში ასევე განხილულია OEC-ის მიზანშეწონილობა და მასთან დაკავშირებული გამოწვევები ორბიტაზე გამოთვლითი სერვისების განლაგების, ექსპლუატაციისა და მხარდაჭერის მიზნით. დაწყებული საცნობარო პერიფერიული აღჭურვილობიდან, ასევე შეფასებული იქნა მასიური სერვერის დაყენების მიზანშეწონილობა თანამგზავრზე წონისა და მოცულობის უმნიშვნელო ზრდით.

ამ თავს ვიწყებთ ლიტერატურაში მოცემული ნაშრომების განხილვით და წარმოვადგენთ ორბიტული გამოთვლის განტვირთვის სტრატეგიის მიმოხილვას ორბიტაზე გამოთვლისთვის მარტივი დაგეგმვის მეთოდების წინასწარი შედარებით, რათა გამოვყოთ მოგების ზღვარი, რომლის მიღწევაც შესაძლებელია განტვირთვის პოლიტიკით. ამით იხსნება გზა მომავალი, უფრო მოწინავე და რთული მეთოდების გამოყენებისკენ. შემო-თავაზებული შედარება შესრულებულია თანავარსკვლავედის სხვადასხვა ზომებისთვის და Starlink მოცემულია, როგორც საცნობარო მაგალითი. განიხილება მარტივი და ეფექტიანი გამოთვლითი პლატფორმა, რომელიც, ძირითადად, ადაპტირებულია ML გამოთვლითი ამოცანებისთვის.

3.3. საცნობარო სცენარი

სავარაუდო სცენარი ნაჩვენებია ნახ. 3.1-ზე და აღწერს შიდაქსელური გამოთვლითი არქიტექტურის იმპლე-მენტაციას, რომელიც დაკავშირებულია NTN-თან. ძირითადი ქსელის პერსპექტივიდან გამომდინარე იგი შედგება სამი ძირითადი გამოთვლითი და საკომუნიკაციო ერთეულისგან:

- ავტონომიური სატრანსპორტო საშუალებები (AV), როგორიცაა სახმელეთო, საზღვაო და საჰაერო მოძრავი საშუალებები, აღჭურვილი სხვადასხვა სახის სენსორებით, როგორიცაა ინერციული საზომი ერთეულები (IMU) და კამერები, რომლებიც წარმოადგენენ FE-ს;
- LEO თანამგზავრები ან დედამიწის ძალიან დაბალი ორბიტის (VLEO) თანამგზავრები, აღჭურვილი როგორც საკომუნიკაციო სასარგებლო დატვირთვით, ასევე გამოთვლითი ბლოკით, მაგრამ შეზღუდული დამუშავების შესაძლებლობით, რაც წარმოადგენს OE-ს;



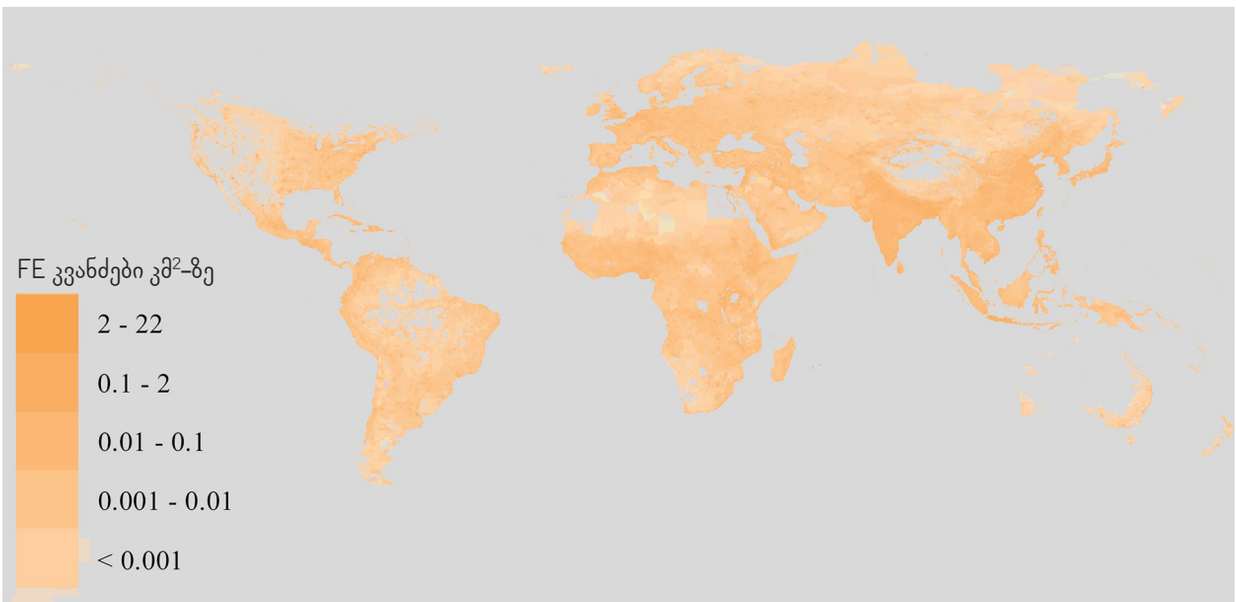
ნახ. 3.1. საცნობარო სცენარი OE არქიტექტურის განხილული განხორციელებით

- თანამგზავრული კარიბჭეების ნაკრები უზრუნველყოფს წვდომას მონაცემთა ცენტრების მკვრივ სერვერებზე, რომლებსაც შეუძლიათ ინტენსიური დამუშავება და შენახვა, რაც წარმოადგენს NE-ს. ეს ობიექტი არ არის მისადაგებული ორბიტაზე არსებულ გამოთვლებთან და მხოლოდ უზრუნველყოფს დაკავშირებას და გამოთვლის უწყვეტობას OE-დან ღრუბლოვან მონაცემთა ცენტრებამდე.

უახლესი ტენდენციების შესაბამისად, რომელიც განაპირობებს LEO თანამგზავრების მეგათანავარსკვლავედების განლაგებას, ასეთი დიდი რაოდენობის თანამგზავრების და კომუნიკაციისა და გამოთვლითი ამოცანების დაგეგმვის სირთულე გამორჩეულია. ასეთ სცენარში, თითოეული FE კვანძი შეიძლება ხელმისაწვდომი იყოს შეზღუდული რაოდენობის LEO თანამგზავრებისთვის ერთდროულად. FE კვანძებსა და LEO თანამგზავრებს შორის მაღალი ფარდობითი სიჩქარის გათვალისწინებით, თანამგზავრების ეს ნაკრები დროთა განმავლობაში დინამიურად იცვლება.

შეფასებული იქნა შესაძლო დატვირთვა, რომელიც თანამგზავრებს შეუძლიათ მიიღონ თანამგზავრული დაფარვის თითოეულ ზონაში მდებარე FE კვანძების რაოდენობის მიხედვით, რათა გამოკვეთილი ყოფილიყო თანამგზავრული რესურსების ტიპური დაბალი გამოყენება დროის უმეტესი ნაწილისთვის. შედეგები მიღებულ იქნა C++-ზე დაფუძნებული სიმულატორით, სადაც თანამგზავრული პოზიციები გამოითვლება გამარტივებული ზოგადი პერტურბაციის SGP4 მოდელის მიხედვით. 100 000 FE კვანძი იქნა განხილული და განაწილებული მთელ მსოფლიოში, რაც დაკავშირებულია მსოფლიო მოსახლეობის ამჟამინდელ მონაცემთა ბაზასთან. FE და OE კვანძებს შორის 40° მინიმალური დახრილობის კუთხე გამოიყენებოდა იმის გადასაწყვეტად, თუ როდის გახდებოდა ხილვადი FE-OE კვანძების წყვილი.

ნახ. 3.2 გვიჩვენებს FE კვანძების განაწილებას: რაც უფრო დიდია რადიუსი, მით მეტია კვანძების სიმკვრივე, რომელიც ეფუძნება მომხმარებლების სიმკვრივეს მსოფლიო რუკაზე. ეს მაჩვენებელი იძლევა ხარისხობრივ ხედვას იმის შესახებ, თუ როგორ შეიძლება გავლენა იქონიოს თანამგზავრებზე FE მონაცემთა ტრაფიკმა. ნახ. 3.2-დან შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ თანამგზავრების სულ მცირე 70% გამოუყენებელია ან ნაკლებად გამოიყენება ისეთი დიდი ტერიტორიების არსებობის გამო, სადაც მომხმარებლები არ არიან ან მათი მცირე რაოდენობაა. მთელი დროის განმავლობაში, როდესაც თანამგზავრები არ მოძრაობენ FE კვანძების ზემოთ, მათი გამოთვლითი შესაძლებლობები პირდაპირ არ არის გამოყენებული. პირიქით, როდესაც ისინი გადადიან ხალხმრავალი ტერიტორიების ზემოთ, მათი შესაძლებლობები მძიმედ არის დატვირთული და შეიძლება არასაკმარისი აღმოჩნდეს ყველა მოთხოვნის დასაკმაყოფილებლად. აღნიშნული გარემოება აიძულებს OE კვანძებს, თავის



ნახ. 3.2. ტერიტორიები, სადაც თანამგზავრები აქტიური იქნება საბაზისო FE კვანძების მიხედვით კვადრატულ კილომეტრზე (სულ 100 000 FE კვანძი)

მხრივ, განტვირთონ ამოცანები ღრუბლის მიმართულებით NE კვანძების მეშვეობით. რესურსების ასეთი ხარჯვა შესწავლილია ლიტერატურაში, სადაც ავტორებმა წარმოადგინეს Starlink ტოპოლოგიით დაფარვის სურათი. დამტკიცებულია, რომ დავალების განტვირთვა მეზობელ თანამგზავრებს შორის შესაძლებელია და იწვევს უკეთეს ექსპლუატაციას და ყველა ამოცანის უფრო ერთგვაროვან განაწილებას OE-ებს შორის.

3.4. განტვირთვის სტრატეგია და მახასიათებლების შეფასება

ქსელის მიმდინარე სტატუსის შესახებ არსებული ინფორმაციის გამოყენება და უახლოეს მომავალში მისი ევოლუციის შესაძლო შეფასებები შეიძლება დაეხმაროს განტვირთვის ამოცანის პროცესს მთლიანი ხელმისაწვდომი განაწილებული რესურსების უკეთ გამოყენებაში. ეს ასპექტი არის უპირველესი მნიშვნელობის საკითხი, განსაკუთრებით მაშინ, როდესაც თანამგზავრთა თანავარსკვლავედის ზომა იზრდება და მხარდაჭერილი მომხმარებლების დაგეგმილი მაქსიმალური რაოდენობა დიდია.

ამის შესაფასებლად, ჩვენ განვიხილავთ ოთხ სცენარს LEO თანამგზავრების თანავარსკვლავედების სხვადასხვა ქსელებისთვის:

1. 66 თანამგზავრი თანაბრადაა განლაგებული 6 წრიულ ორბიტაზე, თითო 11 თანამგზავრით. ზღვის დონიდან თანამგზავრის სიმაღლეა 781 კმ, ორბიტული სიბრტყის დახრილობაა 86°;

2. 180 თანამგზავრი თანაბრადაა განლაგებული 18 წრიულ ორბიტაზე, თითო 10 თანამგზავრით. ზღვის დონიდან თანამგზავრის სიმაღლეა 1000 კმ, ორბიტული სიბრტყის დახრილობაა 86°;

3. 360 თანამგზავრი თანაბრადაა განლაგებული 18 წრიულ ორბიტაზე, თითო 20 თანამგზავრით. ზღვის დონიდან თანამგზავრის სიმაღლეა 1000 კმ, ორბიტული სიბრტყის დახრილობაა 86°;

4. 1584 თანამგზავრი თანაბრადაა განლაგებული 72 წრიულ ორბიტაზე, თითო 22 თანამგზავრით. ზღვის დონიდან თანამგზავრის სიმაღლეა 550 კმ, ორბიტული სიბრტყის დახრილობაა 53°.

პირველი სცენარის თანავარსკვლავედი შეიცავს იმავე რაოდენობის თანამგზავრებს და ორბიტულ პარა-მეტრებს, როგორსაც Iridium-ის თანავარსკვლავედი. ეს არჩევანი მიზნად ისახავს შეაფასოს ტრადიციული თანამგზავრული თანავარსკვლავედების შესაძლო მიღწევადი მახასიათებლები, თუ ისინი აღჭურვილი იქნებიან ქსელში გამოთვლითი შესაძლებლობებით. მეორე მხრივ, მე-4 სცენარის თანავარსკვლავედი წარმოდგენილია თანამგზავრების და ორბიტული პარამეტრების იმავე დაგეგმილი რაოდენობის მიხედვით, როგორც Starlink-ის პირველი ფაზის თანავარსკვლავედი, და ეს წარმოადგენს უახლოესი მომავლის თანავარსკვლავედების რეალურ მაგალითს. ორივე დარჩენილ სცენარს, მე-2-ს და მე-3-ს, აქვს თანამგზავრების და ორბიტული სიბრტყეების რაოდენობა 1-ელ და მე-4 სცენარებს შორის და ეს გაკეთებულია შუალედური კონფიგურაციების შესასწავლად.

თითოეულ ამ სცენარში, FE კვანძების მაგენერირებელი ამოცანები განიხილება თანამგზავრების რაოდენობის პროპორციულად და განაწილებულია მთელი მსოფლიოს მიხედვით ნახ. 3.2-ზე ნაჩვენები განაწილების შესახებ ინფორმაციის შესაბამისად.

დავალების განტვირთვის პროცესისთვის ჩვენ განვიხილავთ განტვირთვის სამ განსხვავებულ სტრატეგიას:

- მრგვალი რობინი (RR): RR-ის, ანუ ციკლური გადარჩევის პროცედურის დროს, თანამგზავრები განტვირთავენ ამოცანებს, რომლებსაც უშუალოდ იღებენ FE კვანძებიდან, ერთ-ერთ მეზობელ თანამგზავრზე, რომელიც იმყოფება ერთი ნახტომის (გადასასვლელის) მანძილზე. განტვირთვის პროცედურები ხორციელდება მხოლოდ მაშინ, როდესაც თანამგზავრი მიღებულ ამოცანას დამოუკიდებლად ვერ ამუშავებს, რადგან მას არ აქვს საკმარისი ხელმისაწვდომი რესურსები;
- სრული განტვირთვა (FO): თანამგზავრები ყოველთვის განტვირთავენ FE კვანძებიდან უშუალოდ მიღებულ ამოცანებს ოთხი მეზობელი თანამგზავრიდან ერთ-ერთზე, ერთი ნახტომის მანძილზე, მარტივი RR მეთოდის შესაბამისად. განტვირთვა ხდება მაშინაც კი, როდესაც თანამგზავრებს, რომლებიც უშუალოდ იღებენ ამოცანებს FE კვანძებიდან, აქვთ საკმარისი ხელმისაწვდომი რესურსები;
- ბუნდოვანი ლოგიკა (Fuzzy Logic): თანამგზავრები განტვირთავენ ამოცანებს, რომლებსაც უშუალოდ იღებენ FE კვანძებიდან, ოთხი მეზობელი თანამგზავრიდან ერთ-ერთზე, რომელიც

იმყოფება ერთი ნახტომის მანძილზე და ეს ხდება ბუნდოვან ლოგიკაზე დაფუძნებული პოლიტიკის შესაბამისად. განტვირთვა ხორციელდება ბუნდოვანი ლოგიკის მითითებების შესაბამისად, რომლებიც დაკავშირებულია ქსელის ამჟამინდელ სტატუსთან და მის სავარაუდო ევოლუციასთან.

ბუნდოვანი ლოგიკის გამოყენება წარმოადგენს პირველ ნაბიჯს ქსელის ცოდნის გამოსაყენებლად სხვადასხვა პარამეტრის მიხედვით. სიღრმისეული დეტალების წარმოდგენის გარეშე, ბუნდოვან ლოგიკაზე დაფუძნებული განტვირთვის სტრატეგიით ჩვენ განვიხილავთ ინფორმაციის გამოყენებას თანამგზავრის საერთო და ამჟამად ხელმისაწვდომი რესურსების შესახებ, რათა შევაფასოთ თითოეული ამოცანის მიწოდების შეყოვნება, განტვირთვის ყველა შესაძლო არჩევანის გათვალისწინებით. ეს ინფორმაცია შეიცავს დროის მოცემულ მომენტში ხელმისაწვდომ მონაცემებს ცენტრალური მმართველი ბლოკის (CPU) გამოთვლის, შემნახველი მეხსიერების და ენერგიის მოხმარების შესახებ თითოეული შერჩეული თანამგზავრისთვის და ამ ცვლადების ევოლუციის შეფასებას უახლოესი მომავალისთვის. შემდგომი გამომავალი ბუნდოვანი ცვლადები მიუთითებს, თუ ოთხ მეზობელს შორის რომელი მათგანი (ერთ ნახტომზე მყოფი თანამგზავრიდან) არის ყველაზე შესაფერისი მინიმალური შეყოვნების გარანტირებისთვის (ანუ შეძლებს დავალების დამუშავებას სხვა თანამგზავრებზე ადრე და ექნება საკმარისი რესურსი, ამოცანის დამუშავებისთვის განსაზღვრულ დროში).

მახასიათებლების ანალიზი ეფუძნება ოთხ სცენარს სამი ტიპის განტვირთვის გადაწყვეტილებით, რომლებიც ზემოთ იყო აღწერილი, სადაც FE კვანძების რაოდენობა, რომლებიც აგენერირებენ ამოცანებს, თანამგზავრების რაოდენობის პროპორციულია და განაწილებულია მთელი მსოფლიოს მიხედვით, ნახ. 3.2-ზე ნაჩვენები განაწილების ინფორმაციის შესაბამისად. თანამგზავრების მხოლოდ 30 პროცენტი აგროვებს ამოცანებს შესაბამისი FE კვანძებიდან, ხოლო დანარჩენი 70 პროცენტი რჩება ხელმისაწვდომი იმ ამოცანების გამოსათვლელად, რომლებიც საბოლოოდ მიიღება ერთი ნახტომის მანძილზე მყოფი ოთხი მეზობელი თანამგზავრიდან თანამგზავრთაშორისი ლინკების მეშვეობით. თითოეული FE წყაროს კვანძი წარმოქმნის ამოცანებს პუასონის განაწილების შესაბამისად სხვადასხვა λ_i პარამეტრით სამი განხილული აპლიკაციიდან (APP_i, $i=1,2,3$). სიმულაციური დიზაინის პარამეტრები ნაჩვენებია ცხრილში 3.1. აღვნიშნავთ, რომ გამოთვლითი რესურსები ერთნაირია თითოეული თანამგზავრისთვის ყველა სცენარში.

პარამეტრი	APP1	APP2	APP3
შემავალი დავალების მოცულობა [მეგაბაიტი]	10	20	5
გამომავალი დავალების მოცულობა [მეგაბაიტი]	1	2	0.5
პუასონის განაწილება λ	1	2	0.5
ოპერაციები დავალებაზე [მილიონი]	50,000	100,000	25,000
თანამგზავრებს შორის მონაცემების გადაცემის მაქსიმალური სიჩქარე [გბიტი/წმ]	1		
CPU-ის ტევადობა [მილიონი ბრძანება წამში]	50,000		
ბირთვების რაოდენობა თითო CPU-ზე	8		
შენახვის მოცულობა [ტერაბაიტი]	1		
ბატარეის ტევადობა [ვატი/სთ]	20		
სცენარის მიხედვით FE კვანძების რაოდენობა	(300, 818, 1636, 7200)		
კომპიუტერული სიმულაციის ხანგრძლივობა [სთ]	1		

ცხრილი 3.1. კონფიგურირებული სიმულაციური პარამეტრები

იმისათვის, რომ სწორად ვაჩვენოთ როგორც მომხმარებლისთვის გარანტირებული QoS, ასევე ქსელური რესურსების მოხმარება, ჩვენ განვიხილავთ შემდეგ სამ მეტრიკას:

- შეყოვნება: საშუალო დრო ამოცანის გენერირებასა და დამუშავების შედეგის მიღებას შორის ამოცანის შემქმნელი კვანძის მიერ;
- CPU–ის გამოყენება: თანამგზავრების CPU–ის საშუალო გამოყენება, რომლებიც იღებენ დავალებებს დასამუშავებლად უშუალოდ FE კვანძებიდან;
- მონაცემთა გადაცემის სიჩქარე: თანამგზავრთაშორისი ლინკების მონაცემთა გადაცემის საშუალო სიჩქარე, როგორც დამუშავების ამოცანის, ასევე დამუშავების შემდგომ მიღებული შედეგების გათვალისწინებით.

ასეთი მეტრიკები არჩეულია მარტივი და ეფექტიანი, აპარატურული უზრუნველყოფის კუთხით შეზღუდული აპარატურისთვის, რომელებიც უკვე გამოიყენება გამოთვლითი ამოცანების შესასრულებლად, მაგალითად, უპილოტო საფრენი აპარატებისთვის (UAV) და მაღალი სიმაღლის პლატფორმებისთვის (HAP). ჩატარებული კვლევის მიზანი არ ყოფილა კონკრეტული აპარატურული უზრუნველყოფისთვის მახასიათებლების ზუსტი მეტრიკის შემუშავება. ის მიზნად ისახავდა ეჩვენებინა მასობრივი ბაზრის აპარატურაზე გამოთვლების განტვირთვის კონცეფცია, რომელიც შეიძლება დანახარჯების გარეშე ჩაშენდეს თანამგზავრის ბორტზე.

ტესტები ჩატარდა სპეციალური Sat-Edge-Sim პროგრამული უზრუნველყოფის გამოყენებით, რომელიც შემუშავებულია თანამგზავრული პერიფერიების გამოთვლითი გარემოს მოდელირებისთვის და სიმულაციისთვის. მახასიათებლების შეფასების შედეგები, რომლებიც მიღწეულია სხვადასხვა გამოყენებისთვის (APP) და თანავარსკვლავედში სხვადასხვა რაოდენობის თანამგზავრებისთვის, მოცემულია ცხრილში 3.2.

თანა-ვარსკვლავედი	მიდგომა	შეყოვნება [წმ]			CPU-ის გამოყენება [%]			მონაცემთა გადაცემის სიჩქარე [მბიტი/წმ]		
		APP1	APP2	APP3	APP1	APP2	APP3	APP1	APP2	APP3
66	RR	9.3	11.04	7.64	52.36	64	43.68	265	290	221
	FO	7.6	9.58	5.64	40.73	48.24	26.46	331	362	276
	FU	4.53	5.43	4.69	34.17	38.21	17.65	277	290	245
180	RR	9.51	11.51	7.89	53.25	65.48	44.29	263	292	219
	FO	8.2	10.01	5.77	40.9	49.93	27.16	329	365	274
	FU	4.84	5.68	4.73	34.34	40.5	17.95	277	312	253
360	RR	9.68	12.5	8.24	53.46	67	45.21	267	288	220
	FO	8.47	10.31	5.93	41.89	51.45	27.69	334	360	275
	FU	5.12	6.04	4.92	33.69	42.54	18.11	283	308	247
1584	RR	9.86	12.7	8.45	54.69	68.16	46.23	269	286	220
	FO	8.73	10.64	6.03	42.02	53.09	28.37	336	358	275
	FU	5.36	6.25	5.06	33.94	43.87	18.23	286	309	252

ცხრილი 3.2. მიღებული რიცხვითი შედეგები

3.5. მესამე თავის დასკვნა და არსებული გამოწვევები

ცხრილში 3.2 წარმოდგენილი შედეგები აჩვენებს, რომ მეთოდიკას, რომელიც დაფუძნებულია ოპტიმიზაციურ ლოგიკაზე, როგორიცაა ბუნდოვანი ლოგიკა, მარტივ დეტერმინირებულ ლოგიკასთან შედარებით, როგორიცაა RR, შეუძლია გააუმჯობესოს LEO თანამგზავრების მეგათანავარსკვლავედის ქსელის ეფექტიანობა ამ თავში განხილული სამი მეტრიკის კუთხით. მაგრამ ეს გაუმჯობესება უფრო აშკარაა, თუ გადავხედავთ შეყოვნების მეტრიკას თანავარსკვლავედში თანამგზავრების სხვადასხვა რაოდენობისთვის. განხილულ ბუნდოვან ლოგიკაზე დაფუძნებულ ოპტიმიზაციას შეუძლია შეამციროს შეყოვნება APP1-ისთვის 38-დან 51%-მდე, APP2-ისთვის 41-დან 51%-მდე და APP3-ისთვის 16-დან 40%-მდე. ცხრილი 3.2-დან შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ მენეჯმენტის ასეთმა პოლიტიკამ შეიძლება მნიშვნელოვნად შეამციროს დავალების დამუშავების შეყოვნება. მაშინაც კი, თუ ამის ზუსტად განსაზღვრა ადვილი არ არის, LEO თანამგზავრული ქსელის როგორც ტოპოლოგიის, ისე მისი ლინკების მდგომარეობის დინამიზმიდან გამომდინარე, სწორი მმართველი პოლიტიკის შემუშავებით, როგორც ამოცანების განტვირთვის, ისე დატვირთვის გამოთვლის რეგულირებისთვის, ჩვენ შეგვიძლია მივაღწიოთ შეყოვნების მინიმიზაციას.

განაწილებულ პლატფორმაზე გამოთვლების გადანაწილების გაუმჯობესებამ შეიძლება უზრუნველყოს როგორც თანამგზავრების გაშვების მნიშვნელოვანი შემცირება, ასევე სახმელეთო რესურსებზე დაბალი გამოთვლითი დატვირთვის მიღწევა. ეს ასევე გავლენას მოახდენს ეკონომიკურ მხარეზე, რომელიც დაკავ-შირებულია პერიფერიული გამოთვლითი ფუნქციებით აღჭურვილი თანამგზავრების თანავარსკვლავედის განლაგებასთან. თანამგზავრების აგება და გაშვება უფრო და უფრო იაფდება ელექტრონიკის მინიატურიზაციის წყალობით, რაც მწარმოებლებს საშუალებას აძლევს შექმნან ობიექტები იმავე, ან კიდევ უფრო მეტი ხელ-მისაწვდომი რესურსებით, ვიდრე იყო ადრე, მაგრამ გაცილებით უფრო მცირე წონით. თანამგზავრების ნაკლები რაოდენობის განლაგება და მომსახურების იგივე ხარისხის გარანტია არის თანხების დაზოგვის კიდევ ერთი ფაქტორი და ასევე გადამწყვეტია მდგრადობის თვალსაზრისით. AI-ზე დაფუძნებული ეფექტიანი მეთოდების მნიშვნელობა ძირითადად მდგომარეობს იმაში, რომ საშუალებას მისცემს ამ რესურსებით შეზღუდულ მოწყობილობებს ითანამშრომლონ ერთმანეთთან და ტერესტრიალურ კარიბჭეებთან, რათა უზრუნველყონ მომსახურების მაღალი ხარისხი და ეფექტიანობა მომხმარებელთა მოსალოდნელი მზარდი რაოდენობისთვის.

მიღებული შედეგი ხელს უწყობს ასეთი აპლიკაციის სცენარში სხვა სტოქასტური ან სწავლებაზე დაფუძნებული მეთოდების შემოტანას, როგორიცაა, მაგალითად, ღრმა განმტკიცებული სწავლება. ამ თავში წარმოდგენილი შედეგები შეიძლება განხილული იყოს როგორც საცნობარო საბაზისო მიმართულება. გარდა ამისა, დამატებითი მიზნობრივი ფუნქციების გათვალისწინება შესაძლებელია სერვისის შემდგომი ოპტიმიზაციისთვის და კოსმო-სური საინფორმაციო ქსელის სხვადასხვა ფენებმა შეიძლება გადაანაწილონ გამოთვლითი ამოცანები, რათა კიდევ უფრო გააუმჯობესდეს სერვისის მახასიათებლები ქსელების ხელმისაწვდომი რესურსების უფრო ფართო ნაკრების გამოყენებით და კვანძებს შორის ურთიერთკავშირის გათვალისწინებით.

თავი 4 წრიულგზიანი ქსელები: წვდომა ყველასათვის

4.1. შესავალი

არსებული ფორმით ციფრული კავშირის გაფართოება ემსახურება უნივერსალური უწყვეტი კავშირის მიზანს. მართლაც, ძირითადი ინტერნეტსერვისი სატელეფონო ზარის გაკეთებას უფრო ჰგავს, ვიდრე წერილის გაგზავნას: კლიენტი ელის სერვერისგან დაუყოვნებლივ რეაგირებას. ჩვენ ვფიქრობთ, რომ გლობალური მასშტაბით ამ მიზნის მომგებიანად მიღწევის სირთულე არის მთავარი მიზეზი იმისა, რომ მილიარდობით ადამიანი მთელ მსოფლიოში არ არის დაკავშირებული ან არასაკმარისადაა დაკავშირებული. მეორე მხრივ, თუ გადავალთ ტერესტრიალური კომუნიკაციის საზღვრებს მიღმა, მთვარის ახლო სივრცეში და მის ფარგლებს გარეთ, სინათლის გავრცელების სიჩქარის შეზღუდვისა და პლანეტარული ოკლუზიის გამო, უწყვეტი კავშირი ასეთ პირობებში არაპრაქტიკული ან შეუძლებელი გახდება, თუნდაც საუკეთესო ტექნოლოგიებით.

ამ თავის იდეა ისაა, რომ შეყოვნებისადმი ტოლერანტული ქსელის (DTN) ტექნოლოგიების შემუშავებით, რომელიც საჭიროა მზის სისტემის ინტერნეტის შესაქმნელად, ჩვენ გვეძლევა საშუალება შევამციროთ უთანასწორობა სწორედ აქ, ჩვენს პლანეტაზე, შორეული ადგილების დაკავშირებით, სადაც ინტერნეტის ინფრა-სტრუქტურის განთავსება ეკონომიკურად (ან ტექნიკურად) შეუძლებელია.

ამ ხედვიდან გამომდინარე ძირითადი სტრუქტურა ჩამოყალიბებულია წრიულგზიანი ქსელის (RRN) კონცეფციაში. RRN-ში LEO თანამგზავრები მოქმედებენ როგორც „მონაცემთა ჯორები", რათა მიიღონ, გადაი-ტანონ და მიაწოდონ მონაცემები იმ ადგილებში, სადაც ინტერნეტთან კავშირი არ არის. ამ კონცეფციის მთავარი უპირატესობა ის არის, რომ მისი დანერგვა შესაძლებელია DTN პროტოკოლებით და იაფფასიანი ნანო-თანამგზავრებით, როგორიცაა, მაგალითად CubeSat-ები. მისი შეყოვნებისადმი ტოლერანტული ბუნების გამო, ერთ ნანო-თანამგზავრსაც კი შეუძლია უზრუნველყოს გლობალური მასშტაბით დაკავშირების სერვისები ოღონდ მაღალი შეყოვნებით. მეტი ასეთი თანამგზავრის დამატება შეამცირებს გამჭოლ (end-to-end) შეყოვნებას და გაზრდის სისტემის მთლიან გამტარუნარიანობას. ამრიგად, ოპერატიული RRN საშუალებას მისცემს ამჟამად გათიშულ მომხმარებლებს აწარმოონ ინტერნეტში ვიკიპედიის ძიება, მიიღონ დისტანციური სამედიცინო დახმარება და მოინახულონ გლობალური ბაზრის მაღაზიები, სხვა მრავალ სერვისთან ერთად, რომელსაც ჩვენ შევეჩვიეთ ურბანულ გარემოში. ერთადერთი განსხვავება ისაა, რომ პასუხები და გამოხმაურება შეიძლება მოვიდეს მოთხოვნის გაცემიდან რამდენიმე წუთში ან უფრო მეტი დროის განმავლობაში.

ამ თავში ჩვენ წარმოვადგენთ RRN-ების საფუძვლებს და დამხმარე კვლევებს. შემდეგ ჩვენ გამოვიყენებთ კომპიუტერული სიმულაციების შედეგებს RRN-ების მოსალოდნელი მახასიათებლების შესაფასებლად. ჩვენ მიერ განხილული ღია კოდის DTN პროტოკოლის იმპლემენტაცია, სახელად μD3TN, დაინერგა და შეფასდა RRN კონცეფციის პირველ ორბიტულ ექსპერიმენტში, ევროპის კოსმოსური სააგენტოს (ESA) OPS-SAT თანამგზავრის გამოყენებით. ამის შემდეგ, ჩვენ მოკლედ განვიხილავთ აპლიკაციების კატეგორიებს, რომლებიც შესაფერისია RRN-ების საშუალებით კომუნიკაციისთვის და მათაც, რომლების არ არის შესაფერისი. დაბოლოს, ჩვენ განვიხილავთ RRN არქიტექტურის უპირატესობებს და RRN სერვისების ინტეგრაციას ინტერნეტსერვისებთან, რომლებიც უზრუნველყოფილი იქნება ამჟამად მშენებარე დიდი LEO თანამგზავრული თანავარსკვლავედებით.

4.2. CubSat-ები LEO-ში და შეყოვნების მიმართ ტოლერანტული ქსელები

CubeSat-ები არის სტანდარტიზებული ნანო-თანამგზავრები, რომლებიც თავდაპირველად შეიქმნა სასწავ-ლო მიზნებისთვის. ისინი შემუშავდა ისეთ გარემოში, სადაც ისტორიულად ყოველი ახალი კოსმოსური მისია მოი-თხოვდა კოსმოსური და მიწისპირა სისტემების ხელახალ ინჟინერიას. CubeSat-ის სტანდარტის უპირატესობების გამო ნანო-თანამგზავრების განლაგების საერთო პლატფორმის უზრუნველსაყოფად, მან ფართო აღიარება

მოიპოვა. ჩვეულებრივ გამოიყენება სხვადასხვა ფორმა-ფაქტორები, იმ ბლოკების რაოდენობის მიხედვით, რომლებიდანაც ისინი შედგება. ამასთან CubeSat-ის ერთ ბლოკს (1U) შეიძლება ჰქონდეს მაქსიმალური წონა 1.33 კგ და ზომები 10×10×11.35 სმ. მაგალითად, 3U, 6U და 12U CubeSat პლატფორმები ამჟამად პოპულარულია ინდუსტრიაში. გარდა ამისა, მზა კომერციული კომპონენტები და CubeSat-ების გაშვების შესაძლებლობები ადვილად ხელმისაწვდომია. როდესაც განლაგებულია LEO-ში, CubeSat ორბიტაზე 2000 კმ სიმაღლეზე ქვემოთ მოძრაობს და გადაადგილდება ტრაექტორიებზე, რომელთა ზუსტი პროგნოზირება შესაძლებელია. დაახლოებით 90 წუთიანი ორბიტული პერიოდით, LEO თანამგზავრი გამოჩნდება ერთ ჰორიზონტზე და ქრება მეორეზე, ჩვეულებრივ 10 წუთზე ნაკლებ დროში. გეოგრაფიული განედიდან გამომდინარე, ნებისმიერი LEO თანამგზავრი, როგორც წესი, ხილული იქნება მოცემული წერტილიდან დღეში ხუთჯერ ან ნაკლები რაოდენობით; ცხადია, რომ თანავარსკვლავედში თანამგზავრების რაოდენობის გაზრდა ზრდის გადაფრენის სიხშირეს ნებისმიერ ცალკეულ ადგილას.

DTN ავრცელებს ქსელის ფუნქციონირებას იმ გარემოს მიღმა, რომელშიც ინტერნეტი კარგად მუშაობს, პრობლემურ გარემომდე, სადაც, მაგალითად, სიგნალის გავრცელებისას ხანგრძლივი შეყოვნებებია, შემთხვევითი და წყვეტილი შეფერხებებია ან შეზღუდული საკომუნიკაციო რესურსებია. DTN-ები გამოიყენება მრავალი აპლიკაციისთვის, როგორიცაა საჰაერო, საავტომობილო და წყალქვეშა ქსელები. ვითარდება რა 2000-იანი წლების დასაწყისიდან, ისინი, DTN კვანძებს აძლევენ საშუალებას გაუმკლავდნენ შეყოვნებებსა და კომუნიკაციის შეფერხებებს. კომუნიკაციის გამჭოლ გზებთან გამკლავებისთვის, DTN-ის ძირითადი იდეაა განახორციელოს პაკეტების გადაცემა შენახვა-გადატანა-გადაგზავნის პრინციპით. ამრიგად, შუალედურ კვანძებს შეუძლიათ შეინახონ პაკეტები, სანამ ხელმისაწვდომი არ იქნება შემდეგი ნახტომის (hop) შესაბამისი კვანძი. DTN-ების ტოპოლოგიები არ შეიძლება იყოს წარმოდგენილი როგორც რეგულარული (სტატიკური) გრაფები; ამის ნაცვლად, ტოპოლოგიები აღწერილია დროში ცვალებადი გრაფების საშუალებით. ამ გრაფების გაჩენილი და გამქრალი შტოები შეიძლება შეფასდეს, როგორც ე. წ. კონტაქტები. კონტაქტი არის დროის პერიოდი, რომლის დროსაც ორ კვანძს შეუძლია მონაცემების ცალმხრივი ან ორმხრივი გადაცემა.

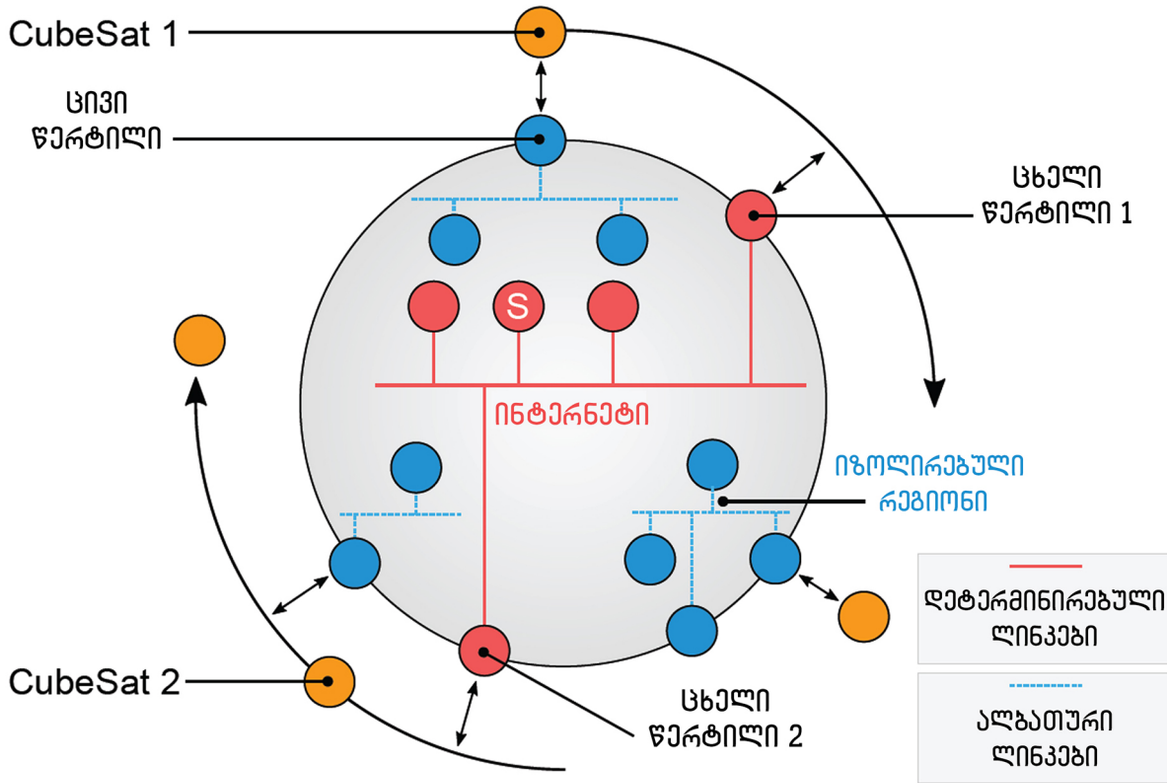
პაკეტის (შეკვრის) პროტოკოლი (Bundle Protocol), რომლის ვერსია 6 განსაზღვრულია RFC 5050-ში და ვერსია 7 (BPv7), რომელიც ამჟამად სტანდარტიზაციის პროცესშია, იყენებს DTN პრინციპებს გამოყოფილი „პაკეტის ფენის“ შემოღებით (განვმარტავთ, რომ RFC 5050 ეს არის სტანდარტიზაციის ოფიციალური დოკუმენტი, რომელიც შემუშავებულია ინტერნეტის საინჟინრო სამუშაო ჯგუფის (IETF) მიერ). პაკეტის ფენა მოქმედებს სხვადასხვა საბაზისო პროტოკოლის ზემოთ, რომლებიც თავიანთ მომსახურებას აწვდიან პაკეტის ფენას შიმ ფენის (shim layer) საშუალებით, რომელსაც ასევე ეწოდება კონვერგენციის ფენა და რომელიც წარმოადგენს ჰოსტზე (host) დაფუძნებული შეჭრის აღმოჩენისა და პრევენციის კოდის ფენას. შიმ ფენა განთავსებულია ჰოსტზე არსებულ კოდურ ფენებს შორის, ხელთ იგდებს მონაცემებს და აანალიზებს მათ. DTN კვანძი არ უზრუნველყოფს უწყვეტ, ბოლოების დამაკავშირებელ (გამჭოლ) კავშირს; ამის ნაცვლად, ის იყენებს მუდმივ შემნახველ მეხსიერებას წამების, წუთების ან დღეების ლოდინის პერიოდებში წამოჭრილი პრობლემების თავიდან ასაცილებლად, რომლის დროსაც ერთი ან მეტი ლინკი ბოლოების დამამაკავშირებელ გზაზე არ მუშაობს. რამდენიმე DTN პროტოკოლი, მათ შორის პაკეტის პროტოკოლი, ამჟამად განხილულია და დაზუსტებულია ინტერნეტის სტანდარტიზაციისთვის კოსმოსურ მონაცემთა სისტემების საკონსულტაციო კომიტეტში (CCSDS), კერძოდ, კოსმოსური კომუნიკაციების სტანდარტიზაციისთვის. აღვნიშნავთ, რომ DTN პროტოკოლები გამოიყენებოდა კოსმოსურ სივრცეში, მაგრამ აქამდე არასდროს გამოყენებულა RRN-ის კონტექსტში.

4.3. წრიულგზიანი ქსელები

RRN-ები შედგება იაფფასიანი LEO თანამგზავრებისგან. შეზღუდული განლაგებისა და მცირე ოპერაციული ხარჯების გამო, ისინი სავსებით შესაფერისია მოსახლეობის არაპრივილეგირებული ფენისათვის ინტერნეტით წვდომის უზრუნველსაყოფად, და, შესაძლოა, ასევე სხვა კლასის მომხმარებელთათვის მონაცემების იაფად

გადაცემის მიზნით. იმის გამო, რომ RRN-ში მონაცემები ტრანსპორტირდება LEO თანამგზავრების მიერ DTN პროტოკოლების გამოყენებით შენახვა-გადატანა-გადაგზავნის რეჟიმში, არსებობს დიდი შეყოვნებები გამჭოლი კომუნიკაციის პროცესში. 2008 წელს წარმოდგენილ, მცირე ზომის თანამგზავრებისა და DTN-ების გაერთიანების საწყის იდეაზე დაყრდნობით, ტექნოლოგიურმა და სამეცნიერო ლანდშაფტმა ამ კონტექსტში აჩვენა მნიშვნელოვანი წინსვლა, რაც ხელს შეუწყობს RRN-ის განლაგებას ამ ათწლეულის ბოლომდე. არსებული თანამგზავრული მისიებისგან განსხვავებით, რომლებიც მიზნად ისახავს მონაცემთა სასაუბრო, სინქრონული გაცვლის მხარდაჭერას, RRN მიზნად ისახავს საიმედო ეპისტოლარული მონაცემების გადაცემას. ის უზრუნველყოფს ასინქრონულ დაკავშირებას დედამიწაზე სხვაგვარად იზოლირებულ ქსელურ კვანძებთან (RRN-ის ტერმინოლოგიით „ცივი წერტილებთან“).

ვინაიდან RRN-ები შეიძლება აშენდეს ეტაპობრივად, დაწყებული ერთი თანამგზავრით (მაგალითად, განსხვავებით მეგათანავარსკვლავედებისგან, როგორიცაა Starlink, რომელიც დაფუძნებულია ათასობით, დაახლოებით 250 კგ წონის თანამგზავრზე), და რადგან ისინი არ საჭიროებენ უწყვეტ კავშირს თანამგზავრებს შორის, განთავსების ხარჯები ძალიან დაბალია. ეპიზოდური კონტაქტების დაშვებით, RRN-ები შეიძლება შეიცავდეს მხოლოდ ნადირზე (Nadir) მიმართულ CubeSat-ებს LEO-ებში (განვმარტავთ, რომ ნადირი არის მიმართულება, რომელიც ემთხვევა მოცემულ წერტილში მიზიდულობის ძალის მიმართულებას; ნადირის საპირისპირო მიმართულებას ზენიტი ეწოდება): თითოეული თანამგზავრი ინახავს ცივი წერტილებიდან შეგროვებულ ტრანზიტულ მონაცემებს საკუთარ ლოკალურ შესანახ საშუალებებში, და ელოდება „ცხელ წერტილზე“ გადაფრენებს. RRN ტერმინოლოგიის მიხედვით, ცხელი წერტილები არის მიწისპირა სადგურები ინტერნეტზე წვდომით, რომელთა მეშვეობითაც შესაძლებელია მონაცემების გაგზავნა და აპლიკაციის სერვერის მოთხოვნებზე პასუხის გაცემა (იხ. ნახ. 4.1). პასუხები ბრუნდება ცივ წერტილებზე, ჩვეულებრივ, სხვა თანამგზავრების მეშვეობით, წუთებში – ან თუნდაც საათებში.



ნახ. 4.1. RRN დიაგრამა. იზოლირებულ ცივ წერტილთან დაკავშირებულ კვანძებს შეუძლიათ პაკეტების გადაცემა CubeSat 1-ზე, რომელსაც გადააქვს მონაცემები მანამ, სანამ არ გადაფრინდება ცხელ წერტილზე 1. შემდეგ პაკეტს შეუძლია მიაღწიოს სერვერს (S) ინტერნეტში, რომელიც განსაზღვრავს, რომ დაბრუნების ოპტიმალური გზა არის ცხელი წერტილი 2-ის და CubeSat 2-ის მეშვეობით

RRN-იც კი, რომელიც შედგება ერთი LEO თანამგზავრისგან, საშუალებას მისცემს მომხმარებლებს განახორციელოს ინტერნეტში ძიება (მაგალითად, ვიკიპედიის), მიიღოს დისტანციური სამედიცინო დახმარება და მოინახულოს გლობალური ბაზრის მაღაზიები, ბევრ სხვა სერვისთან ერთად, რომელსაც ჩვენ შევეჩვიეთ ურბანულ გარემოში. ერთადერთი განსხვავება ისაა, რომ სპეციალიზებულ შეკითხვებზე პასუხებს შეიძლება დასჭირდეს წუთები ან საათები; თუმცა, იმ ინფორმაციის წყაროების წინასწარი გამოწერა, რომლებიც შეიძლება საინტერესო გახდეს მომავალში, შესაძლებელს გახდის მოთხოვნის დაკმაყოფილებას ადრე შენახული ინფორმაციის ლოკალური გამოკითხვით და ამგვარად გამოიღებს მყისიერ შედეგებს. უფრო მეტიც, თანავარსკვლავედში დამატებითი თანამგზავრების შემოყვანა გაზრდის ყველა ცივ და ცხელ წერტილზე გადაფრენის სიხშირეს; შესაბამისად, შემცირდება ორმხრივი მიმართულებით შეყოვნება და გაიზრდება სისტემის მთლიანი გამტარუნარიანობა. ჩვენ წარმოვადგენთ მახასიათებლების მოსალოდნელ რიცხვით შეფასებას სხვადასხვა კონფიგურაციის RRN თანამგზავრული დაჯგუფებებისთვის.

RRN კონცეფციის ერთ-ერთი მთავარი სამიზნე ბენეფიციარი არის კავშირს მოკლებული მოსახლეობა, მსოფლიოს ნებისმიერ წერტილში, რომლიც ამჟამად იზოლირებულია, რადგან სინქრონული კავშირის ინფრასტრუქტურის ყველგან განლაგება არ არის გამართლებული ხარჯებიდან გამომდინარე. ეს შეიძლება ხდებოდეს იმის გამო, რომ ტერიტორია ძნელად მისადგომია (მაგალითად, შორეული კუნძულები, მთიანი რეგიონები, ჯუნგლები) ან იმიტომ, რომ ტერიტორია არ წარმოადგენს მიმზიდველ ბაზარს (ანუ, მოიცავს მსოფლიოს უღარიბეს რეგიონებს).

იაფფასიანი CubeSats-ების და ასინქრონული DTN კავშირის ბუნება იძლევა ინფრასტრუქტურას, რომელიც გაცილებით უფრო იაფია, ვიდრე წინა თავებში განხილული თანამგზავრული მეგათანავარსკვლავედების ინტერნეტის ინფრასტრუქტურა, რაც აისახება საბოლოო მომხმარებლისთვის ძალიან დაბალ ღირებულებაში და მკვეთრად ამცირებს ხელმისაწვდომობის ბარიერს. კერძოდ, RRN პროგრამები იდეალური და რეალისტური ინვესტიციაა მთავრობებისთვის და ჰუმანიტარული ორგანიზაციებისთვის, რათა უზრუნველყონ უფასო ინტერნეტკავშირი შორეულ რეგიონებში. დაბოლოს, იგივე ინფრასტრუქტურა შეიძლება გამოყენებულ იქნეს ბიზნესზე ორიენტირებულ სხვადასხვა შემთხვევევაში, რათა შემცირდეს გადაუდებელი კომუნიკაციების ღირებულება, მათ შორის უსაფრთხო და მონაცემთა დაბალი სიჩქარით გადამცემი მეორადი და სარეზერვო არხები მგრძნობიარე მონაცემებისთვის.

პარაგრაფის ბოლოს მოვიყვანთ RRN-ების კონტექსტში ყველაზე აქტუალურს კვლევებს, რომლებიც აღწერილი ლიტერატურაში.

ტაქსონომია და ინსტრუმენტები:

ლიტერატურაში წარმოდგენილია RRN-ების ყოვლისმომცველი ტაქსონომია. მაგალითად, ჩატარებული იყო შეყოვნებისა და გზის სიგრძის მახასიათებლების გამოკვლევა. შეფასდა RRN ჯგუფები 10-დან 50 თანამგზავრამდე. ასევე შეფასდა ISL-ით უზრუნველყოფილი კავშირი RRN-ებისთვის. შედეგები აჩვენებს, რომ მიწოდების მაჩვენებელი შეიძლება 10%-მდე გაუმჯობესდეს 12 თანამგზავრისგან შემდგარ Walker თანავარსკვლავედის ფორმირებებში, თუმცა, ამავე დროს, თავი იჩინა გადატვირთულობის პრობლემებმა. RRN-ებში ალგორითმების გასაანალიზებლად გამოყენებული და განვითარებულია უამრავი სხვადასხვა სიმულაციური ინსტრუმენტი, მათ შორის ქსელის სიმულატორები ONE, ns-3, Omnet++-ზე დაფუძნებული DtnSim, და სხვა მორგებული ინსტრუმენტების ნაკრები.

მარშრუტიზაცია:

მარშრუტიზაციის სქემები ხელმისაწვდომი ტოპოლოგიური ცოდნის ოდენობის თვალსაზრისით, შეფასდა მთვარის ორბიტაზე განლაგებული 6 თანამგზავრისგან შემდგარ სიმულირებულ ქსელში, რომელსაც მხარს უჭერს აშშ-ის აერონავტიკის და კოსმოსური სივრცის (კვლევის) ეროვნული სამმართველოს (NASA) ღრმა კოსმოსური ქსელის მიწისპირა სადგურები. კონკრეტული ცხელი წერტილების მეშვეობით წარმოდგენილი იყო მარშრუტიზაციის შერჩევის სქემა და RRN სცენარებისთვის ასევე შესწავლილი იყო ენერგომოხმარებაზე დაფუძნებული მარშრუტიზაციის სქემები.

კონტაქტის პროგნოზი:

RRN-ებში გადაცემის შესაძლებლობების მახასიათებლების შეფასება განხილული და გაანალიზებული იყო

გაფართოებულ დეტერმინირებულ მარშრუტიზაციის სქემასთან ერთად, რომელიც დაფუძნებულია რამდენიმე ადრინდელ პუბლიკაციებზე. შესამოწმებლად, რამდენიმე RRN სცენარი 6—9 თანამგზავრით და 10—15 მიწისპირა სადგურით აღებული იქნა მონაცემთა ნაკრებიდან, რომელიც შეგროვდა მიწისპირა სადგურების გლობალური ქსელის მეშვეობით.

4.4. მახასიათებლების შეფასება

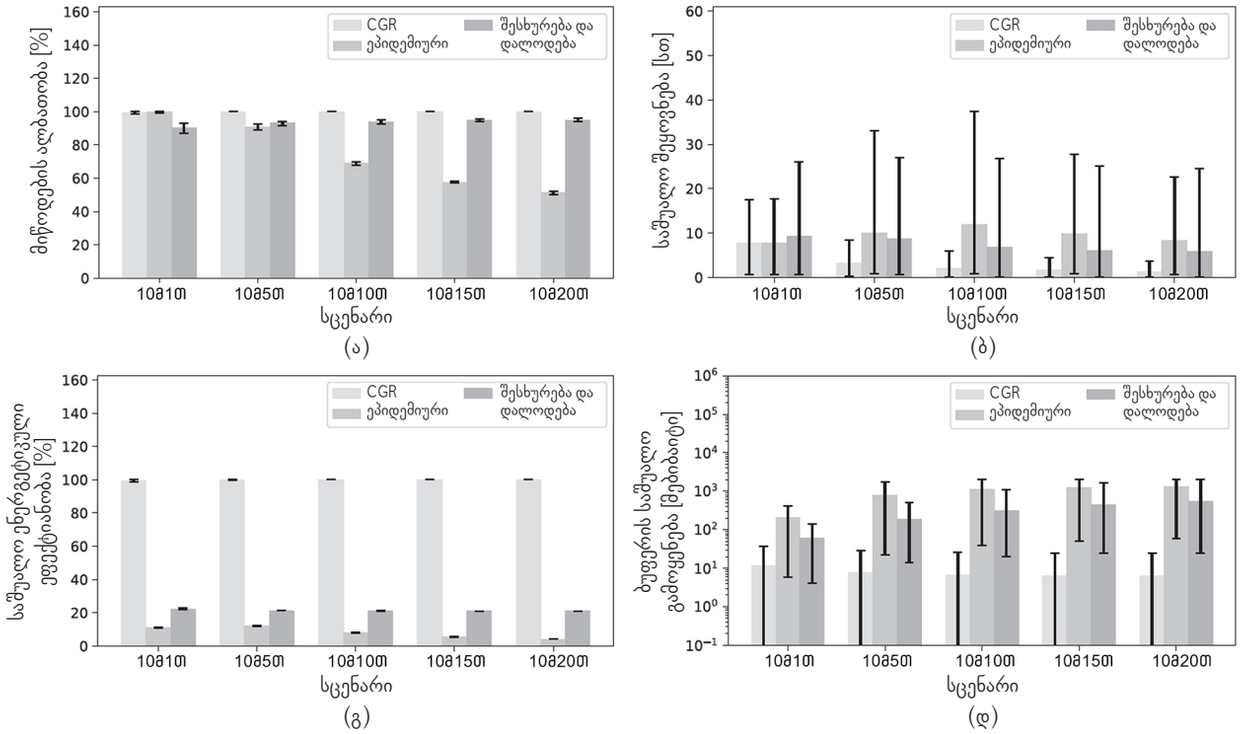
ამ პარაგრაფში წარმოდგენილია კონკრეტული RRN სცენარის რაოდენობრივი შეფასება, რომელიც განვახორციელებულია 2020 წელს სამეცნიერო ლიტერატურაში აღწერილი aiodtnsim სიმულატორის გამოყენებით.

ჩვენ განვიხილავთ 10 შემთხვევით განაწილებულ მიწისპირა სადგურს, რომელსაც ემსახურება 1, 5, 10, 15 და 20 თანამგზავრი, რომლებიც შემთხვევითი წესითაა შერჩეული 20 თანამგზავრისგან შემდგარი CubeSat-ის ნაკრებიდან (ორსტრიქონიანი ელემენტების ფაილები მიღებულია Celestrak-დან და ეს არის სერვისი, რომელიც საშუალებას გვაძლევს რეალურ დროში ვნახოთ დედამიწის გარშემო მოძრავი ყველა თანამგზავრის მოძრაობა). მიწისპირა სადგურებსა და თანამგზავრებს შორის კონტაქტები ითვლება სიცოცხლისუნარიანად, როდესაც სიმაღლის კუთხე უდრის ან აღემატება 10°-ს. ამ შეფასებაში ISL არ არის გათვალისწინებული. საკონტაქტო გეგმა შექმნილია სცენარისთვის, რომელიც გრძელდება 3 დღე (72 საათი). 2 მეგაბაიტიანი პაკეტები გენერირებულია სცენარის მთლიანი ხანგრძლივობის საწყისი 80%-ისთვის და ისინი მიმართულია შემთხვევითი წესით შერჩეული მიწისპირა სადგურებისკენ და ამ სადგურებიდან. პაკეტის გენერირების პერიოდი აღებულია 1000 წამი, გაყოფილი თანამგზავრების რაოდენობაზე, სტანდარტული გადახრით (σ), რომელიც უდრის ინტერვალის ნახევარს. ოცი გაშვება შესრულებულია თითოეული სცენარისთვის სხვადასხვა გადაცემის გეგმით (ანუ სხვადასხვა წყარო-დანიშნულების წყვილით). თითოეული კვანძის ბუფერის ზომა 2 გიგაბაიტიანია, ხოლო მონაცემთა გადაცემის სიჩქარე კონფიგურირებულია 256 კბიტი/წმ-ზე (აპლინკი) და 1 მბიტი/წმ-ზე (დაუნლინკი). ერთდროულად დაშვებულია არაუმეტეს ხუთი ლინკის გამოყენება.

ჩვენ ვაფასებთ RRN-ის მოსალოდნელ მახასიათებლებს, როდესაც პაკეტები მარშრუტდება სამი კატეგორიის მარშრუტიზაციის მიდგომის გამოყენებით. ერთი მხრივ, ეპიდემიური მარშრუტი უგზავნის პაკეტის ასლს თითოეულ შესაძლო მეზობელს, რომელიც იმყოფება მაქსიმუმ ექვს ნახტომამდე. ეს არის ტრივიალური მიდგომა, მიწოდების მაღალი მაჩვენებლით და მინიმალური გამოთვლითი დანახარჯებით, რომელიც მიიღწევა რესურსების (მეხსიერების და ენერგიის) მაღალი მოხმარების ხარჯზე. შესხურება და დალოდება (Spray and Wait) არის რეპლიკაზე დაფუძნებული უფრო ეფექტიანი სქემა, სადაც ასლების შეზღუდული რაოდენობა (ჩვენს შემთხვევაში ექვსი) „გავრცელდება“ ქსელში, რათა შემდეგ „დაელოდოს“ სანამ ერთ-ერთი ამ კვანძიდან არ მიაღწევს დანიშნულების ადგილს. ამის საპირისპიროდ, კონტაქტების გრაფის მარშრუტიზაცია (CGR) იყენებს ადაპტირებულ დეიქსტრის ალგორითმს, რათა ოპტიმალურად მიაწოდოს პაკეტის ერთი ასლი უსწრაფესი გზით. ამ მიზნით, წინასწარ გამოთვლილი საკონტაქტო გეგმა ხელმისაწვდომი იქნება RRN-ის ყველა კვანძში.

შედეგები შეჯამებულია ნახ. 4.2-ზე. მიწოდების ალბათობის თვალსაზრისით, 4.2ა ნახაზზე მოცემული შედეგები აჩვენებს, რომ ეპიდემიური მეთოდის გამოყენებისას მრავალ რეპლიკით გამოწვეული გადატვირთულობა ხელს უშლის ადეკვატურ მასშტაბურობას. მართლაც, მიუხედავად იმისა, რომ მიწოდების მაქსიმალური მაჩვენებელი მიიღება 5 თანამგზავრისთვის, 200 თანამგზავრის შემთხვევაში, პაკეტების მხოლოდ 51.2%-ია მიწოდებული. ჩვენ ვხედავთ, რომ ეპიდემიური მეთოდი 30, 40 და 50 სთ-ის შემდეგ ამოწურავს როგორც თანამგზავრის მეხსიერებას, ასევე საკონტაქტო შესაძლებლობებს ისეთი სცენარებისთვის, რომელიც შეიცავს შესაბამისად, 20, 15 და 10 თანამგზავრს.

შესხურების და დალოდების მეთოდი აუმჯობესებს ეპიდემიურ მეთოდს მიწოდების მაჩვენებლის უფრო ეფექტიანი რეპლიკაციის სტრატეგიით, მაგრამ CGR არის ყველაზე უკეთესი მიდგომა 100%-იანი წარმატებული მიწოდებით ნებისმიერი ჯგუფის ზომისთვის. CGR ასევე უზრუნველყოფს მიწოდების ოპტიმალურ შეყოვნებას (ნახ. 4.2ბ), რადგან ის იყენებს ტოპოლოგიურ მონაცემებს საკონტაქტო გეგმიდან. კერძოდ, საშუალო გამჭოლი შეყოვნება, რომელიც ერთი თანამგზავრისთვის შეადგენს 7.7 სთ-ს (σ = 4.5) მცირდება 1.3 სთ-მდე



ნახ. 4.2. RRN შეფასების შედეგები სცენარებისთვის 10 მიწისპირა სადგურით (10მ), რომელსაც ემსახურება 1-დან 20-მდე LEO თანამგზავრი (1თ-დან 20თ-მდე)

($\sigma = 0.9$) 20 თანამგზავრისთვის.

ეპიდემიურ და შესხურებისა და დალოდების გადაწყვეტილებებს არ შეუძლიათ მუდმივად შეამცირონ შეყოვნებები დიდი ჯგუფებისთვის. ენერგოეფექტიანობა (ნახ. 4.2გ) ასევე ოპტიმალურია CGR-ისთვის, რადგან გადაცემის ყოველი მცდელობა იწვევს მარშრუტირებული პაკეტის წარმატებულ მიწოდებას, თუ საკონტაქტო გეგმის მონაცემები ზუსტია (ანუ, პაკეტები არ იკარგება). ეპიდემიური მარშრუტი მერყეობს 11-დან 4%-მდე (1-დან 20 თანამგზავრამდე), ხოლო შესხურება და დალოდება უზრუნველყოფს მუდმივ 22%-იან ეფექტიანობას ნებისმიერი ზომის ჯგუფისთვის.

დაბოლოს, ეპიდემიურ მარშრუტიზაციას აქვს მეხსიერების ყველაზე მაღალი მოთხოვნები (ნახ. 4.2დ), რომელიც საჭიროა 60 მეგაბაიტიდან 1.97 გიგაბაიტამდე მოცულობის მეხსიერება საჭირო რეპლიკების შესანახად. CGR არის ყველაზე ეფექტიანი შენახვის თვალსაზრისით, რომელიც იკავებს 6.2-დან 11.4 მეგაბაიტამდე ($\sigma = 7.1$-დან 12.9-მდე) ტრაფიკის შეფასებული ფორმისთვის.

შეფასების ეს შედეგები აჩვენებს, რომ თანამედროვე DTN მარშრუტიზაციის გადაწყვეტილებები, რომლებიც სარგებლობენ ორბიტების პროგნოზირებადი ბუნებით, შეიძლება გამოყენებულ იქნეს ეკონომიურ ნანო-თანამგზავრულ პლატფორმებზე.

4.5. დანერგვა და ორბიტაზე მუშაობის შემოწმება

RRN-ში მონაცემთა ნაკადის უზრუნველსაყოფად, ზემოაღნიშნული სიმულაციით განსაზღვრულ პირობებში, შემუშავებული იქნა მიკრო-DTN (μD3TN). μD3TN არის პროგრამირების C ენაზე დაწერილი ღია კოდის შემცველი DTN პროტოკოლის გამარტივებული განხორციელება.

პროგრამული უზრუნველყოფა მოდულარულია და გვთავაზობს კონვერგენციის ფენის რამდენიმე ადაპტერს (CLA), რომლის მეშვეობითაც μD3TN-ს შეუძლია მონაცემთა გადატანა მრავალი სხვადასხვა ძირითადი ქსელის პროტოკოლით. გარდა ამისა, ინტეგრაცია DTN აპლიკაციების ფართო სპექტრთან შესაძლებელი ხდება

μD3TN აპლიკაციის აგენტის პროტოკოლით (AAP). ის უზრუნველყოფს მარტივ, პროგრამირების ენისაგან დამოუკიდებელ გზას DTN კვანძთან ურთიერთობისთვის. გარდა ამისა, μD3TN განსაზღვრავს მარშრუტიზაციის კომპონენტს (რომელიც მოიცავს დეტერმინირებულ მიდგომას შემდეგი ნახტომის დასადგენად), საკონტაქტო მართვას და ბუფერის მართვას სხვა ფუნქციებთან ერთად.

μD3TN-ის გამოყენებით RRN კონცეფციის მიზანშეწონილობა დადასტურდა ESA-ის OPS-SAT-ზე და ექსპერიმენტები დასრულდა 2021 წლის მაისში. OPS-SAT ექსპერიმენტს სამმაგი მიზანი ჰქონდა:

1. იმის ჩვენება, რომ RRN კონცეფცია შეიძლება მისადაგებული იქნეს კონკრეტულ LEO გამოყენების შემთხვევებზე;
2. DTN პაკეტის პროტოკოლის ახალი მე-7 ვერსიის საფრენი ტესტებით შემოწმება;
3. μD3TN მახასიათებლების შეფასება RRN კონტექსტში.

OPS-SAT თანამგზავრი არის სამკომპონენტიანი CubeSat, რომელსაც მართავს ESA. ის გაშვებული იქნა 2019 წლის დეკემბერში და აღჭურვილია MityARM 5CSX პლატითა და ორბირთვიანი 800 მჰც-იანი ARM პროცესორით. ამ აპარატურული უზრუნველყოფის გარდა, Linux-ზე დაფუძნებული პროგრამული უზრუნველყოფა აწარმოებს და აკონტროლებს ექსპერიმენტებს. გადაცემის მართვის პროტოკოლის (TCP) ინტერფეისი შემოთავაზებულია კოსმოსურ ხომალდზე თანამგზავრის საკომუნიკაციო ქვესისტემაში მონაცემების გაგზავნის/მიღების ექსპერიმენტებისთვის. თანამგზავრის საკომუნიკაციო ქვესისტემა საშუალებას აძლევს უსადენო პაკეტებს კოსმოსური საპაკეტო პროტოკოლის (SPP) ფორმატში გადაცემული იქნან OPS-SAT რადიოინტერფეისის მეშვეობით სახმელეთო სეგმენტის მიმართულებით. μD3TN იყო ადაპტირებული ამ TCP/SPP ინტერფეისის CLA-ად გამოსაყენებლად. სახმელეთო სეგმენტზე, ESA-ის ლაბორატორიის მიწისპირა სადგური უზრუნველყოფს მსგავს TCP სოკეტის ინტერფეისს, რომელიც საშუალებას გვაძლევს დავაკავშიროთ ჩვენი სიმულირებული ცხელი და ცივი წერტილები რევერსული უსაფრთხო გარსის (SSH) გვირაბის გამოყენებით. ამ კონტექსტში ჩატარდა ორი ძირითადი ექსპერიმენტი.

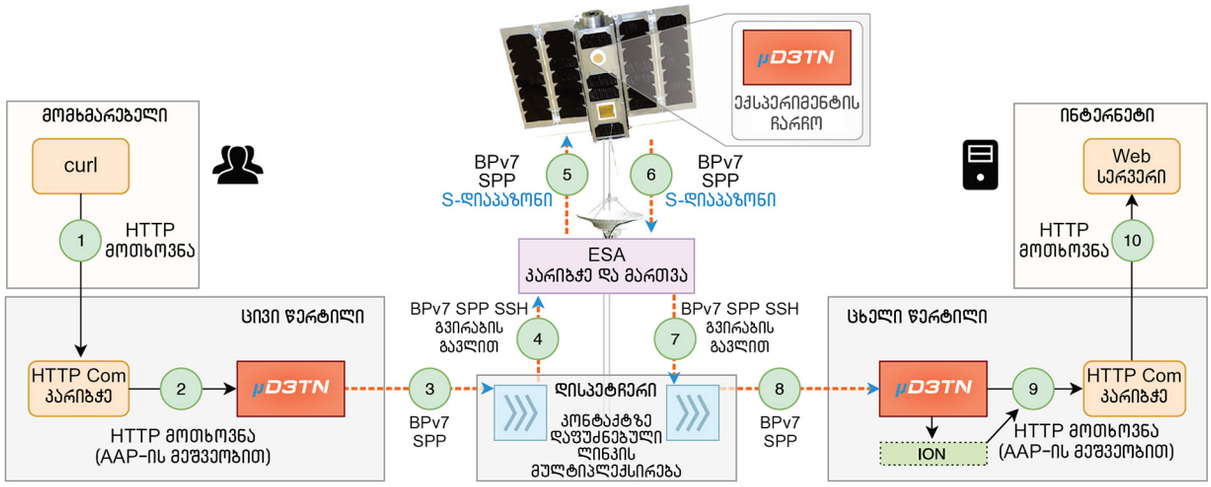
პირველი სცენარი — Web სერვისები:

პირველი ექსპერიმენტის მიზანი იყო იმის ჩვენება, რომ Web სერვერზე წვდომა იზოლირებული ცივი წერტილებიდან შესაძლებელია RRN სცენარში. ამ ექსპერიმენტისთვის გამოყენებული იქნა curl ბრძანების ხაზის ინსტრუმენტი ჰიპერტექსტის გადაცემის პროტოკოლის (HTTP) მოთხოვნის გასაგზავნად წარმოდგენილ μD3TN-ზე დაფუძნებულ ცივი წერტილის საკომუნიკაციო კარიბჭეზე (ნაბიჯი 1, ნახ. 4.3) (განვმარტავთ, რომ curl არის ბრძანების ხაზის ინსტრუმენტი მონაცემთა მისაღებად ან გაგზავნისთვის, იმ ფაილების ჩათვლით, რომლებიც იყენებენ რესურსების ერთიანი ლოკატორის (URL) სინტაქსს). ეს ეგზემპლარი შემდეგ ქმნის პაკეტს, რომელიც შეიცავს HTTP მოთხოვნას (ნაბიჯი 2) და აგზავნის მას CLA SPP-ის მეშვეობით ESA მიწისპირა სადგურზე (ნაბიჯი 3). ექსპერიმენტის წარმართვის პროცესში, დისპეტჩერის სერვისი უზრუნველყოფს ლინკს, რომელიც მულტიპლექსირებულია სხვადასხვა მიწისპირა სადგურების სიმულაციისთვის, თუმცა ჩვენ ვუკავშირდებით მხოლოდ ერთ მიწისპირა სადგურს ESA-დან. გრაფიკის მიხედვით, პაკეტები გადაეცემა ESA მიწისპირა სადგურს (ნაბიჯი 4), რომელიც შემდეგ აგზავნის პაკეტს S სიხშირული დიაპაზონის (2—4 გჰც) აპლინკის მეშვეობით OPS-SAT-ზე (ნაბიჯი 5). ბორტზე, ამოქმედდება μD3TN-ის კიდევ ერთი ეგზემპლარი, რომელიც ამუშავებს და მოგვიანებით გადასცემს მიღებულ პაკეტს სხვა დაუნლინკის კონტაქტის მეშვეობით (ნაბიჯი 6). მიღებისთანავე, მიწისპირა სადგური გადასცემს პაკეტს SSH გვირაბის მეშვეობით სადისპეტჩერო მომსახურების ბლოკს (ნაბიჯი 7), რომელიც აგზავნის მას ცხელ წერტილში. ეს უკანასკნელი ასევე მუშაობს μD3TN-ით (ნაბიჯი 8). პაკეტის სასარგებლო დატვირთვის გახსნის შემდეგ (ნაბიჯი 9), HTTP მოთხოვნა მიეწოდება Web სერვერს (ნაბიჯი 10). შემდეგ HTTP საკომუნიკაციო კარიბჭე ათავსებს პასუხს პაკეტში და აბრუნებს მას მოთხოვნისთვის არჩეული გზის ეკვივალენტური გზით.

როგორც აღნიშნული იყო, ამ ექსპერიმენტის სრული ვერსია დასრულდა 2021 წლის მაისში. ეს იყო BPv7-ის პირველი წარმატებული გამოცდა კოსმოსში და მან აჩვენა, რომ μD3TN-ის დანერგვა შეიძლება გამოყენებულ იქნეს მთელი საკომუნიკაციო გზაზე, როგორც ხმელეთზე, ასევე თანამგზავრზე.

მეორე სცენარი — გაფართოებული შესაძლებლობები:

მეორე ექსპერიმენტის მიზანი იყო DTN პროტოკოლის სხვადასხვა რეალიზაციებს შორის თავსებადობის



ნახ. 4.3. OPS-SAT ექსპერიმენტის დაყენება

დემონსტრირება ღრუბლოვან სერვისზე დისტანციური წვდომის საფუძველზე. ამ კონტექსტში, μD3TN ურთიერთმოქმედებს DTN პროტოკოლის სხვა იმპლემენტაციასთან, კერძოდ NASA-ს მიერ შემუშავებულ პლანეტათაშორისი გადაფარვის ქსელთან (ION). აქ ION განლაგებულია ცხელ წერტილში (ნახ. 4.3). აღვნიშნავთ, რომ ION არის ყველაზე სრულყოფილი და ფუნქციებით მდიდარი DTN პროტოკოლის სტეკი. ის ურთმოქმედებს μD3TN-თან, მაგრამ მისი უფრო დიდი გამოთვლითი/მეხსიერების მოცულობა იზღუდება მისი გამოყენებისას CubeSat-ებზე, რომელთაც აქვთ შეზღუდული დამუშავების შესაძლებლობები. მომხმარებელი აგზავნის სურათს Google-ის ღრუბლოვანი ხედვის (GCV) აპლიკაციის პროგრამირების ინტერფეისში (API), რათა გამოსახულების სხვადასხვა ფუნქციები იყოს იდენტიფიცირებული, ეტიკეტირებული და უკუმიმართულებით მოხსენებული RRN-ის მეშვეობით. ამ ექსპერიმენტის მსვლელობისას შესაძლებელი გახდა არა მხოლოდ თავსებადობის შემოწმება, არამედ პაკეტების ფრაგმენტაციაც, რადგან დიდი გამოსახულების ფაილი უნდა დაყოფილიყო მრავალ პაკეტად.

აღვნიშნავთ, რომ ეს ექსპერიმენტი წარმატებით განხორციელდა და თანამგზავრული კავშირი დამყარდა დისტანციურად, ვირტუალური აპარატიდან SSH გვირაბის მექანიზმის მეშვეობით მუშაობისთვის. თანამგზავრის ჟურნალის ფაილები შეფასდა ვიდეოკონფერენციით ESA OPS-SAT გუნდთან ერთად. ექსპერიმენტების ყველაზე მნიშვნელოვანი შედეგი ის არის, რომ DTN პროტოკოლების მუშაობა და მათი დანერგვა μD3TN-ში განხორციელდა უპრობლემოდ. გარდა ამისა, მოხდა ION-სა და μD3TN-ს შორის თავსებადობის დემონსტრირება, რაც კარგად გამოჩნდა RRN-ების საშუალებით პროტოკოლის მოწინავე ფუნქციების გამოყენებისას ML-ის აპლიკაციების მხარდასაჭერად.

ასევე გამოვლინდა გარკვეული სირთულეები. ცივი ადგილიდან გადაცემული დიდი გამოსახულების ფაილების გამო იქმნებოდა 200-ზე მეტი კადრი წამში, რამაც CubeSat-ის გადამცემი სისტემის გადატვირთვა გამოიწვია. ამ პრობლემის მოსაგვარებლად, ESA-ის მიერ შემოთავაზებული იქნა სიჩქარის ლიმიტის შემოღება, მხოლოდ 45 კადრი/წმ, რომელიც, მაქსიმუმ უნდა გამოსხივდეს μD3TN CLA-ის მიერ მონაცემთა სტაბილური ნაკადის უზრუნველსაყოფად. ასევე, სხვა თანამგზავრული ქვესისტემებისთვის განკუთვნილი დამატებითი პაკეტები მოეწოდებოდა საბორტო სოკეტ-კავშირის საშუალებით, რისთვისაც საჭირო გახდა ფილტრაციის მექანიზმის დანერგვა ისე, რომ ყველა პაკეტი არ განხილულიყო, როგორც DTN პაკეტი.

დაბოლოს, განხორციელებული კომუნიკაციები ეფუძნებოდა სტატიკურ დროით ფანჯრებს, რომლებიც წინასწარ იყო კონფიგურირებული როგორც თანამგზავრზე, ასევე სახმელეთო სეგმენტზე. როგორც კი ეს დროითი ეტიკეტები ადგილობრივ დროს დაემთხვა, ამოქმედდა პაკეტების გადაცემის რეჟიმი. ამის პირველი შედეგი, რა თქმა უნდა, არის ის, რომ ჩვენ გვჭირდება ძალიან კარგად სინქრონიზებული საათები. ეს არ არის პრობლემა OPS-SAT-ისთვის, მაგრამ შეიძლება იყოს გამოწვევა სხვა კოსმოსური ხომალდისთვის. მეორეც, ჩვენ უნდა გვევარაუდა ლინკის არსებობის შესახებ, რამაც გაართულა სისტემის გამართვა და ფუნქციონირება. მართლაც, ჩვენ ბოლომდე დარწმუნებული ვერ ვიქნებით აქტიური ლინკის ხელმისაწვდომობაში, სანამ არ

მივიღებთ უკუკავშირის რეალურ სიგნალს თანამგზავრიდან. როგორც პირველი გამოსავალი, კონტაქტები ისე იყო დაგეგმილი, რომ ისინი წარმოიქმნება მხოლოდ მაშინ, როდესაც თანამგზავრი იმყოფება მიწისპირა სადგურთან შედარებით მაღალ სიმაღლეზე; ამრიგად, კავშირის არსებობის ალბათობა საკმაოდ მაღალია (ზოგიერთი კონტაქტისთვის დაგეგმილია გადაცემები მხოლოდ 15°-ს ზემოთ). რა თქმა უნდა, ეს სტრატეგია ამცირებს გადაცემული მონაცემების რაოდენობას. გარდა ამისა, ექსპერიმენტის დროს გამოყენებული იქნა პერიოდული პინგისმაგვარი ტრიგერი ტესტებისთვის, რომელიც აგზავნის ერთ პაკეტს თანამგზავრზე, ეს პაკეტი დაუყოვნებლივ ბრუნდება უკან და იწყებს ტესტურ გაშვებას მიღებისთანავე. ამ მექანიზმმა მნიშვნელოვნად გაზარდა ექსპერიმენტის დაყენების საიმედოობა.

4.6. მომავლის პერსპექტივები და მეოთხე თავის დასკვნა

RRN-ის ხედვა განსაზღვრავს ინტერნეტს, როგორც ქსელური კომუნიკაციების განსაკუთრებულ შემთხვევას, განკუთვნილს შეზღუდული გარემოსთვის, რომელშიც შეყოვნების პრობლემა უმნიშვნელოა და ხანგრძლივი შეფერხებები განიხილება ტოპოლოგიურ ანომალიად. RRN განიხილავს უფრო ზოგად ქსელურ მოდელს, რომელშიც მიღებისა და გადაცემის დრო გახანგრძლივებულია, მაგრამ ეს არ უშლის ხელს ბოლოების დამაკავშირებელ (გამჭოლ) კომუნიკაციას. DTN ქსელის ინფრასტრუქტურა ამ მოდელის აუცილებელი, მაგრამ არასაკმარისი ელემენტია; თავად აპლიკაციები უნდა იყოს შეყოვნებისადმი ტოლერანტული.

კომუნიკაციების უმეტესობა აკმაყოფილებს ამ მოთხოვნას. რეალურ დროში სინქრონული კომუნიკაციების მასობრივი გამოყენებით, როგორიცაა ხმის გადაცემა ინტერნეტპროტოკოლით (VoIP) და მყისიერი შეტყობინებები, კომუნიკაციები ხშირად დამოუკიდებელია მონაცემთა სპეციალური ხელმისაწვდომობისგან მათი შექმნის დროს. ცოდნის ბაზებზე წვდომა, როგორიცაა ვიკიპედია, ფილმების ნახვა კონტენტის სადისტრიბუციო ქსელიდან, ამინდის პროგნოზის მონაცემების მიღება ან სარეზერვო ინფორმაციის გადაცემა დისტანციურ სერვერზე — ყველა ამ სცენარს საერთო ის აქვს, რომ ქსელის ნაწილები მონაცემთა წყაროს და დანიშნულების ადგილს შორის ტოლერანტულია დაყოვნების მიმართ, თუნდაც რამდენიმე საათის განმავლობაში. სცენარების დიდ რაოდენობაში შეყოვნებები სავსებით მისაღებია. უფრო ზოგადად, RRN-ები მხარს დაუჭერენ ახალი აპლიკაციების ტექნოლოგიებს, რომლებიც დაფუძნებულია გამოქვეყნების/გამოწერის ოპერაციებზე, რომელიც მოიცავს მონაცემთა ბაზაზე ორიენტირებულ ქსელებსაც.

არსებობს მოსაზრება, რომ მომავალი თანავარსკვლავედების მიერ დაპირებული გლობალური ინტერნეტწვდომა RRN-ებს გამოუსადეგარს გახდის. თუმცა, იმის გამო, რომ DTN არქიტექტურა, რომელზედაც დაფუძნებულია RRN, შექმნილია იმისთვის, რომ გამოიყენოს ძირითადი ინტერნეტსერვისები, სადაც ისინი ხელმისაწვდომია, გაუმჯობესებული ინტერნეტსერვისი გააფართოებს გადაფარული RRN-ის შესაძლებლობებს; ამ ორი ტექნოლოგიის ინტეგრაციაც არ წარმოადგენს დაბრკოლებას. რაც კიდევ უფრო მთავარია, არსებობს სხვა მოსაზრებაც, რომ ამ უკიდურესად დიდმა თანავარსკვლავედებმაც (Kuiper, Starlink და OneWeb პროექტები) კი ვერ შეძლონ გლობალური ქსელის სერვისების მიწოდება მსოფლიოს ყველაზე ღარიბი მოსახლეობისთვის ხელმისაწვდომ ფასად.

ჩვენ ვვარაუდობთ, რომ RRN შეიძლება გახდეს საკმაოდ ეფექტიანი პასუხი მოსახლეობის სოციალურ-ეკონომიკურად ან გეოგრაფიულად დაუცველ სეგმენტებზე ქსელური საკომუნიკაციო სერვისების მიწოდების პრობლემის გადაჭრის კუთხით. მეოთხე თავი კი ასახავს RRN-ებში გამოყენებული DTN პროტოკოლების დიდ პოტენციალს, რაც დადასტურებულია ექსპერიმენტული ცდებითაც.

თავი 5 LEO თანამგზავრული წვდომის ქსელები და გზა 6G-ის მიმართულებით: გამოწვევები და მიდგომები

5.1. შესავალი

მეხუთე თაობის (5G) ფიჭური ქსელების კომერციალიზაციასა და ტექნოლოგიების პოპულარიზაციასთან ერთად, თანმიმდევრულად იქნა შემოთავაზებული სხვადასხვა მოწინავე აპლიკაციები ან კონცეფციები, მათ შორის საგნების ინდუსტრიული ინტერნეტი (IIoT), ჰოლოგრაფიული კომუნიკაცია, ციფრული ტყუპები და მეტა-სამყარო. ეს ფაქტორები განაპირობებს როგორც ინდუსტრიის, ასევე აკადემიური კვლევების შემდგომ ტექნიკურ განვითარებას, რათა თანდათანობით შევიდეთ მეექვსე თაობის (6G) ეპოქაში. 5G-მდე არსებულ მობილური საკომუნიკაციო ტექნოლოგიებთან შედარებით, 6G პერსპექტივები მიზნად ისახავს უზრუნველყოს საყოველადგილო დაფარვა და მომხმარებლის მასობრივი წვდომა, კომუნიკაციის გამტარუნარიანობისა და საიმედოობის უფრო მაღალი დონით, რაც საკმაოდ რთულად მისაღწევი ამოცანაა მხოლოდ ტერესტრიალურ ფიჭურ ქსელებზე დაყრდნობით. საბედნიეროდ, თანამგზავრული საკომუნიკაციო ტექნოლოგიების სწრაფი განვითარებით, ზემოაღნიშნული 6G მოთხოვნების დაკმაყოფილება შესაძლებელია კოსმოსური და ტერესტრიალური ფიჭური ქსელების კომბინირებით.

თანამგზავრული საკომუნიკაციო ქსელების მრავალსაფეხურიან სტრუქტურაში, LEO თანავარსკვლავედები განსაკუთრებით მნიშვნელოვან როლს ასრულებენ კოსმოსისა და დედამიწის ურთიერთკავშირში. ისინი საშუალებას აძლევს LEO თანამგზავრული წვდომის ქსელს (LEO-SAN) უზრუნველყოს ფართოზოლოვანი სერვისებით სრულყოფილი დაფარვა მიწისპირა მომხმარებლებისთვის. LEO თანამგზავრული თანავარსკვლავედების მეშვეობით კომუნიკაციის კონცეფცია ვითარდებოდა 1990-იანი წლების დასაწყისიდან. თუმცა, სხვადასხვა პრობლემის გამო, როგორიცაა შეზღუდული ტექნიკური შესაძლებლობები, მაღალი ღირებულება და არასაკმარისი მოთხოვნა, LEO თანამგზავრულ პროგრამების უმეტესობა არ იქნა რეალიზებული. ბოლო წლების განმავლობაში, ფართოზოლოვანი ინტერნეტით გლობალური დაფარვის მზარდმა მოთხოვნამ ნებისმიერ დროს და ნებისმიერ ადგილას, გამოიწვია კვლევების ახალი ტალღა LEO თანამგზავრულ თანავარსკვლავედებზე. ერთი მხრივ, ინდუსტრიული კუთხით, განიხილება LEO-ს ახალი თაობის ფართომასშტაბიანი თანავარსკვლავედების მრავალი პროექტი, როგორებიცაა Iridium II, Starlink, OneWeb, Telesat და Kuiper, რომლებმაც მნიშვნელოვანი პროგრესი განიცადეს და იწყებენ კომერციულ ტესტირებას. მეორე მხრივ, აკადემიურ წრეებში შემოთავაზებულია ქსელის ეფექტიანი არქიტექტურა საჰაერო სივრცისა და ხმელეთის ინტეგრაციისთვის, რომლის ფარგლებშიც წარმოდგენილი იყო რამდენიმე ძირითადი ტექნოლოგია და გამოიყენება ტიპური სცენარი. ლიტერატურაში ნათლად გამოიკვეთა LEO თანამგზავრების განვითარების ტენდენციები და წარმოდგენილი იქნა კვლევები LEO-ზე დაფუძნებული და მიწისპირა ქსელების ინტეგრაციის შესახებ. გარდა ამისა, მე-3 თაობის პარტნიორობის პროექტით (3GPP) გათვალისწინებული არატერესტრიალური ქსელების პროექტი ხელს უწყობს თანამგზავრულ-სახმელეთო ინტეგრირებული ქსელის სტანდარტიზაციას. კერძოდ, 3GPP-ის მე-17 გამოშვება და შემდგომი ვერსიები მოითხოვს, რომ 5G-ის შემდგომი პერიოდი გამოყენებულ იქნეს LEO თანამგზავრული კომუნიკაციების მხარდასაჭერად გაფართოებული დაფარვისთვის.

ნახ. 5.1 ასახავს LEO-SAN-ის ტიპურ სცენარებსა და მის ტექნიკურ შემადგენლობას. LEO თანამგზავრები ფუნქციონირებენ როგორც კოსმოსური საბაზო სადგურები (BS), რათა შეავსონ ტერესტრიალური საკომუნიკაციო ქსელები, მიაღწიონ გადაცემას სრული დაფარვით და ასევე უზრუნველყონ მომხმარებლის მასობრივი წვდომა მონაცემთა გადაცემის მაღალი სიჩქარით. სარგებლობენ რა, როგორც ტერესტრიალური, ასევე კოსმოსურ-სახმელეთო მონაცემთა გადამცემი ლინკების უპირატესობებით, მომხმარებლის ტერმინალებს შეუძლიათ შეასრულონ უწყვეტი ჰენდოვერი კოსმოსსა და მიწისპირა BS-ებს შორის მოქნილი გზით, რათა მოხდეს სისტემის QoS დონის ოპტიმიზაცია. მიუხედავად აშკარა უპირატესობებისა, LEO-SAN ჯერ კიდევ აწყდება

ნახ. 5.1. LEO-SAN-ის ტიპური სცენარები და ტექნიკური შემადგენლობა

მრავალ გადაუჭრელ პრობლემას მისი ისეთი მახასიათებლების გამო, როგორიცაა დიდი სივრცით-დროითი მასშტაბი, მაღალი მობილურობა, რთული სტრუქტურა და სერვისების მრავალფეროვნება. შემთხვევითი წვდომის თვალსაზრისით, წვდომის არქიტექტურა ასევე ნაკლებად მოქნილია. უფრო მეტიც, თანამგზავრის მაღალი სიჩქარით მოძრაობა იწვევს მომხმარებლის მიერ წვდომის არჩევის დროულობის გაუარესებას, რამაც შეიძლება სერიოზულად იმოქმედოს მომხმარებლის ყველა სახის სერვისთან წვდომაზე. სხივების მართვის თვალსაზრისით, სხივის დაფარვის დიაპაზონის ზრდა მოითხოვს წვდომისათვის განკუთვნილი სიხშირული ზოლის გაფართოებას. უფრო მეტიც, შეზღუდული რესურსები ძნელად ემსახურება მასობრივ მომხმარებლებს სხივების განაწილების არსებული მექანიზმით. რაც შეეხება გადაცემის ტექნოლოგიას, LEO თანამგზავრის მაღალსიჩქარიანი მობილურობა იწვევს სიხშირის ცვლილების ანუ დოპლერის მძიმე ეფექტებს, რაც პრაქტიკულ გამოწვევებს უქმნის მოდულაციას და დემოდულაციას.

ამ თავში, ლიტერატურაში ფართოდ მიმოხილული ნაშრომებისგან განსხვავებით, რომლებიც ეხება LEO-SAN-ის განვითარებისა და გამოყენების ზოგად სცენარებს, ჩვენ ყურადღებას გავამახვილებთ დიდწილად ისეთ საკითხებზე, რომლებიც დაკავშირებულია LEO-SAN-ისთვის შემთხვევითი წვდომის, სხივების მართვისა და დოპლერის ეფექტის მიმართ მდგრადი გადაცემის ტექნოლოგიებთან. უფრო კონკრეტულად, განხილულია LEO-SAN-ში შემთხვევითი წვდომის ძირითადი პრობლემები, მათ შორის დაბალი მოქნილობა, გადაცემის ხანგრძლივი შეყოვნება და არაეფექტიანი „ხელის ჩამორთმევა“ (ტელეკომუნიკაციებში, ხელის ჩამორთმევა (handshake) არის ორ მონაწილეს შორის მოლაპარაკების ავტომატური პროცესი ინფორმაციის გაცვლის გზით, რომელიც ადგენს საკომუნიკაციო ლინკის პროტოკოლებს კომუნიკაციის დასაწყისში, სრული კომუნიკაციის დაწყებამდე). შესაბამისად, მოცემულია გარკვეული მითითებები ქსელის არქიტექტურისა და შემთხვევითი წვდომის ალგორითმების შემუშავების შესახებ LEO-SAN-ში. შემდეგ გამოკვლეულია სხივების მართვა LEO-SAN-ისთვის რთული გავრცელების გარემოში, სადაც ასევე გათვალისწინებულია LEO თანამგზავრების მაღალი მობილურობა და სასარგებლო დატვირთვის შეზღუდული ბიუჯეტი.

მონაცემთა გადაცემის საიმედო ლინკებით ფართოზოლოვანი სრული დაფარვის უზრუნველსაყოფად, განხილულია სხივების მართვის მოწინავე გადაწყვეტილებები დაფარვის მოთხოვნების, სხივების დაგეგმვის, ჰენდოვერის მართვისა და სხივის რესურსების მართვის თვალსაზრისით. გარდა ამისა, ჩვენ შევისწავლით დოპლერის წანაცვლების ზემოქმედებას LEO-SAN-ზე, სადაც გამოკვლეულია დოპლერის ეფექტის მიმართ მდგრადი სიგნალის დამუშავების სქემები კლასიკური მოდულაციის სისტემებისთვის და დოპლერის წანაცვლების

მიმართ მდგრადი ტალღების ახალი ფორმები. თავის ბოლოს განიხილება სამომავლო კვლევის რამდენიმე მიმართულება.

5.2. შემთხვევითი წვდომა LEO-SAN-ისთვის

უპირველეს ყოვლისა განვმარტავთ, რომ ამ თავში შემთხვევითი წვდომა ეხება პროცესს იმ დროიდან, როდესაც მომხმარებელი აგზავნის შემთხვევითი წვდომის პრეამბულას იმ დრომდე, როდესაც დამყარდება ძირითადი სასიგნალო კავშირი მომხმარებელსა და BS-ს შორის ინფორმაციის გაცვლის გზით.

ეს პარაგრაფი ასახავს ტექნიკურ საკითხებს ქსელის მიმდინარე არქიტექტურაში და LEO-SAN-ისთვის შემთხვევითი წვდომის სქემებში, მათ შორის მოყვანილია ისეთი საკითხები, როგორიცაა დაბალი მოქნილობა, გადაცემის ხანგრძლივი შეყოვნება, არაეფექტიანი ხელის ჩამორთმევა და ა. შ. ამ პრობლემების გადასაჭრელად, ჩვენ წარმოვადგენთ რამდენიმე სახელმძღვანელო მითითებას LEO-SAN-ში შემთხვევითი წვდომის ქსელის არქიტექტურის შესაქმნელად. გარდა ამისა, ჩვენ განვიხილავთ შემთხვევითი წვდომის ოპტიმიზებული ალგორითმების შემუშავებას, შესაბამისად, მობილური ფართოზოლოვანი მომხმარებლებისთვის და მოკლე სიგრძის პაკეტების მომხმარებლებისთვის.

არსებული დიზაინის ტექნიკური საკითხები:

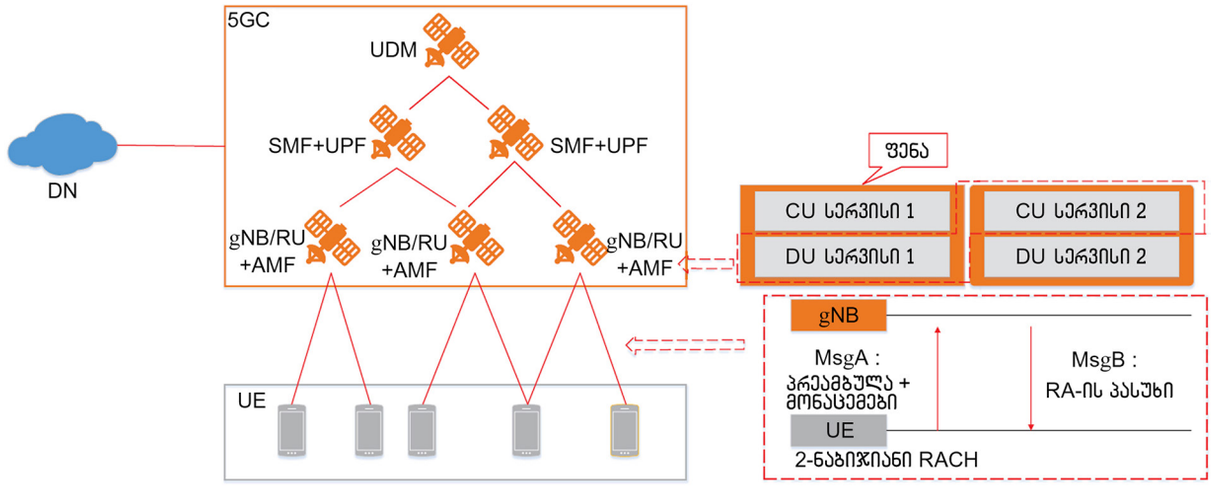
წვდომის ქსელის არსებულ არქიტექტურაში, რომელიც დაფუძნებულია 3GPP NTN ტექნოლოგიაზე, ძირითადი ქსელი მდებარეობს დედამიწაზე, ხოლო წვდომის ქსელის BS-ები მთლიანად ან ნაწილობრივ განლაგებულია თანამგზავრულ პლატფორმაზე. ამ წვდომის არქიტექტურას აქვს დაბალი მოქნილობა და მაღალი ორმხრივი შეყოვნება, რაც არაეფექტიანს ხდის მომხმარებლების მასობრივი წვდომის მხარდაჭერას. გარდა ამისა, მობილური ფართოზოლოვანი სერვისისთვის, თანამგზავრების გადაადგილების მაღალი სიჩქარის გამო, მომხმარებელსა და BS-ს შორის კოჰერენტული დრო მცირდება. ამიტომ, მომხმარებლის შერჩევის დროულობა უარესდება, რაც იწვევს სისტემის გამტარუნარიანობის შემცირებას. გარდა ამისა, გადაცემისას შეყოვნება თანამგზავრსა და მიწისპირა მომხმარებელს შორის გაცილებით ხანგრძლივია, მიწისპირა BS-ებს შორის შეყოვნებასთან შედარებით. წვდომობის არსებული მექანიზმი, რომელიც დაფუძნებულია მრავალჯერად ხელის ჩამორთმევაზე, არაეფექტიანია მაღალი შეყოვნების პირობების გამო და მომხმარებლის სერვისის საიმედოობისა და უწყვეტობის გარანტია შეუძლებელია. ეს განსაკუთრებით პრობლემურია მოკლე სიგრძის პაკეტების შემცველი სერვისებისთვის, სადაც ხელახალი წვდომა წინა წვდომის წარუმატებლობის შემდეგ იწვევს დამატებით შეყოვნებასა და გაზრდილ სიგნალურ ოვერჰედს.

გაუმჯობესებული ქსელური არქიტექტურა LEO-SAN-ისთვის:

LEO-SAN-ის ქსელის არქიტექტურა შეიძლება შეიცვალოს ზემოაღნიშნული საკითხების გადასაჭრელად. ნახ. 5.2 გვიჩვენებს სერვისზე ორიენტირებული ქსელის გაუმჯობესებულ არქიტექტურას რამდენიმე რეკომენდაციით: პირველ რიგში, ქსელურ კავშირზე გავლენას ახდენს LEO ქსელის ტოპოლოგიის დინამიური ცვლილებები, რაც მოითხოვს მოქნილ და ეფექტურ არქიტექტურულ დიზაინს ქსელის გარემოსა და მომხმარებლის მოთხოვნების შესაბამისად. სერვიტიზაციის (ანუ მომსახურების სპექტრის გაფართოების) დიზაინის კონცეფცია შეიძლება განიხილებოდეს როგორც თანამგზავრული წვდომის ქსელში (SAN), ასევე ძირითად ქსელში (CN), ისე, რომ ჩვეულებრივი SAN და CN 5G-ში შეიძლება გაერთიანდეს, რათა ხელი შეუწყოს ქსელის უფრო მარტივ განლაგებას და მართვას. გარდა ამისა, ქსელის ფუნქციები ან სერვისები უნდა იყოს მოქნილი, განაწილებული და შეიძლება დინამიურად განლაგდეს სხვადასხვა თანამგზავრის მრავალ კვანძში LEO ქსელების ეფექტიანი კოორდინაციის მისაღწევად. დაბოლოს, ინტერფეისის ერთიანი და ეფექტიანი პროტოკოლები შეიძლება შეიქმნას ქსელის სხვადასხვა ფუნქციების დასაკავშირებლად სერვიტიზაციის ფარგლებში.

შემთხვევითი წვდომა მობილური ფართოზოლოვანი სერვისებისთვის:

ოთხსაფეხურიანი წვდომის მეთოდი, როგორც წესი, გამოიყენება მობილური ფართოზოლოვანი სერვისებისთვის. თანამედროვე შემთხვევითი წვდომის ალგორითმების უმეტესობა ფოკუსირებულია მხოლოდ წვდომის მიმდინარე მომენტზე. თუმცა, მაღალსიჩქარიანი მობილური თანამგზავრები და მომხმარებლები



ნახ. 5.2. სერვისზე ორიენტირებული ქსელის არქიტექტურა LEO-SAN-ში (აბრევიატურები განმარტებულია წიგნის ბოლოს, განყოფილებაში: აბრევიატურები და აკრონიმები)

მოქნილი წვდომით საჭიროებენ სწრაფ ტოპოლოგიურ ცვლილებებს. არსებული წვდომის ალგორითმების უმეტესობა ვერ ადაპტირდება LEO ქსელის უაღრესად დინამიურ ცვლილებასთან, რადგან ეს ალგორითმები გადაწყვეტილებებს იღებენ მხოლოდ ჰენდოვერის მიმდინარე მომენტიდან. ამ საკითხის გადასაჭრელად, ერთ-ერთი შესაძლო სტრატეგიაა ისტორიული მდგომარეობის შესახებ ინფორმაციის გამოყენება მომავალი მდგომარეობის პროგნოზირებისთვის სწავლების ეფექტიანი მეთოდების მეშვეობით, რამაც შეიძლება გააუმჯობესოს მობილური ფართოზოლოვანი წვდომის გრძელვადიანი სარგებელი. თუმცა, მომხმარებლის/თანამგზავრის მდგომარეობის შესახებ ინფორმაცია არა მხოლოდ მასშტაბურია, არამედ ძალიან სწრაფად იცვლება, რაც იწვევს გამოთვლითი ეფექტიანობის შემცირებასა და პროგნოზირების დროულობის გაუარესებას. მაშასადამე ის, თუ როგორ უნდა დამუშავდეს დიდი რაოდენობის მონაცემები სწრაფი ცვლილებით, ასევე აუცილებელი კომპონენტია შემთხვევითი წვდომის მახასიათებლის გასაუმჯობესებლად.

შემთხვევითი წვდომა მოკლე სიგრძის პაკეტების შემცველი სერვისებისთვის:

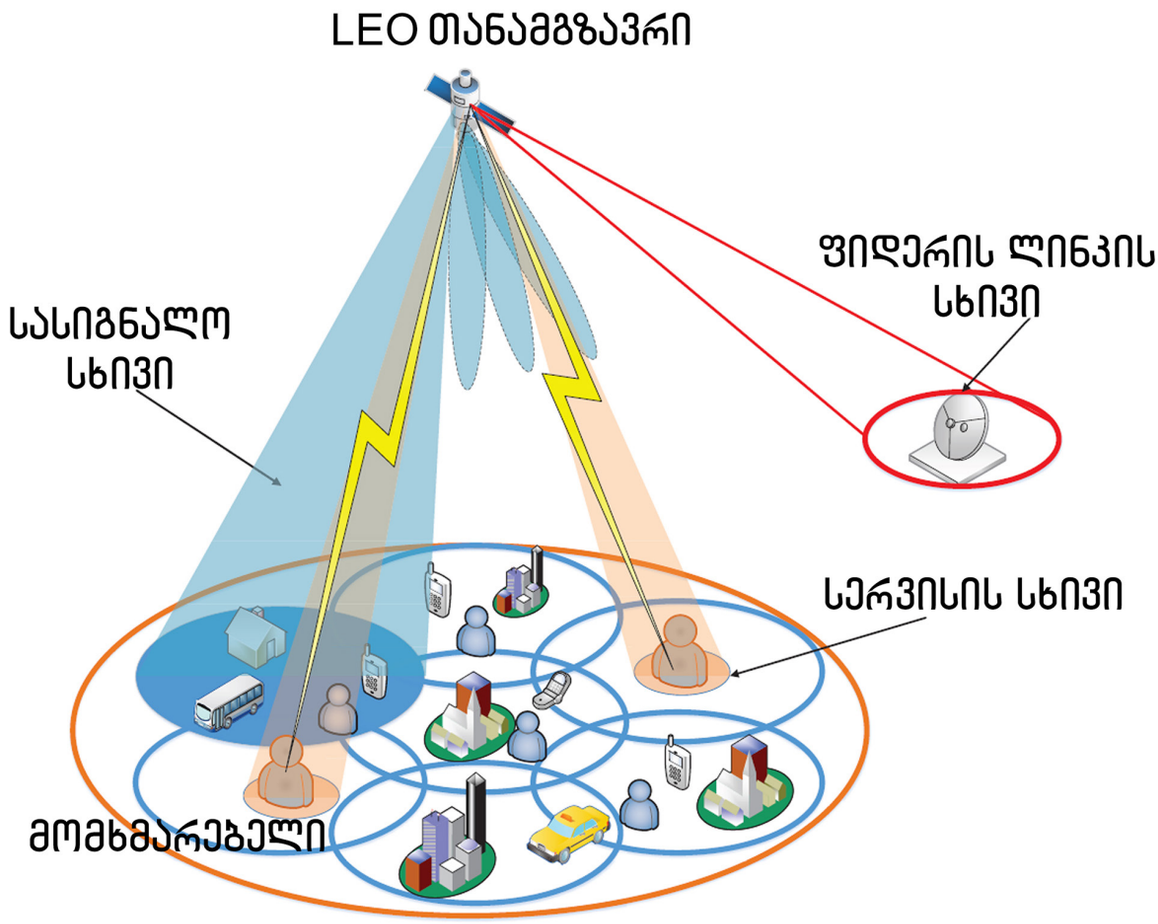
LEO-SAN-ში, მოკლე სიგრძის პაკეტებზე წვდომა თანამგზავრული IoT-ის ერთ-ერთი ყველაზე მნიშვნელოვანი სერვისია. ზოგადად, მომხმარებლები ერთდროულად აგზავნიან მხოლოდ რამდენიმე ბაიტის შემცველ ინფორმაციას. ამჟამად შესწავლილი ყველაზე ტიპური სქემა არის შემთხვევითი წვდომა ავტორიზაციის გარეშე, კერძოდ, ორსაფეხურიანი წვდომის მეთოდი. ოთხსაფეხურიანი წვდომის მეთოდისგან განსხვავებით, ორსაფეხურიანი წვდომის მეთოდი აერთიანებს პირველ და მესამე საფეხურს ინფორმაციის გაცვლის რაოდენობის შესამცირებლად და წვდომის პროცესის გასამარტივებლად. პრეამბულა და მომხმარებლის მონაცემები გადაიცემა ერთად, ორსაფეხურიანი წვდომის მეთოდით, რაც ხელს უწყობს სიგნალის დამუშავების სირთულის და გადაცემის შეყოვნების შემცირებას. თუმცა, არხის გაუხშოების (channel sparcity) მახასიათებლები და მასობრივი მომხმარებლის მოწყობილობების სპორადული ტრაფიკი იგნორირებულია. შესაბამისად, გაუხშოების აღდგენის მათემატიკური მოდელი შეიძლება გამოყენებულ იქნეს არხის შეფასებისა და მომხმარებლის დეტექტირების ერთობლივი პრობლემის მოდელირებისთვის. სამწუხაროდ, ეს პრობლემა, ჩვეულებრივ, წარმოადგენს NP-რთულ ამოცანას. მიზნობრივი ფუნქციისთვის გარკვეული შეზღუდვების შემოღებით, პრობლემის გადაჭრა შესაძლებელია ზოგიერთი ხარბი (greedy) ალგორითმისა და შეტყობინების გადაცემის (message passing) ალგორითმის გამოყენებით.

5.3. სხივების მართვა LEO-SAN-ში

სხივების მართვა ძირითადად მოიცავს სასიგნალო, სერვისის და ფიდერის ლინკის სხივების დაგეგმვას, ჰენდოვერის მართვას და რესურსების განაწილებას, როგორც ნაჩვენებია ნახ. 5.3-ზე. LEO-SAN-ში მაღალი მობილურობა, რთული გავრცელების გარემო, ისევე როგორც თანამგზავრული პლატფორმების საკომუნიკაციო სასარგებლო დატვირთვის შეზღუდული ბიუჯეტი, დიდ გამოწვევებს ქმნის სხივების მართვის ოპერაციებისთვის. ეს პარაგრაფი იკვლევს ამ ტექნიკურ საკითხებს დაფარვის მოთხოვნების და სხივების დაგეგმვის, ჰენდოვერის მართვის, ასევე სხივების რესურსების მართვის თვალსაზრისით.

დაფარვის მოთხოვნები და სხივის დაგეგმვა:

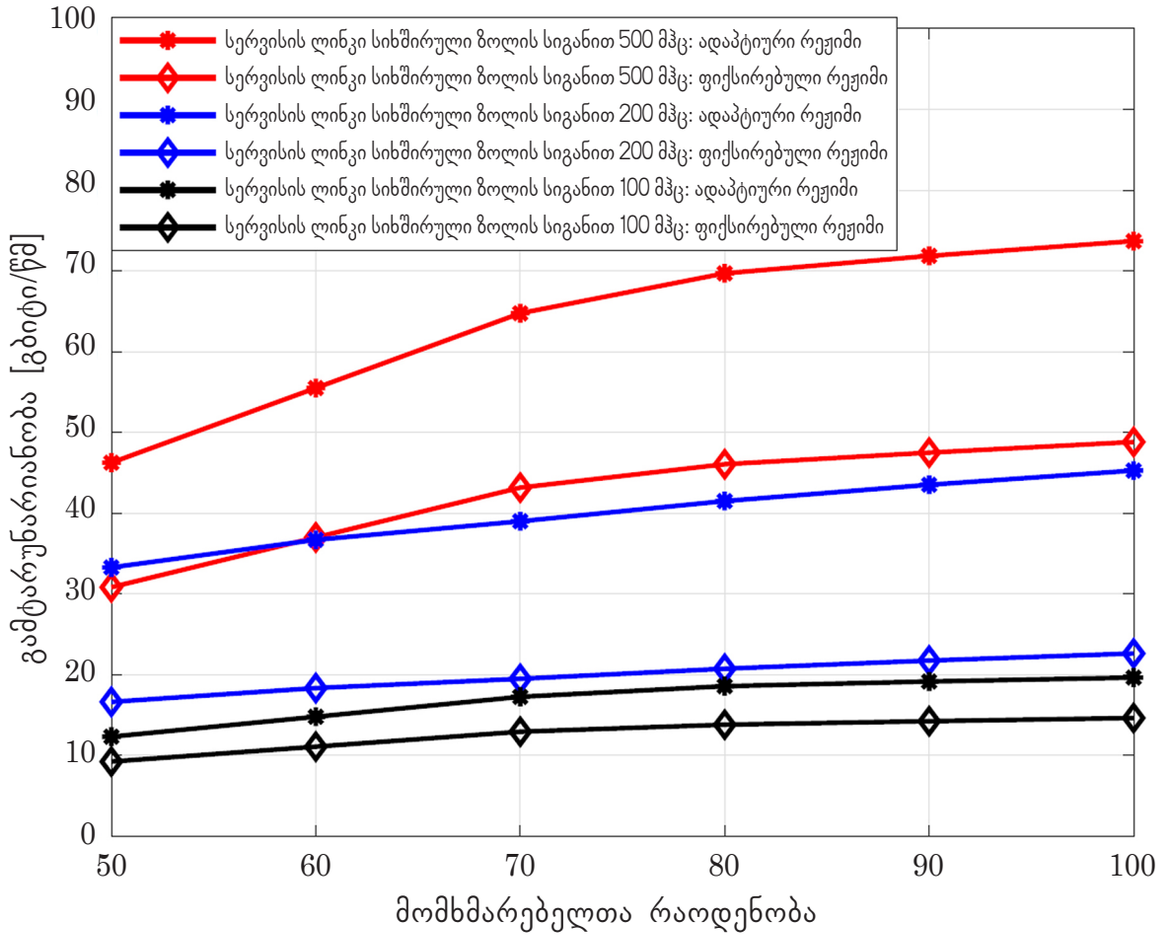
1. *დაფარვის მოთხოვნა:* LEO-SAN-ში წარმოდგენილია სამი მნიშვნელოვანი ნაბიჯი მომხმარებლის წვდომისთვის: სიგნალების გადაცემის სინქრონიზაცია, სერვისის გადაცემა და ტრანზიტული უკუგადაცემა, ანუ ბექჰოლი (backhaul). უპირველეს ყოვლისა, ვიწრო სიხშირული ზოლი, მაგრამ სრული დაფარვაა საჭირო სიგნალების გადაცემის სინქრონიზაციისთვის, სადაც სასიგნალო სხივების სიგანე საკმარისად დიდი უნდა იყოს, რათა დაფაროს მთელი სახმელეთო ფართობი. მეორეც, მონაცემთა გადაცემის სერვისები მოითხოვს უფრო ფართო სიხშირულ ზოლს და, როგორც წესი, ის მწირად ნაწილდება. ამიტომ, სერვისის სხივები მხოლოდ მიწისპირა მომხმარებელთა გარკვეულ უბნებზე უნდა იყოს მიმართული, შემცირებული სიგანით სხივის ფორმირებისას უფრო მაღალი გაძლიერებისთვის. დაბოლოს, LEO თანამგზავრებიდან ფიქსირებულ სახმელეთო სადგურამდე ტრანზიტული უკუგადაცემა შეიძლება განხორციელდეს „წერტილიდან წერტილამდე“ პრინციპით ფიდერული ლინკის სხივით, კიდევ უფრო ვიწრო სხივის სიგანით და უფრო ფართო სიხშირული ზოლით, ვიდრე ზემოთ მოყვანილი ანალოგი.



ნახ. 5.3. სხივის დაგეგმვის ტიპური სცენარები LEO-SAN-ში

2. *სასიგნალო სხივის დაგეგმვა:* LEO-SAN-ში, მიუხედავად სასიგნალო სხივების მიერ გამოყენებული ვიწრო სიხშირული ზოლისა, ლინკის ბიუჯეტი, სავარაუდოდ, არასაკმარისია შეზღუდული სასარგებლო დატვირთვისა და LEO თანამგზავრების მაღალ სიმაღლეზე განთავსების გამო. ამიტომ, სასიგნალო სხივს შეიძლება დასჭირდეს სახმელეთო ფართობის დაფარვა სკანირების რეჟიმში. თითოეული LEO თანამგზავრი ახორციელებს სამიზნე არეალის სკანირებას დროითი დაყოფის რეჟიმში, რათა უზრუნველყოს ეკვივალენტური სრული დაფარვა. ვინაიდან თითოეული სხივი სწრაფად ახდენს სკანირებას, დაუნლინკის და აპლინკის სხივები უნდა იყოს დამოუკიდებლად დაპროექტებული და დაშორებული გარკვეული ინტერვალებით სინქრონული პასუხების უზრუნველსაყოფად.

3. *სერვისის სხივის დაგეგმვა:* სერვისის სხივები ძირითადად გამოიყენება ფიქსირებული/მობილური სერვისების მხარდასაჭერად, რომლებიც მოითხოვენ ფართო სიხშირულ ზოლს. ვინაიდან LEO თანამგზავრები ზოგადად ბევრად უფრო სწრაფად მოძრაობენ, ვიდრე მიწისპირა მომხმარებლები, ფიქსირებული და მობილური სერვისების სხივების დაგეგმვის სტრატეგიები შეიძლება მსგავსი იყოს. LEO თანამგზავრების სასარგებლო დატვირთვის შეზღუდვის გამო, სერვისის სხივების დაგეგმვის მთავარი გამოწვევაა, თუ როგორ გამოვიყენოთ წერტილოვანი სხივების შეზღუდული რაოდენობა მომხმარებლების დიდი რაოდენობის მოსამსახურებლად. შესაძლო გადაწყვეტილებები მოიცავს სხივის ნახტომისებურ გადაწყობას, სერვისის სხივსა და სასიგნალო სხივს შორის ეფექტურ შესაბამისობას და სივრცითი, დროითი და სიხშირული რესურსების ერთობლივ დაგეგმვას. კერძოდ, ნახ. 5.4 ადარებს სერვისის ლინკის გამტარუნარიანობას მრავალსხივიან LEO-თანამგზავრულ სისტემაში, რესურსების დაგეგმვის ორი სქემის გამოყენებით; ანუ განხილულია ადაპტიური რეჟიმი და ფიქსირებული რეჟიმი, კომუნიკაციისას სიხშირული ზოლის სიგანის სხვადასხვა მნიშვნელობების შერჩევის



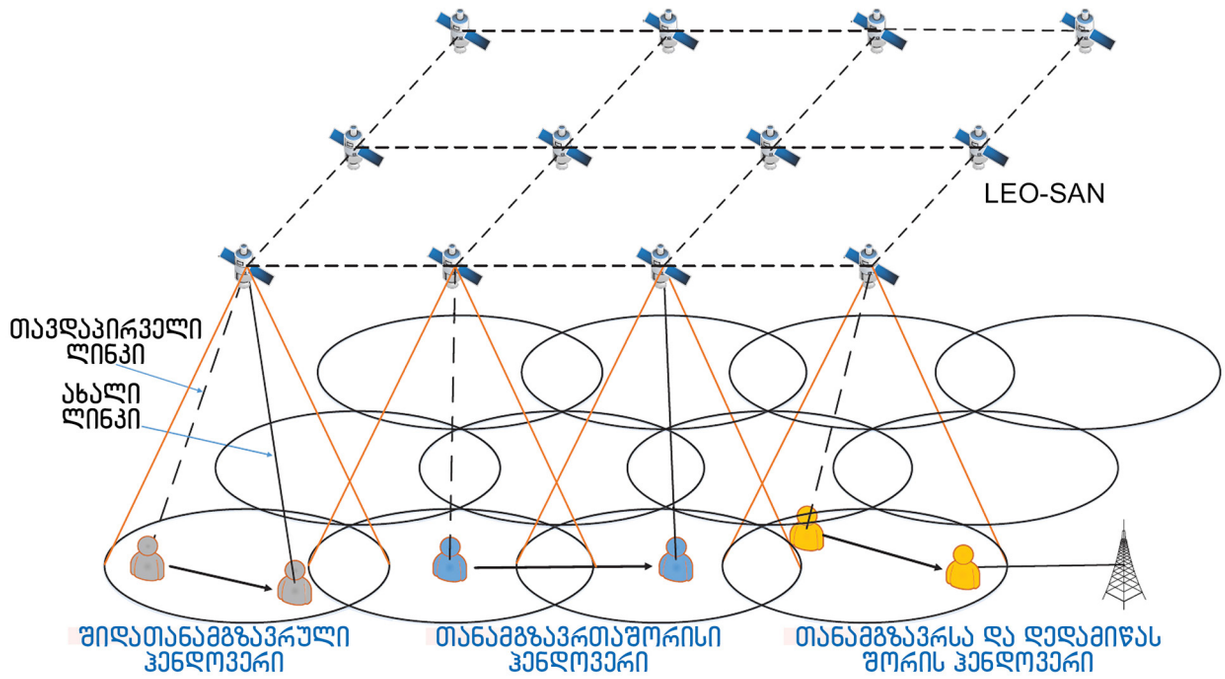
ნახ. 5.4. სერვისის სხივებს შორის გამტარუნარიანობის შედარება ადაპტიური რეჟიმით და ფიქსირებული რეჟიმით დაგეგმვის სტრატეგიების გამოყენებისას, სიხშირული ზოლის სხვადასხვა მნიშვნელობისათვის

დროს. თანამგზავრი ფიქსირებულ რეჟიმში პერიოდულად ცვლის სხივის განათების მიმართულებას და იყენებს ენერგიის განაწილების ერთგვაროვან სტრატეგიას. თუმცა, ფიქსირებული რეჟიმი არ ითვალისწინებს დროში ცვალებად ტრაფიკზე მოთხოვნას და ვერ იყენებს სხივის სივრცით თავისუფლებას. ადაპტიურ რეჟიმში, ჩვენ ერთობლივად ვქმნით სხივის ნახტომისებრი ცვლილების შაბლონს და სიმძლავრის მოქნილ განაწილებას მიწისპირა მომხმარებელთა ტრაფიკის მოთხოვნის განაწილების მიხედვით, შესატყვისობის თეორიისა და მიმდევრობითი ამოზნექილი აპროქსიმაციის მეთოდის საფუძველზე. შეიძლება აღინიშნოს, რომ სხივის დაგეგმვის ადაპტიური რეჟიმი მნიშვნელოვნად აუმჯობესებს ფიქსირებულ რეჟიმს სიხშირული ზოლის სიგანის სხვადასხვა მნიშვნელობებისთვის. ეს იმიტომ ხდება, რომ ადაპტიურ რეჟიმს შეუძლია ეფექტიანად შეამციროს თანაარხის ინტერფერენცია მომხმარებლებს შორის და სრულად გამოიყენოს დროითი, სივრცითი და გადაცემის სიმძლავრის თავისუფლების ხარისხი.

4. *ფიდერის სხივის ლინკის დაგეგმვა:* ფიდერის ლინკი ქსელში მონაცემთა იმპორტისა და ექსპორტის მილსადენია, რომელიც განსაზღვრავს მთელი ქსელის გამტარუნარიანობას. GEO თანამგზავრები სპეციალურად გამოყოფენ ანტენების კომპლექტს, ფიდერის ლინკის სხივებისთვის. თუმცა, LEO თანამგზავრებისთვის, ფიდერის ლინკის სხივმა შეიძლება გაიზიაროს ფაზური მესრის ანტენების ერთი კომპლექტი სერვისის სხივთან, კომუნიკაციის სასარგებლო დატვირთვისთვის შეზღუდული ბიუჯეტის გამო. მომავალში, LEO თანამგზავრების მსუბუქი წონისა და მინიატურიზაციის მისაღწევად, სერვისის და ფიდერის ლინკის სხივების ინტეგრაცია ასევე მნიშვნელოვანი განვითარების ტენდენციაა, რაც ასევე აჩენს ამ ორი ტიპის სხივებს შორის ინტერფერენციის პრობლემას. მათი ორმხრივი ინტერფერენციის შესამცირებლად, ჩვენ შეგვიძლია ოპტიმალურად განვახორ-ციელოთ საკომუნიკაციო რესურსების (როგორიცაა, სიხშირული ზოლის სიგანე, სიმძლავრე და ცენტრალური სიხშირე) განაწილების სტრატეგია სერვისისა და ფიდერის ლინკის სხივებისთვის.

ჰენდოვერის მართვა:

LEO-SAN-ში ჰენდოვერი შეიძლება დაიყოს, როგორც თანამგზავრული სხივის შიდა ჰენდოვერი, თანამგზავ-რთაშორისი სხივის ჰენდოვერი და თანამგზავრი-დედამიწა სხივის ჰენდოვერი, როგორც ნაჩვენებია ნახ. 5.5-ზე. თანამგზავრების მაღალი მობილურობა და მომხმარებლის მასობრივი გადაადგილების გაურკვევლობა იწვევს ახალ სირთულეებს და გამოწვევებს ჰენდოვერის მართვაში. ამას მივყავართ სხივის ხშირ გადამისამართებასთან



ნახ 5.5. სხივის ჰენდოვერის სცენარები LEO-SAN-ში

და ჰენდოვერთან, რაც მნიშვნელოვნად ზრდის სიგნალის შეყოვნებას და გადაცემის ღირებულებას და, ამასთან ერთად, სერიოზულად მოქმედებს მომხმარებლის მომსახურების ხარისხზე. ამ პრობლემების გადასაჭრელად, ჰენდოვერის მართვის სტრატეგია შეიძლება გაუმჯობესდეს ჰენდოვერზე გადაწყვეტილების მიღების და ჰენდოვერის პროცესის ორი ასპექტიდან.

1. *გადაწყვეტილება ჰენდოვერზე:* ჰენდოვერის შესახებ გადაწყვეტილება ჰენდოვერის მართვის კრიტიკული ეტაპია მომხმარებლის მიერ შემდეგი სხივის არჩევის დასადგენად. ლიტერატურაში ფართოდ არის მიღებული ჰენდოვერზე გადაწყვეტილების მიღების მრავალმეტრიკული მეთოდი, რომელიც ძირითადად ითვალისწინებს მიღებული სიგნალის სიმძლავრეს (RSS), მომსახურების დროს, უმოკლეს მანძილს, არხის რესურსებს, ბიტის გადაცემის ხელმისაწვდომ სიჩქარეს (ABR), შეყოვნებას, ფარდობით სიჩქარეს და ქსელის ოვერჰედს. თუმცა, რადგან ტრადიციული მეთოდი ითვალისწინებს მხოლოდ არსებულ მდგომარეობას, ძნელია ჰენდოვერზე გადაწყვეტილების ოპტიმიზაციის პრობლემის გადაჭრა, რომელიც არის მაღალგანზომილებიანი და უაღრესად დინამიური, რაც იწვევს მომხმარებლის მიერ ხშირ, მაგრამ არასაჭირო ჰენდოვერს და ამცირებს წარმატებული ჰენდოვერის სიხშირეს. ამ საკითხის გადასაჭრელად შესაძლებელია უფრო მოწინავე და ზუსტი, ღრმა განმტკიცებული სწავლების მეთოდების გამოყენება ჰენდოვერზე გადაწყვეტილების მისაღებად. არ არის საჭირო გარემოს წინასწარ ცოდნა და გრძელვადიანი სარგებელი შეიძლება მაქსიმალურად იქნეს მიღებული გამოცდილებისა და ჯილდოების დაგროვებით და ტრენინგით.

2. *ჰენდოვერის პროცესი:* ჰენდოვერის პროცესი გულისხმობს მომხმარებლის მიერ გადადგმული ნაბიჯების განსაზღვრას ჰენდოვერის კონკრეტულ შემთხვევაში. ინფორმაციის გადაცემის სიზუსტის უზრუნველსაყოფად საჭიროა ინფორმაციის მრავალსაფეხურიანი გაცვლა. თუმცა, წვდომის პროცესისგან განსხვავებით, ჰენდოვერის პროცესი მოიცავს სასიგნალო ურთიერთქმედებას თავდაპირველ BS–ს, სამიზნე BS–ს და მომხმარებელს შორის, ასევე კარიბჭის სადგურის მიერ მონაცემთა გადაცემას. ამიტომ, გადაცემის ეფექტიანობის გაუმჯობესების მიზნით, ერთი მხრივ, აუცილებელია გადაცემის პროცესის მაქსიმალურად გამარტივება ქსელის არქიტექტურის თვალსაზრისით. მაგალითად, CN და რადიოწვდომის ქსელის (RAN) არქიტექტურების შერწყმამ შეიძლება ეფექტიანად გაამარტივოს ჰენდოვერის პროცესი. მეორე მხრივ, განმტკიცებული სწავლების მეთოდი, რომელიც ითვალისწინებს გრძელვადიან სარგებელს, შეიძლება გამოყენებულ იქნეს მომხმარებლის ტერმინალებზე ჰენდოვერის მიმართულებით წინასწარი გონივრული გადაწყვეტილებების მისაღებად, რათა სამიზნე BS–მა შეძლოს სიგნალის ადრეული კონფიგურირება და სწრაფი ჰენდოვერის განხორციელება.

3. *ჯგუფური ჰენდოვერი.* ჰენდოვერზე გადაწყვეტილების მიღების ალგორითმი და ჰენდოვერის პროცესი, რომელიც ზემოთ იყო განხილული, ძირითადად განკუთვნილია ერთი მომხმარებლის სცენარისთვის. ჯგუფური ჰენდოვერი ნიშნავს, რომ მომხმარებელთა ჯგუფი ერთად ახორციელებს ჰენდოვერს. როდესაც ერთი LEO თანამგზავრი გადადის მისი თავდაპირველი დაფარვის ზონიდან დიდი სიჩქარით, ჰენდოვერი დაიწყება ერთდროულად მრავალი მომხმარებლის მიერ, რაც იწვევს ჰენდოვერის მოთხოვნაზე ძლიერ სასიგნალო შეტევებს და მნიშვნელოვნად გაზრდის ჰენდოვერის პროცესში შეჯახების ალბათობას. ამიტომ, ჯგუფური ჰენდოვერი გახდა ახალი კვლევის მიმართულება LEO–SAN–ის ჰენდოვერის მართვის სფეროში. თანამგზავრებზე ჰენდოვერის მოთხოვნისას სასიგნალო შტორმების თავიდან ასაცილებლად, მომხმარებლები შეიძლება დაჯგუფდეს მდებარეობის ან ბიზნესის მიხედვით და შეიძლება შეირჩეს ერთი წარმომადგენელი, როგორც ჰენდოვერის გამომწვევი მომხმარებელი, რომელიც ატარებს სხვა მომხმარებლების ინფორმაციას თითოეულ ჯგუფში. გარდა ამისა, მრავალრიცხოვანი ჯგუფური ჰენდოვერის პროცესში, შეჯახების მაღალი ალბათობა იწვევს ჰენდოვერის წარუმატებლობის მაღალ სიხშირეს. ამიტომ, მომხმარებელთა შორის არსებული კორელაციები, როგორიცაა მათი ჰენდოვერის თანმიმდევრობა და ა. შ., სრულად უნდა იქნეს მხედველობაში მიღებული, ხოლო განმტკიცებული სწავლების მეთოდი შეიძლება გამოყენებულ იქნეს ჰენდოვერის უფრო ეფექტიანი სტრატეგიების უზრუნველსაყოფად.

სხივის რესურსების მართვა:

LEO–SAN, როგორც წესი იყენებს მრავალსხივიანი დაფარვის სქემებს, რათა მოემსახუროს მრავალ მომხმარებელს, რომლებიც შეიძლება შორს იყვნენ ერთმანეთისგან. ქსელის მუშაობის გასაუმჯობესებლად საჭიროა სხივის რესურსების მართვის მოწინავე სტრატეგიები. სხივის რესურსების მართვა ძირითადად ეხება

სხივის რესურსების მასობრივი მომხმარებლებისთვის განაწილების სტრატეგიებს, რომლებიც მიზნად ისახავს რაც შეიძლება მეტი მომხმარებლის მომსახურებას LEO თანამგზავრებზე შეზღუდული სხივური რესურსებით. სხივის რესურსების მართვის კლასიკური სქემები იყენებს რესურსების განაწილების ერთგვაროვან სტრატეგიას მიწისპირა მომხმარებლებისთვის. თუმცა, ერთიანი განაწილების მეთოდი არაეფექტიანია სასარგებლო დატვირთვის შეზღუდვისა და მოთხოვნების არათანაბარი განაწილების პირობებში. ამიტომ, მრავალგანზომილებიანი რესურსების ეფექტიან დაგეგმვასა და კოსმოსურ გამოთვლით რესურსებს შორის კონფლიქტის გამო წამოჭრილი ამოცანა, თუ როგორ მოხდეს სხივის რესურსების დაგეგმვის კოორდინაცია სივრცით, დროით, სიხშირულ, სიმძლავრის და სხვა დომენებში, დიდი გამოწვევა იქნება მომავალი კვლევისთვის.

1. *რესურსების მართვის სირთულე და შესაძლო გადაწყვეტილებები:* LEO SAN–ში სიმძლავრის და სიხშირული რესურსები შეზღუდულია, ხოლო სხივების რაოდენობა გაცილებით მცირეა, ვიდრე მომხმარებლების რაოდენობა. LEO თანამგზავრული თანავარსკვლავედის მასშტაბის უწყვეტი და სწრაფი ზრდით, მულტიდო–მენური რესურსების ოპტიმიზაციის ცვლადი განზომილება სწრაფად იზრდება, რაც ზრდის თანავარსკვლავედის რესურსების დაგეგმვის სირთულეს. სხივის ნახტომისებრი ცვლილება განაპირობებს სხივის მიმართულების დიაგრამის დიზაინის მეთოდის, სიმძლავრის განაწილების და გადამტანი სიხშირის ერთობლივ ოპტიმიზაციას. ჩვენ შეგვიძლია ერთობლივად გამოვიყენოთ ამოზნექილი ოპტიმიზაციის მეთოდი, შესატყვისობის თეორია, მანქანური სწავლება და ლაგრანჟის რელაქსაციის მეთოდი სხივის გადაწყობის პრობლემების გადასაჭრელად. ფიქსირებული სხივის რესურსების განაწილების ტრადიციულ სტრატეგიასთან შედარებით, მას შეუძლია მნიშვნელოვნად გააუმჯობესოს ქსელის ეფექტიანობა და უზრუნველყოს მოთხოვნილი რესურსების განაწილება მრავალგანზომილებიანი რესურსების დაგეგმვით, როგორიცაა სხივი, სიხშირული დიაპაზონი, დროითი ინტერვალი და სიმძლავრე.

2. *ინტერფერენციის მართვა თანავარსკვლავედში:* LEO–SAN, თავისი უნიკალური მახასიათებლებისა და შეზღუდვების გამო, იძულებულია შეეგუოს ინტერფერენციას სხვადასხვა ხელშემშლელი წყაროებიდან, ისეთებს, როგორიცაა ინტერფერენცია მცირემასშტაბიანი თანავარსკვლავედის შიგნით, ინტერფერენცია დიდმასშტაბიან თანავარსკვლავედებს შორის და ინტერფერენცია ინტეგრირებულ სისტემაში თანამგზავრი–დედამიწა. ამიტომ, მომხმარებლის სხვადასხვა სერვისების საიმედოდ მხარდაჭერის მიზნით, ინტერფერენციების მართვა განიხილება ერთ–ერთ ძირითად ტექნოლოგიად ინტეგრირებულ ქსელში შეზღუდული სიხშირული და ენერგეტიკული რესურსების სრულად გამოყენებისათვის. თანავარსკვლავედის შიგნით ინტერფერენცია შეიძლება აღმოიფხვრას წინასწარი კოდირების საშუალებით. რაც შეეხება თანავარსკვლავედებს შორის ინტერფერენციას, ის შეიძლება აღმოიფხვრას ქსელის სწორი დაგეგმვით. გარდა ამისა, ერთ–ერთი შესაძლო გამოსავალი შეიძლება იყოს შრეთაშორისი სისტემის შექმნა, რათა GEO თანამგზავრებს შეეძლოთ სხვა LEO სისტემების კონტროლი. რაც შეეხება ინტერფერენციას ინტეგრირებულ სისტემაში თანამგზავრი–დედამიწა, მისი მართვა შეიძლება განხორციელდეს მაშინ, როდესაც ინტეგრირებული ქსელი მუშაობს სპექტრის გაზიარების პირობებში.

5.4. დოპლერის ეფექტის მიმართ მდგრადი გადაცემის ტექნოლოგია

LEO–SAN–ში, LEO თანამგზავრების მაღალი მობილურობა იწვევს სიგნალზე დოპლერის წანაცვლებით გამოწვეულ მძიმე ეფექტებს. მაგალითად, LEO–SAN–ის გადაცემული სიგნალები S სიხშირულ დიაპაზონში (2–4 გჰც) განიცდის დოპლერის წანაცვლებას ±48 კჰც–მდე, რაც ბევრად აღემატება მომხმარებლის მოწყობილობის ტიპური გენერატორის საწყის უზუსტობას (შეადგენს დაახლოებით 20 კჰც–ს). დოპლერის ძლიერმა წანაცვლებამ შეიძლება გამოიწვიოს არასასურველ დროით შუალედში ამორჩევითი სწრაფი ფედინგი, რაც გამოიწვევს არხის შეფასების და სიგნალის დეტექტირების პროცესის გაუარესებას. ამ მიზნით, არსებული ლიტერატურა, რომელიც ფოკუსირებულია დოპლერის წანაცვლების შეფასებასა და კომპენსაციაზე, ძირითადად ეფუძნება კლასიკური მოდულაციის სქემებს, როგორიცაა ერთგადამტანიანი მოდულაცია და ასევე, მულტიპლექსირება ორთოგონალური სიხშირული დაყოფით (OFDM). თუმცა, ჯერ კიდევ რჩება გადაუჭრელი

მნიშვნელოვანი პრობლემები დოპლერის სიხშირის მნიშვნელოვანი წანაცვლების ეფექტიანად მოსაგვარებ-ლად, როგორებიცაა ბიტზე შეცდომის ალბათობის ცუდი მნიშვნელობა, სიხშირულ გადამტანთა შორის მაღალი ინტერფერენცია და პილოტ-სიგნალის დაბალი სპექტრული ეფექტიანობა. შესაბამისად, შემოთავაზებულია რამდენიმე ახალი, დოპლერის ეფექტის მიმართ მდგრადი საკომუნიკაციო სიგნალთა ფორმა, მათ შორის ორთოგონალური დროითი-სიხშირული სივრცითი (OTFS) მოდულაცია და ვექტორული OFDM (VOFDM).

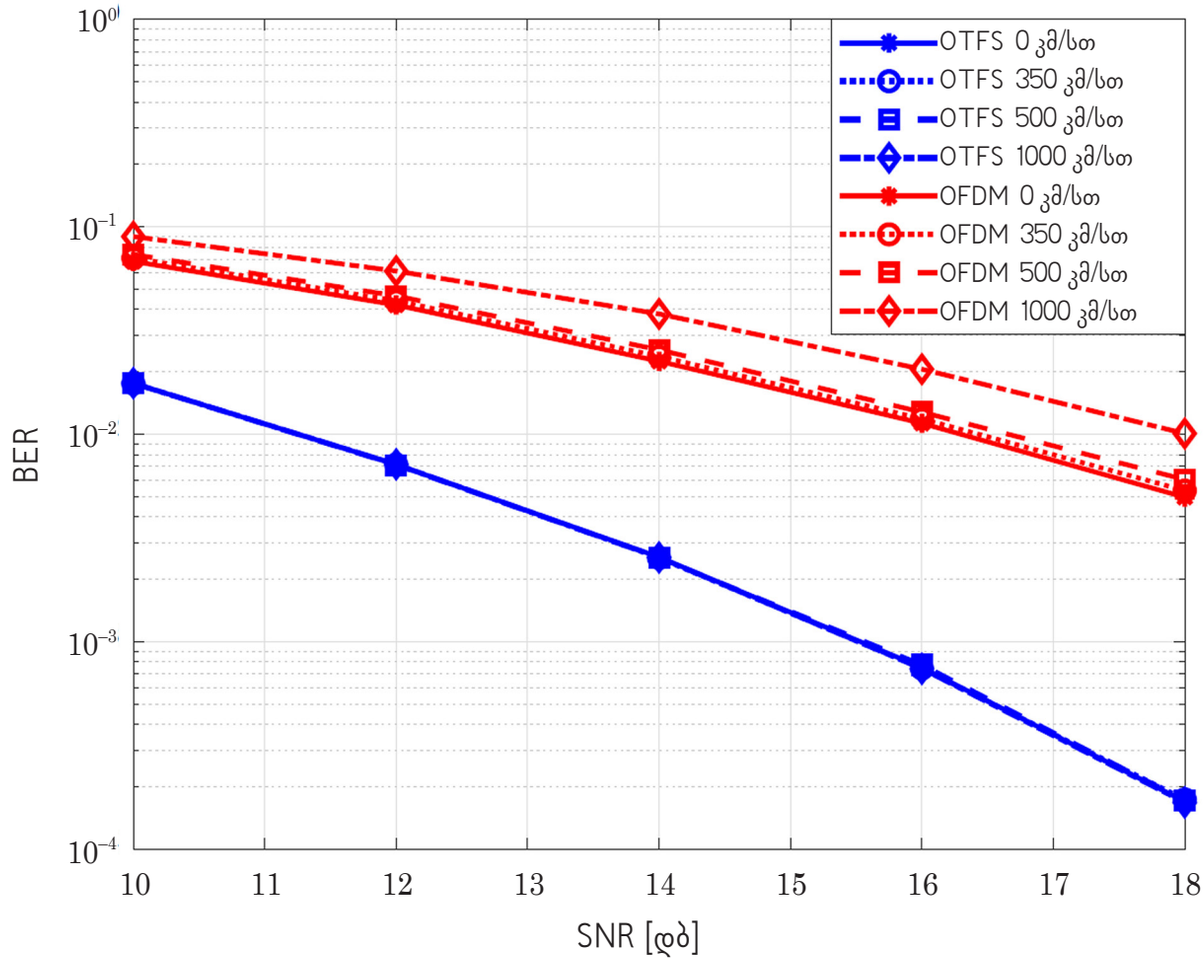
დოპლერის ეფექტის მიმართ მდგრადი გადაცემის მეთოდი ერთგადამტანიანი და OFDM მოდულა-ციებისთვის:

ერთგადამტანიანი მოდულაციის სისტემისთვის, დოპლერის წანაცვლება გაზრდის მიმღების დემოდულაციის სირთულეს და გამოიწვევს მახასიათებლების გაუარესებას. OFDM და სხვა მრავალგადამტანიანი გადამცემი სისტემებისთვის, დოპლერის წანაცვლებამ შეიძლება გამოიწვიოს გადამტანებს შორის ინტერფერენცია და გააუარესოს სიგნალის დეტექტირების მახასიათებელი. ზემოაღნიშნული პრობლემების გადასაჭრელად, ქვეგადამტანის ინტერვალი შეიძლება გაიზარდოს ქვეგადამტანებს შორის ინტერფერენციის შესამცირებლად, ან პილოტ-სიგნალების მიმდევრობის სიგრძე შეიძლება გაიზარდოს დოპლერის ეფექტის შეფასების და კომპენსაციის სიზუსტის გასაუმჯობესებლად. თუმცა, ზემოაღნიშნული მეთოდები აუცილებლად გამოიწვევს სპექტრული ეფექტიანობის შემცირებას, რაც ართულებს მასობრივი მომხმარებლების მაღალსიჩქარიანი კომუნიკაციების მოთხოვნის დაკმაყოფილებას. გარდა ამისა, დოპლერის წანაცვლების შეფასების და კომპენსაციის არსებული ალგორითმები დამოკიდებულია SNR-ის მაღალ ზღურბლზე და ფიზიკური არხის ნელ ცვალებადობაზე. აქედან გამომდინარე, მათი მახასიათებლები შეიძლება დეგრადირებული იყოს LEO თანამგზავრული კომუნიკაციების მაღალი მანევრირებისა და დიდი მანძილების სცენარების პირობებში.

დოპლერის ეფექტის შემცირების მოდულაციის ახალი სქემა:

არსებული მოდულაციის მეთოდების გამოყენებით, დოპლერის ეფექტით გამოწვეული პრობლემების თავიდან ასაცილებლად, როგორც ეს ნაჩვენებია ზემოთ, შემოთავაზებულია ახალი ორგანზომილებიანი მოდუ-ლაციის სქემა, კერძოდ OTFS. კლასიკური დროითი-სიხშირული მოდულაციის ფორმატებისგან განსხვავებით, OTFS ახორციელებს მოდულაციას დოპლერის შეყოვნების დომენში, რაც ბუნებრივად უფრო შესაფერისია დროის მიხედვით ცვალებად პარამეტრებიან უსადენო გავრცელების არხებში გადაცემისთვის. ეს გამოწვეულია იმით, რომ ორგანზომილებიანი ტრანსფორმაციების სერიის შესრულებით, დროითი-სიხშირული არხი ორმაგი დისპერსიით გარდაიქმნება დოპლერის შეყოვნების დომენში ისეთ არხად, სადაც თითქმის არ არის ინტერ-ფერენცია. ნახ. 5.6 გვიჩვენებს ბიტზე შეცდომის ალბათობის (BER) მახასიათებლის შედარებას OTFS-სა და კლასიკურ OFDM-ს შორის დოპლერის წანაცვლების სხვადასხვა დონეზე. კერძოდ, განიხილება სხვადასხვა ფარდობითი სიჩქარე კოსმოსურ და მიწისპირა ტრანსივერებს შორის, ანუ 0 კმ/სთ, 350 კმ/სთ, 500 კმ/სთ და 1000 კმ/სთ. სიმულაციებში მოდულაციისთვის გამოიყენება კვადრატული ფაზური მოდულაცია (QPSK). გარდა ამისა, OFDM-ის ფურიეს სწრაფი გარდაქმნის (FFT) ზომა ტოლია 256-ის, ხოლო გადაცემული სიმბოლოს მატრიცის ზომა დოპლერის შეყოვნების დომენში ტოლია 256 × 14-ის OTFS-ისთვის. შეინიშნება, რომ, ერთი მხრივ, OFDM განიცდის კომუნიკაციის ცუდ მახასიათებელს დოპლერის ძლიერი წანაცვლების გამო. მეორე მხრივ, OTFS-ს შეუძლია მიაღწიოს მახასიათებლის მნიშვნელოვან გაუმჯობესებას კლასიკურ OFDM-თან შედარებით, რაც ადასტურებს მის უპირატესობას დოპლერის წანაცვლების მიმართ წინააღმდეგობის გაწევის თვალსაზრისით. გარდა ამისა, თითქმის ივივე BER მახასიათებელი შეიძლება მიღწეულ იქნეს OTFS-ის სხვადასხვა სიჩქარით. ეს კიდევ უფრო კარგად აჩვენებს მის რობასტულობას დოპლერის წანაცვლების ეფექტის სხვადასხვა დონის მიმართ. თუმცა, ვინაიდან მიღებული სიგნალები უტოლდება ორგანზომილებიან წრიულ კონვოლუციას მოდულირებულ სიმბოლოებსა და არხის კოეფიციენტებს შორის დოპლერის დაყოვნების დომენში, რთული იქნება არხის შეფასების და ექუალიზაციის (არხში გადაცემული სიგნალის დამახინჯების აღმოფხვრის) ეფექტიანი დიზაინი. ეს ამოცანები შეიძლება კიდევ უფრო რთული იყოს OTFS სისტემებისთვის, რომლებიც აღჭურვილია ფართომასშტაბიანი საანტენო მესრებით, რაც, როგორც წესი, პრაქტიკულია LEO-SAN-ისთვის საკომუნიკაციო გზებზე მძიმე დანაკარგების კომპენსაციისთვის.

ამის საპირისპიროდ, VOFDM შემოთავაზებული იყო, როგორც კლასიკური OFDM-ის და ერთგადამტანიანი სისტემების ზოგადი ფორმატი ერთი გადამცემი ანტენით, კარგი რობასტულობით დროში ცვალებადი არხებისთვის.



ნახ. 5.6. OTFS და OFDM სქემების მიხედვით BER-ის შედარება დოპლერის წანაცვლების სხვადასხვა დონისთვის

საინტერესოა, რომ სიგნალები დისკრეტულ ან უწყვეტ VOFDM ფორმატში ემთხვევა OTFS-ს გადამცემის მხარეს. ზემოთ მოყვანილი მაგალითის შესაბამისად, ნახ. 5.6-ზე OTFS გადაცემული მიმდევრობა უდრის ანალოგიურ VOFDM მიმდევრობას ვექტორული ზომით 14. ქვემოთ, ჩვენ წარმოვადგენთ მოსაზრებებს იმის ახსნით, თუ რატომ არის სასურველი OTFS (ან VOFDM) დოპლერის წანაცვლების ეფექტთან გასამკლავებლად VOFDM-ის პერსპექტივიდან გამომდინარე. როგორც ნაჩვენებია ლიტერატურაში, VOFDM-ს შეუძლია მიაღწიოს მრავალგზიან განცალკევებას და/ან სიგნალთა სივრცით განცალკევებას, თუნდაც მინიმალური საშუალო კვადრატული ცდომილების (MMSE) წრფივი მიმღებით ვექტორიზებულ ქვეარხში. ეს იმიტომ ხდება, რომ VOFDM-ში, გადამცემის მხარეს, ინფორმაციის სიმბოლოების ვექტორი განიცდის არაცხად ფურიეს დისკრეტულ გარდაქმნას (DFT) (ფურიეს დისკრეტულ უკუგარდაქმნას (IDFT)) და შემდეგ, მიმღების მხარეს, ამ ვექტორში ინფორმაციული სიმბოლოები დემოდულირებულია ერთად. უფრო კონკრეტულად, ვინაიდან VOFDM-ში არხის ვექტორიზებული მატრიცა არის ფსევდოცირკულანტი მატრიცა, მისი დიაგონალიზაცია შესაძლებელია DFT/IDFT მატრიცის გამოყენებით ფაზური წანაცვლების დიაგონალური მატრიცით. ამრიგად, ინფორმაციული სიმბოლოების ვექტორის ეს DFT (ან IDFT) დამუშავება მსგავსია ერთანტენიან სისტემებში წინასწარი კოდირების გამოყენებისა, სიგნალთა სივრცითი განცალკევების მისაღწევად უსადენო ფედინგის წინააღმდეგ საბრძოლველად, ან დიაგონალური სივრცით-დროითი ბლოკური კოდირების გამოყენებისა MIMO სისტემებში სივრცითი განცალკევების მისაღწევად. შედეგად მიღებულმა განცალკევების მოგებამ შეიძლება ეფექტიანად შეამციროს არხში დროის მიხედვით შერჩევითი ფედინგი, რომელიც გამოწვეულია დოპლერის წანაცვლებებით.

5.5. მომავალი კვლევების პერსპექტივა 6G-ის მიმართულებით

როგორც უკვე აღინიშნა, 5G-ის უწყვეტი კომერციალიზაციის პირობებში, 6G კვლევა ასევე მიმდინარეობს. მოსალოდნელია, რომ LEO-SAN მნიშვნელოვან როლს შეასრულებს მომავალი 6G უსადენო ქსელების დანერგვაში, რაც საჭიროებს შემდგომ შესწავლას. ამიტომ, ჩვენ ვაჯამებთ კვლევის რამდენიმე შესაძლო მიმართულებას, რაც სასარგებლო იქნება ინდუსტრიისა და აკადემიური წრეებისათვის.

1. *ქსელის მოქნილი არქიტექტურა და ვირტუალური ქსელის ფუნქციის (VNF) დანერგვა:* LEO-SAN-ის მომავალი განვითარება მოითხოვს ქსელის არქიტექტურის მოქნილობის შემდგომ გაუმჯობესებას. გარდა ძირითადი ქსელის გამარტივებისა და წვდომის ქსელის სერვიტიზაციისა, ტექნოლოგიები, როგორიცაა პროგრამული უზრუნველყოფით განსაზღვრული ქსელი (SDN), ქსელის ფუნქციის ვირტუალიზაცია (NFV) ასევე შეიძლება გამოყენებულ იქნეს ბორტზე RAN და CN VNF-ების მოქნილად განსათავსებლად, რომლებსაც შეუძლიათ ეფექტური დატვირთვის დაბალანსების მხარდაჭერა, უწყვეტი ჰენდოვერის რეალიზაცია და რესურ-სების დინამიური განაწილება LEO-SAN-ში.

2. *ეფექტიანი მასობრივი წვდომა:* მოსალოდნელია, რომ LEO-SAN უზრუნველყოფს მასობრივ წვდომას მილიარდობით მომხმარებლისთვის მთელ მსოფლიოში მომავალ 6G ქსელებში, რომლებიც მრავალი პრობლემის წინაშე დგანან; მათ შორისაა კონკურენცია რესურსების მოთხოვნის პროცესში, პრეამბულების შეჯახება, მაღალი სასიგნალო ოვერჰედი და ა. შ. ეს საჭიროებს მოწინავე ტექნიკურ გადაწყვეტილებებს, მაგალითად, გრანტისგან თავისუფალ შემთხვევით წვდომას, რომელიც დაფუძნებულია კომპრესიულ ზონდირებაზე და სავარაუდოდ გადალახავს კლასიკური შემთხვევითი წვდომის ანალოგების მომხმარებლთა გამტარუნარიანობის შეზღუდვებს.

3. *სხივის მართვა მოთხოვნის ბაზაზე:* 6G მიზნად ისახავს მიაღწიოს უწყვეტ გლობალურ დაფარვას და უზრუნველყოს QoS-ის მაღალი დონე მომხმარებლებისთვის ნებისმიერ დროს და ნებისმიერ ადგილას. აქედან გამომდინარე, სასიგნალო, სერვისის და ფიდერის სხივები მოითხოვს მაღალეფექტიან, რეალურ დროში და დინამიურ მართვის მეთოდებს, რომლებიც დაფუძნებულია მომხმარებლის ტერმინალის სპეციფიკურ მოთხოვნებზე. ამ მიზნით, უახლესი ტექნოლოგიები, როგორიცაა ხელოვნური ინტელექტი (AI), ინტელექტუალური ოპტიმიზაცია და ა. შ., შეიძლება დაინერგოს LEO-SAN-ისთვის მოთხოვნილი სხივების მართვის სტრატეგიების შემუშავებაში.

4. *ჯგუფური ჰენდოვერი:* მომავალში, რაც უფრო მეტი LEO თანამგზავრი გადაადგილდება ერთმანეთის მიმართ დიდი სიჩქარით, მომხმარებელთა ჰენდოვერის სასიგნალო შტორმი და გადატვირთვა უფრო მწვავე გახდება. ამ პრობლემის მოსაგვარებლად, ჯგუფური ჰენდოვერის და მანქანური სწავლების კომბინაცია ითვლება პერსპექტიულ გადაწყვეტად, რათა ჰენდოვერის სტრატეგია იყოს უფრო ადაპტირებული დინამიურ სცენარებთან და ისინი უფრო საიმედო გახადოს.

5. *ინტელექტუალური ამრეკლავი ზედაპირი (IRS):* IRS არის დიდი ელექტრომაგნიტური ზედაპირი, რომელიც შედგება დიდი რაოდენობით იაფფასიანი პასიური ამრეკლავი ელემენტებისაგან, რომელსაც შეუძლია შეამციროს LEO-ს თანამგზავრზე დამონტაჟებული გადამცემის აპარატურის ღირებულება კლასიკური ფაზური მესრის ანტენების შეცვლით. თუმცა, IRS-ის აპარატურის შეზღუდვები, მათ შორის ფაზის დისკრეტული წანაცვლება და ფაზაზე დამოკიდებული ამპლიტუდის კოეფიციენტი, იწვევს სხივის ანალოგური ფორმირების მახასიათებლის დეგრადაციას და დიდ სირთულეებს უქმნის კვადრატული ამპლიტუდის მოდულაციის (QAM) გამოყენებას, რაც საჭიროებს შემდგომ დეტალურ გამოკვლევას.

6. *კოსმოსური-საჰაერო-სახმელეთო ინტეგრირებული ქსელი:* LEO-SAN შეიძლება გაერთიანდეს როგორც საჰაერო, ასევე სახმელეთო წვდომის ქსელთან, რაც წარმოადგენს პერსპექტიულ კოსმოსურ-საჰაერო-სახმელეთო ინტეგრირებულ ქსელს, რომელიც, სავარაუდოდ, მიაღწევს ახალ ეტაპს საყოველადგილო დაფარვისა და მონაცემთა ძალზე მაღალი გამტარუნარიანობის მიღწევის პროცესში. მისი პრაქტიკული განხორციელების გასაადვილებლად აუცილებელია მოწინავე სტრატეგიების შემუშავება ისეთი მიმართულებებით, როგორებიცაა, ქსელებს შორის უწყვეტი ჰენდოვერი, წვდომა მოთხოვნის შესაბამისად, დატვირთვის დაბალანსება, კავშირის მართვა და ა. შ.

5.6. მეხუთე თავის დასკვნა

მოსალოდნელია, რომ LEO-SAN იქნება პერსპექტიული ტექნოლოგია, რომელიც შეავსებს ტერესტრიალურ ფიჭურ ქსელებს მომავალი 6G უსადენო ქსელებისთვის, გამტარუნარიანობისა და სიგნალის დაფარვის მნიშვნელოვნად გაზრდით. ეს თავი გვთავაზობს LEO-SAN-ის კვლევისა და განვითარების მიმოხილვას. კერძოდ, განხილულია LEO-SAN-ის არსებული პრობლემები შემთხვევითი წვდომის, სხივის მართვის და დოპლერის ეფექტის მიმართ მდგრადი გადაცემის ტექნოლოგიების კუთხით. ეს პრობლემები, ძირითადად, გამოწვეულია LEO თანამგზავრების მაღალი მობილურობით და თანამგზავრსა და დედამიწას შორის არსებული ლინკების დიდი მანძილით. ეს თავი ასევე ასახავს რამდენიმე შესაძლო გადაწყვეტას ამ პრობლემების მოსაგვარებლად და მომავალი კვლევის მოტივაციისთვის. ვიმედოვნებთ, რომ ამ თავში წარმოდგენილი მასალა გახდება სასარგებლო წყარო LEO-SAN ტექნოლოგიების შესწავლისა და სამომავლო განვითარებისთვის.

თავი 6 მიწისქვეშა-თანამგზავრული კავშირის სისტემის არქიტექტურა და ტექნიკური შესაძლებლობები

6.1. შესავალი

უსადენო მიწისქვეშა სენსორული ქსელები (WUSN) კონკრეტულ ადგილზე (in situ) აკონტროლებენ სხვადასხვა მიწისქვეშა ობიექტებს უსადენოდ დაკავშირებული მიწისქვეშა სენსორების გამოყენებით. მიუხედავად იმისა, რომ WUSN ქსელებს არ სჭირდებათ მონაცემთა გადაცემის მაღალი სიჩქარე და შეუძლიათ აიტანონ მონაცემთა გადაცემის შეყოვნებები, ენერგოეფექტიანი კომუნიკაცია სასიცოცხლოდ მნიშვნელოვანია ბატარეით მომუშავე მიწისქვეშა სენსორებისთვის. ამიტომ, დაბალი სიმძლავრის ფართო არეალის ქსელის (LPWAN) ტექნოლოგია ხელსაყრელია WUSN-ებისთვის. ლიტერატურაში ახლახან იქნა გამოკვლეული მიწისქვეშიდან მიწის ზედაპირზე დაკავშირების შესაძლებლობა LPWAN-ის კლასის მასობრივი მანქანური ტიპის კომუნიკაციის (mMTC) უსადენო ტექნოლოგიების გამოყენებით და პირველადი შედეგები ხაზს უსვამს იმას, რომ mMTC-ზე დაფუძნებულ WUSN-ებს შეუძლიათ მოიცავდნენ მრავალ აპლიკაციას, რომელთა შორისაა

სოფლის „ჭკვიანი“ მეურნეობა:

სურსათზე გლობალური მოთხოვნების დასაკმაყოფილებლად, რომელთა გაორმაგება მოსალოდნელია 2050 წლისთვის, ინოვაციური 5G ვერტიკალები ხელს უწყობენ სოფლის ჭკვიან მეურნეობას, რათა მოპოვებული იქნეს ზუსტი ინფორმაცია სენსორებისგან გადაწყვეტილების დროული მიღების, ზუსტი დისტანციური მართვისა და ტექნიკური ხარჯების მინიმიზაციისთვის. WUSN-ები ჭკვიანი მეურნეობისა და სარწყავი მონიტორინგის სისტემებისთვის გვპირდება მოსავლიანობის გაზრდას შორეულ რაიონებში, სადაც წყლის რესურსები მწირია და მუშახელის მოზიდვის პრობლემაა.

მიწისქვეშა მილსადენების მონიტორინგი:

მიწისქვეშა მილსადენები თანამედროვე ცივილიზაციის სასიცოცხლო ხაზია, რომელიც აწვდის წყალს, ბუნებრივ აირს და ნედლ ნავთობს ასობით კმ-მდე მანძილზე. დიდ მილსადენებზე ხშირი ავარიები იწვევს მნიშვნელოვან ეკონომიკურ ხარჯებს, გარემოს სერიოზულ დაბინძურებას და მსხვერპლს. ძალიან რთულია მილსადენის პოტენციური რისკების გამოვლენა შორეულ რეგიონებში ან სოფლად, მაშინ როდესაც mMTC-ზე დაფუძნებულ WUSN-ებს შეუძლიათ უზრუნველყონ ტექნოლოგიური დახმარება, მაგალითად, რეალურ დროში გაჟონვის გამოვლენისა და მიწისქვეშა მილსადენის მყიფე მონაკვეთების ლოკალიზაციის გზით.

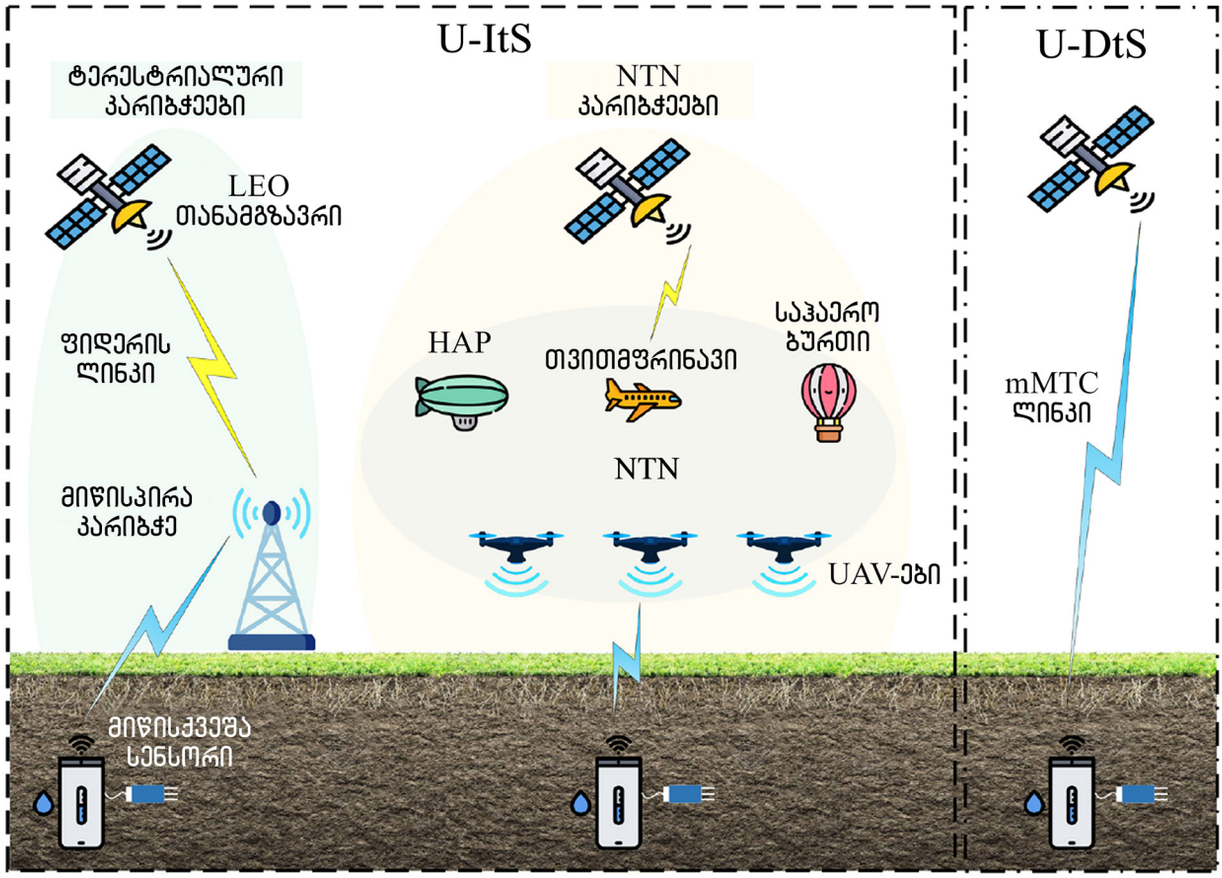
კატასტროფების სამაშველო ოპერაციები:

პოზიციონირების სისტემები გადამწყვეტია სტიქიური უბედურებების, მაგალითად, მიწისძვრისა და მეწყერის დროს გადაუდებელი სამაშველო ოპერაციებისთვის. თუმცა, არსებული პოზიციონირების ოპერაციები კვლავ დიდწილად ეყრდნობა ჩვეულებრივ გეოფიზიკურ ტექნიკას, რაც იწვევს სამაშველო ოპერაციების დაბალ ეფექტიანობას. mMTC-ზე დაფუძნებული WUSN უზრუნველყოფს რეალურ დროში გეოლოგიურ მონიტორინგს და საფრთხის ზონებში ჩარჩენილი ადამიანებისა და საქონლის ზუსტი პოზიციონირების საშუალებას იძლევა.

აღსანიშნავია, რომ ამ აპლიკაციებიდან ბევრი გულისხმობს ოპერაციებს შორეულ ადგილებში, სადაც საკომუნიკაციო ინფრასტრუქტურის ხელმისაწვდომობა არ არის გარანტირებული. ქსელის მწირი რესურსების, მიწისქვეშა ნიადაგებში კავშირის სიგნალის ძლიერი მილევის და ეკონომიკური მიზეზების გამო, mMTC-ზე დაფუძნებული WUSN-ები ვერ შემოგვთავაზებენ ფართომასშტაბიან მიწისქვეშა მონიტორინგს ძნელად მისადგომ ან კატასტროფების შემცველ სამაშველო ადგილებში. ამის გათვალისწინებით, ჩვენ განვიხილავთ მიწისქვეშა LPWAN სენსორების და LEO თანამგზავრების ინტეგრაციის მიზანშეწონილობას, რაც გულისხმობს მიწისქვეშა-თანამგზავრულ (UtS) ქსელებს.

ამ თავში განხილული სამუშაოების ძირითადი შედეგები შემდეგია:

1. წარმოდგენილი და გაანალიზებულია კომუნიკაციის ორი ალტერნატიული არქიტექტურა mMTC-ზე



ნახ. 6.1. მიწისქვეშა პოზიციიდან თანამგზავრთან არაპირდაპირი კავშირის (U-ItS) და მიწისქვეშა პოზიციიდან თანამგზავრთან პირდაპირი კავშირის (U-DtS) განხორციელების ტოპოლოგიები WUSN-ის გასააქტიურებლად შორეულ რეგიონებში, სადაც U-ItS-ის აქვს ტერესტრიალური და არატერესტრიალური კარიბჭეების განთავსების ორი განსხვავებული სცენარი

დაფუძნებული პირდაპირი და არაპირდაპირი UtS ქსელებისთვის, რომლებიც ნაჩვენებია ნახ. 6.1-ზე. მოცემულია მათი დადებითი და უარყოფითი მხარეები და შესაბამისი კომპრომისები;

2. შესწავლილი და დახასიათებულია LoRaWAN LPWAN ტექნოლოგიის ვარგისიანობა მიწისქვეშა პოზიციიდან თანამგზავრთან პირდაპირი (U-DtS) კავშირის შემთხვევისთვის, რომელშიც ჩვენ ყურადღებით ვაანალიზებთ LoRaWAN-ის ორ მოდულაცია-კოდირების სქემას (MCS), ანუ მოქმედების დიდი რადიუსის (LoRa) ჩვეულებრივ ტექნოლოგიას და ასევე, LoRa-ს, დაფუძნებულს სპექტრის განვრცობის ტექნოლოგიაზე გადამტან სიხშირეებზე გადახტომებით (LR-FHSS);

3. შემუშავებული და წარმოდგენილია სიმულატორი, რომელშიც მოცემულია შემდეგი რეალური პარამეტრები: (1) სარწყავი მინდვრების მდებარეობა მეურნეობაში (პივოტური რწყვის დროს სარწყავი მოწყობილობა ბრუნავს ცენტრალური საყრდენის გარშემო და ცენტრის ირგვლივ არსებულ ტერიტორიაზე წყალს წრიულად ანაწილებს); (2) გზაში დანაკარგების ზუსტი მოდელი, რომელიც ითვალისწინებს ნიადაგში შეწოვას; და (3) ფედინგის ეფექტის დროში ცვალებადი მახასიათებლები, რაც გამოწვეულია თანამგზავრის მობილურობით. ორი MCS-ის შედარების შედეგები ცხადყოფს, რომ LR-FHSS-ს შეუძლია მიაღწიოს საიმედო კავშირს მიწისქვეშა, დიდი რაოდენობით განლაგებულ სენსორებსა და თანამგზავრს შორის, LoRa-სთან შედარებით უფრო მაღალი რობასტულობით თანაარხის ინტერფერენციის მიმართ. იმავდროულად, ქვემოთ, ხაზგასმულია პაკეტების მიწოდებას, ენერგოეფექტიანობასა და ნიადაგის მახასიათებლებს შორის ურთიერთკავშირი, რაც პერსპექტიულს ხდის შემდგომ კვლევებსა და ექსპერიმენტებს ამ ახალი მიმართულებით.

6.2. ტექნიკური საფუძვლები და უახლესი განვითარება

ა. WUSN და LPWAN კლასის mMTC ტექნოლოგიები:

ზოგადად, WUSN-ებში ქსელის აგების ორი ძირითადი მიდგომაა მიღებული: ერთი ეფუძნება სპეციალიზებულ (ad-hoc) ქსელებს და მეორე — ცენტრალიზებულ ქსელებს, აგებულს კარიბჭეების მეშვეობით. ad-hoc ქსელებში მონაცემთა გადაცემა მიწაში ჩამარხულ (ფარულ) კვანძებს შორის შეიძლება ორგანიზებული იყოს მრავალნახტომიანი კონფიგურაციის საშუალებით. პრაქტიკული საკომუნიკაციო მანძილი შემოიფარგლება 12 მ-ით, რაც დიდწილად ზღუდავს სპეციალიზებული ქსელების დანერგვას ფართომასშტაბიანი მიწისქვეშა მონიტორინგის აპლიკაციებისთვის. მეორე მხრივ, ცენტრალიზებული ქსელები უზრუნველყოფენ პირდაპირ კავშირებს მიწისქვეშა კვანძებსა და კარიბჭეებს შორის, რითაც ამცირებენ მიწისქვეშა მარშრუტიზაციის საფეხურებს, რომლებიც ჩვეულებრივ ენერგოტევადია. ამიტომ, ცენტრალიზებული ქსელები, როგორიცაა LPWAN, სასურველია WUSN-ისთვის საიმედო კომუნიკაციისა და ენერგოეფექტიანობის თვალსაზრისით.

ამჟამად, LoRaWAN, ვიწროზოლოვანი IoT (NB-IoT) და Sigfox არის სამი წამყვანი ტექნოლოგია LPWAN ბაზარზე. განვმარტავთ, რომ საგნების ვიწროზოლოვანი ინტერნეტი (NB-IoT) არის LPWAN რადიოტექნოლოგიის სტანდარტი, რომელიც შემუშავებულია 3GPP-ის მიერ ფიჭური ქსელის მოწყობილობებისა და სერვისებისთვის, ხოლო Sigfox არის ქსელური ოპერატორი, რომელიც ფუნქციონირებს IoT-თან. შესაბამისად, NB-IoT და Sigfox განლაგებულია კერძო ქსელების მობილური ქსელის ოპერატორების მიერ, ამიტომ მათი ხელმისაწვდომობა შეიძლება იყოს შეზღუდული ან ხშირად შეუძლებელი დისტანციური აპლიკაციებისთვის. თუმცა, LoRaWAN შეიძლება განლაგდეს მობილური ოპერატორების ან მიკროოპერატორების მიერ, რაც უზრუნველყოფს მოქნილობას WUSN-ის დანერგვისთვის შორეულ ადგილებში.

აღსანიშნავია, რომ წინა კვლევებში ექსპერიმენტულად იქნა გამოკვლეული LoRa მოდულაციის პოტენციალი, რომელიც ემყარება LoRaWAN-ს, WUSN-ებისთვის. შედეგები აჩვენებს, რომ LoRaWAN მოწყობილობისთვის მიწისქვეშა-მიწისზედა კავშირი, რომელიც მუშაობს LoRa MCS-ზე, ვერ აღწევს 100 მ-ს 0.4 მ სიღრმეზე. აქ გადაცემის მთავარი დაბრკოლება არის არსებითი დანაკარგები მიწისქვეშა უსადენო არხში, რომელზეც დიდ გავლენას ახდენს ნიადაგის თვისებები (მაგალითად, გრანულომეტრული შემადგენლობა და მოცულობითი სიმკვრივე), წყლის მოცულობითი შემცველობა (VWC), კვანძების მიწაში განლაგების (ჩამარხვის) სიღრმე, მათი მუშაობის სიხშირე და ა. შ. მიწისქვეშა mMTC-ების გამართული კომუნიკაციებისთვის შორეულ რაიონებში, სადაც კარიბჭეების მკვრივი განლაგება ეკონომიკურად მიზანშეწონილი არ არის, ერთ-ერთი შესაძლო გამოსავალია კარიბჭეების დაფარვის გაზრდა თანამგზავრზე მისი განლაგებით, ანუ DtS.

ბ. თანამგზავრული სისტემები და mMTC DtS კავშირი:

დაინტერესებულ მეცნიერთა გაერთიანების (Union of Concerned Scientists) თანახმად, 2022 წლის 1 მაისის მდგომარეობით, ორბიტაზე დაახლოებით 5465 მოქმედი თანამგზავრია, რომელთაგან 4700 LEO-ს განეკუთვნება. გარდა ამისა, მომავალი 10 წლის განმავლობაში მოელიან, რომ დედამიწაზე 100 000-ზე მეტი თანამგზავრი იქნება. გასათვალისწინებელია ის გარემოება, რომ LEO თანამგზავრებს აქვთ გაშვების ყველაზე დაბალი ღირებულება და, ამასთან ერთად, სიგნალის დაბალი მილევა და გავრცელების მცირე შეყოვნება, რომელიც მერყეობს 2 მწმ-დან 10 მწმ-მდე. უარყოფით მხარეს წარმოადგენს მცირე დაფარვა და დოპლერის მაღალი ეფექტი, რაც აუცილებელს ხდის LEO თანამგზავრების დიდი რაოდენობის გამოყენებას.

წლების განმავლობაში, თანამგზავრები უზრუნველყოფდნენ სხვადასხვა საკომუნიკაციო სერვისებს: ტელეფონი, ნავიგაცია, ინტერნეტთან დაკავშირება და ა. შ. ამ ტენდენციის შესაბამისად, კონცეპტუალიზებულია თანამგზავრული სისტემების ინტეგრაცია LPWAN კლასის mMTC ტექნოლოგიებთან. ამ მიზნით, Lacuna Space-მა და Semtech-მა განაცხადეს LoRaWAN DtS კომუნიკაციის წარმატებული საპილოტე ტესტირების შესახებ მიწისპირა კვანძსა და LEO თანამგზავრს შორის, რაც დაფუძნებული იყო LoRa MCS-ზე. შორეულ რაიონებში დაკავშირების საკითხების გადასაჭრელად, ბოლო წლებში გამოკვლეულია mMTC DtS ქსელების მიზანშეწონილობა და ეფექტიანობა. კონკრეტულად, ნაჩვენები იქნა, რომ LoRa-ს პაკეტს შეუძლია მიაღწიოს LEO თანამგზავრს ყველაზე შორეულ მანძილზეც კი, დაახლოებით 2300 კმ-ზე, 97%-ზე მეტი წარმატების ალბათობით.

დადასტურებულია, რომ პაკეტის წარმატებული მიწოდების ალბათობის დეგრადაციის ძირითადი მიზეზი არის თანაარხის ინტერფერენცია იმავე არხზე სხვა კვანძებიდან ერთდროული გადაცემის გამო. ჩვეულებრივი LoRa-ს საიმედოობის შემდგომი გაზრდის მიზნით, 2020 წლის ნოემბერში, LR-FHSS MCS დაინერგა LoRaWAN პროტოკოლში, რომელიც მხარს უჭერს თერთმეტ მილიონამდე აპლინკის პაკეტს ყოველდღიურად. LR-FHSS DtS კავშირის მასშტაბურობის საწყისი ანალიზი გვიჩვენებს, რომ ეს ახალი მოდულაცია არსებითად აუმჯობესებს ჩვეულებრივ LoRa-ს და შეუძლია დიდი მასშტაბის NTN-ის მხარდაჭერა.

გ. LoRaWAN MCS-ები — LoRa და LR-FHSS:

1) LoRa: ეს არის MCS-ზე დაფუძნებული „ჩირპით" (chirp) სპექტრის განვრცობის ტექნოლოგია LoRaWAN-ში. LoRa გთავაზობს თავისუფლების ფართო დონეებს ფიზიკურ ფენაში, ანუ სიხშირული ზოლის სიგანეს, კოდურ სიჩქარეს (CR) და განვრცობის კოეფიციენტს (SF), რათა გამოიყენოს გადაცემის კვაზი-ორთოგონალურობა. ფიზიკური ფენის პარამეტრების ცვალებადობით, შეიძლება მიღწეული იყოს სხვადასხვა კომპრომისი რადიოდაფარვასა და ენერგიის მოხმარებას შორის. მიუხედავად LoRa MCS-ისა ფართო გამოყენებისა LoRaWAN-ში, ქსელის გამტარუნარიანობა და შეჯახებების მიმართ ტოლერანტობა შეზღუდულია Aloha-ს ტიპის მონაცემთა გადაცემის მრავალჯერადი წვდომის პროტოკოლით.

2) LR-FHSS: LoRa-სთან შედარებით, LR-FHSS ამჟამად გამოიყენება მხოლოდ აპლინკში კომუნიკაციისთვის, ის აუმჯობესებს საიმედოობას და ინტერფერენციების მიმართ მდგრადობას, რათა მხარი დაუჭიროს ფართომასშტაბიან mMTC-ს შემდეგი სამი ოპერაციით.

<u>ლინკის ბიუჯეტი:</u> FCC-ის მონაცემებით, LR-FHSS გვთავაზობს LoRa MCS-სთან შედარებით მინიმუმ 13 დბ-ით მეტი ლინკის ბიუჯეტს დისტანციური აპლიკაციების დასაფარად.

<u>სიხშირეებზე გადახტომა:</u> აპლინკის კომუნიკაციის პროცესისთვის, LR-FHSS მოწყობილობა აგზავნის პაკეტის თითოეულ ფრაგმენტს (ანუ, სათაურს ან მონაცემთა ფრაგმენტს) სხვა, შემთხვევით შერჩეულ სიხშირულ არხზე. აქ, ერთ ოპერაციულ არხში, LR-FHSS სპეციფიკაციები განსაზღვრავს 3120 ფიზიკურ გადამტანს დაკავებული სიხშირული ზოლის (OBW) მიხედვით (თითოს, 488 ჰც ზოლით) LoRa-ს მონაცემთა გადაცემის სიჩქარისთვის (DR), კერძოდ, DR5-სა და DR6-ისთვის (აღვნიშნავთ, DR5 შეესაბამება სიჩქარეს 5.47 კბიტი/წმ, ხოლო DR6 — სიჩქარეს 11 კბიტი/წმ). ამის საპირისპიროდ, LoRa ახორციელებს სრულ გადაცემას ერთ არხში, რაც იწვევს თანაარხის ინტერფერენციის მაღალ ალბათობას.

<u>სიჭარბის შეტანა და კოდირება:</u> LoRa-სგან განსხვავებით, LR-FHSS მოწყობილობა ჯერ გადასცემს 233.472 მწმ ხანგრძლივობის ერთიდან ოთხამდე სათაურის ასლს ($\bar{N}$) გადამტანი სიხშირის შემთხვევითი არჩევით. შემდეგ, MAC-ის სასარგებლო დატვირთვა და ციკლური სიჭარბის შემოწმება კოდირდება, იჭრება პატარა ფრაგმენტებად არა უმეტეს 102.4 მწმ-ისა, სანამ გაიგზავნება თანმიმდევრულად შემთხვევით შერჩეული OBW არხით თითოეული ფრაგმენტისთვის. შესაბამისად, კარიბჭეზე LR-FHSS პაკეტის წარმატებული მიღება უნდა აკმაყოფილებდეს ორ პირობას: (1) მიიღება მინიმუმ ერთი სათაური და (2) მიღებული ფრაგმენტების რაოდენობა აღემატება მიღების ზღურბლს, რომელიც დამოკიდებულია CR-ზე.

მიუხედავად mMTC-ის და DtS-ის დაკავშირების კუთხით მიღწეული ტექნიკური პროგრესისა, გაურკვეველია, შეძლებს თუ არა მიწისქვეშა საკომუნიკაციო არხის კომპონენტის შემოტანა, რომელიც ხასიათდება ბევრად უფრო მაღალი მილევით, ვიდრე საჰაერო არხი, უზრუნველყოს U-DtS დაკავშირება, და, თუ ეს ასეა, რა პირობებში. ამ კითხვაზე პასუხის გასაცემად, შემდეგ პარაგრაფში ჩვენ ჯერ განვიხილავთ ქსელის სხვადასხვა არქიტექტურას და კონფიგურაციის ვარიანტებს UtS კავშირისთვის და შემდეგ წარმოვადგენთ რიცხვით შედეგებს მისი მიზანშეწონილობის შესაფასებლად.

6.3. UtS ქსელის არქიტექტურები

ა. მიწისქვეშა პოზიციიდან თანამგზავრთან არაპირდაპირი (U-ItS) კავშირი:

U-ItS არქიტექტურა შეიძლება დაიყოს შემდეგ ნაწილებად:

1) U-ItS ტერესტრიალური კარიბჭეებით: ეს ჰიბრიდული არაპირდაპირი ქსელის არქიტექტურა მოიცავს მიწისქვეშა, მიწისპირა და თანამგზავრულ სეგმენტებს. კერძოდ, მიწისქვეშა მოწყობილობები გადასცემენ მიკვლეულ მონაცემებს მიწისქვეშა კარიბჭეებზე mMTC ტექნოლოგიების საშუალებით. შემდეგ, ტერესტრიალური კარიბჭეები გადასცემენ მიღებულ მონაცემებს თანამგზავრისაკენ ფიდერის ლინკის მეშვეობით, რაც მოითხოვს ძვირადღირებულ აპარატურას და ყოველთვიურ პასუხისმგებლობას თანამგზავრული მონაცემების გეგმებზე. მთავარი უპირატესობა ის არის, რომ კომუნიკაციის ეს არქიტექტურა ეყრდნობა გამოცდილ და დადასტურებულ ტექნოლოგიებსა და პროდუქტებს. გარდა ამისა, მას შეუძლია შეაგროვოს და შეკუმშოს მონაცემები მიწისქვეშა მოწყობილობებიდან LEO-ზე გადასვლის წინ, რაც ეფექტიანად ამცირებს ტრაფიკის დატვირთვას და სასიგნალო ოვერჰედს. ამ მიდგომის მინუსი არის უფრო რთული ტერესტრიალური ქსელის ინფრასტრუქტურის ძვირადღირებული განთავსება, რომელიც ასევე შეიძლება იყოს მყიფე ზოგიერთი მიწისქვეშა აპლიკაციისთვის, როგორიცაა, მაგალითად, კატასტროფების პროცესში დახმარება.

2) U-ItS არატერესტრიალური კარიბჭეებით: ჩვენ ასევე შეგვიძლია განვიხილოთ არატერესტრიალური ტოპოლოგია, ანუ კარიბჭე განლაგებული საჰაერო პლატფორმაზე, მაგალითად, UAV-ზე ან HAP-ზე. ეს კარიბჭე აბრუნებს მიწაში ჩამარხული სენსორების მონაცემებს თანამგზავრზე ფიდერის ლინკის მეშვეობით. ტერესტრიალური კარიბჭისგან განსხვავებით, mMTC კარიბჭეს, რომელიც მოთავსებულია UAV-ებზე ან HAP-ებზე შეუძლია უზრუნველყოს მარტივი, მოთხოვნაზე დაფუძნებული და სწრაფი უსადენო რადიოწვდომა მიწისქვეშა mMTC სენსორებზე კატასტროფის შედეგად დაზარალებულ ან შორეულ ადგილებში. თუმცა, UAV-ების ამინდის მიმართ მგრძნობიარობის, შეზღუდული დაფარვისა და მოკლე მანძილზე ფრენის გამო, ეს არატერესტრიალური სტრატეგია შეიძლება არ იყოს შესაფერისი სცენარებისთვის, რომლებიც მოითხოვს ყოველთვის კარგ ამინდს, 24/7 და უწყვეტ კომუნიკაციას.

ბ. მიწისქვეშა პოზიციიდან თანამგზავრთან პირდაპირი (U-DtS) კავშირი:

ეს ალტერნატიული არქიტექტურა გვპირდება პირდაპირ mMTC უსადენო კავშირს ჩამარხულ სენსორებსა და არატერესტრიალურ კარიბჭეებს შორის, რომელიც განლაგებულია თანამგზავრზე ყოველგვარი შუამავლის გარეშე, როგორებიც შეიძლება მაგალითად იყოს ადგილობრივი კარიბჭე და საჰაერო მოდემი, რაც მნიშვნელოვნად ამარტივებს ქსელის ტოპოლოგიას.

მიუხედავად ამისა, არსებობს რამდენიმე პრობლემა და გამოწვევა, რომლებიც დაკავშირებულია U-DtS კომუნიკაციასთან. პირველი, ეს არის ქსელის მასშტაბურობის საკითხი. გასათვალისწინებელია, რომ თანამგზავრის რადიომიმღებს უწევს დიდი რაოდენობის მიწისქვეშა სენსორის მიერ წარმოებული უამრავი მცირე მონაცემის დამუშავება, რაც იწვევს დიდ ინტერფერენციებს და პაკეტების შეჯახებას. მეორე მხრივ, ძლიერი რადიოსიხშირული მილევა ნიადაგში და ასობით-ათასობით კილომეტრის ტოლი მანძილი სენსორებსა და თანამგზავრს შორის იწვევს გზაში მაღალ დანაკარგებს, რასაც უნდა დაუპირისპირდეს კვანძების მაღალი გადაცემის სიმძლავრე. აღსანიშნავია, რომ იონოსფეროს, ატმოსფერული გაზების, ნისლის, ღრუბლების და წვიმის წვეთების მიერ გამოწვეული მილევა ჩვეულებრივი mMTC ტექნოლოგიებისთვის, რომლებიც მუშაობენ ქვედა გიგაჰერცულ სიხშირულ დიაპაზონში, შეიძლება უმნიშვნელო იყოს. თუმცა, U-DtS კომუნიკაციის პროცესში, თანამგზავრების მობილურობის და დინამიური მიწისქვეშა გარემოს გამო, ადგილი ექნება რადიოარხების ფლუქტუაციას, რომელიც ნალექებით არის გამოწვეული, რაც გაართულებს MCS სისტემის მუშაობას და რაც, თავის მხრივ, უარყოფითად იმოქმედებს პაკეტის მიწოდების სიჩქარესა და ენერგოეფექტიანობაზე.

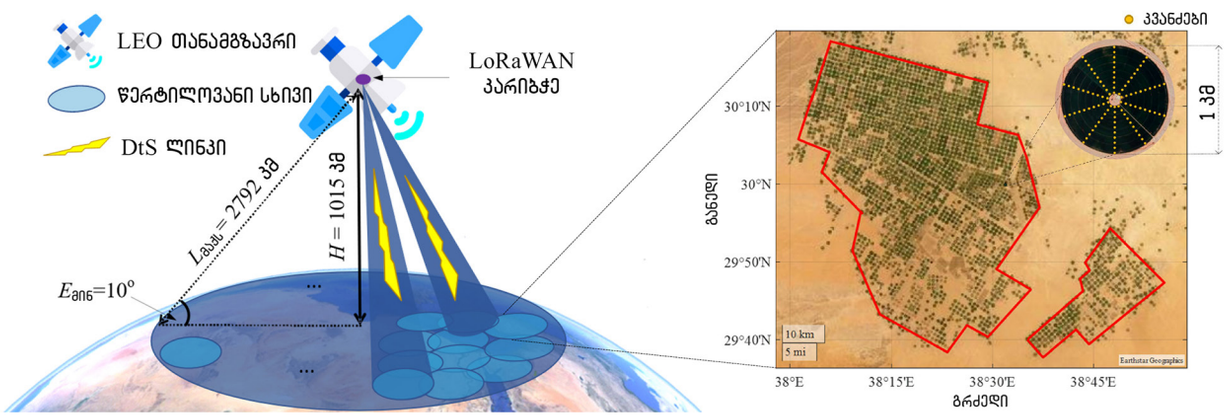
6.4. U-DTS LoRaWAN-ის ბაზაზე: დისტანციური მეურნეობის კონცეფციის დადასტურება

მიწისქვეშა LPWAN აპლიკაციები უკვე გამოკვლეულია ლიტერატურაში, რაც მას მზა ინსტრუმენტად აქცევს როგორც U-ItS-ისთვის, ასევე U-DtS-ისთვის. აღსანიშნავია, რომ U-ItS-ში ტერესტრიალური კარიბჭეების სიმკვრივის გაზრდით, როგორც გავრცელების, ასევე მასშტაბურობის გამოწვევების მოგვარება შესაძლებელია, თუმცა, ეს ეკონომიკურად არასაკმარისი და თუნდაც არაპრაქტიკულია შორეულ ტერიტორიებზე. ამიტომ, ჩვენ ყურადღებას ვამახვილებთ უფრო ხელმისაწვდომ და რთულ ტოპოლოგიაზე, ანუ U-DtS-ზე, რათა შევაფასოთ მისი მიზანშეწონილობა მიწისქვეშა საკომუნიკაციო არხის რთულ პირობებში. აღვნიშნავთ, რომ ამ მიდგომის მიზანშეწონილობის, საიმედოობისა და კომპრომისების შესახებ სიღრმისეული ინფორმაციის მისაღებად, ჩვენ განვიხილავთ LoRaWAN ტექნოლოგიას, რომელიც შეიცავს ორ MCS-ს, ანუ LoRa-ს და LR-FHSS-ს. ნახაზები 6.2ა და 6.2ბ ასახავს სიმულაციის სცენარს და სამიზნე აპლიკაციას, შესაბამისად. ძირითადი ტექნიკური პარამეტრები მოცემულია ცხრილში 6.1.

ა. კომპიუტერული სიმულაციის პარამეტრები და კონფიგურაციები:

U-DtS დაკავშირების მიზანშეწონილობის გამოსაკვლევად, ჩვენ ვირჩევთ რეალურ, პივოტურ სარწყავ სისტემას სულ $M = 3045$ სარწყავი წრის ველით, რომელიც განთავსებულია ელ-ჯაუფის (Al Jouf) სახნავი მიწების მეურნეობაში, საუდის არაბეთის ჩრდილოეთ ნაწილში (იხ. ნახ. 6.2ბ-ის მარჯვენა პანელი). ჩვენ რიცხობრივად ვგულისხმობთ, რომ $S = 100$ მიწისქვეშა მოწყობილობა თანაბარი მანძილით არის ჩაფლული თითოეულ სარწყავ წრეში 0.35 მ სიღრმეზე, რათა თავიდან იქნეს აცილებული მეურნეობის მექანიკური მოქმედებები და ეფექტიანად გაკონტროლდეს ნიადაგის პირობები, ხოლო თითოეული კვანძი გადასცემს 10-ბაიტიან აპლინკის პაკეტს $T = 1800$ წმ პერიოდით.

შერჩეული და გამოყენებული იქნა ნიადაგის რეალური მახასიათებლები, როგორიცაა VWC და თიხის პროცენტი შერჩეულ მეურნეობაში მიწისქვეშა გზებზე რეალური დანაკარგის დასაფიქსირებლად. ასეთი მიწისქვეშა განლაგებისას, ჩვენ ვგულისხმობთ, რომ თითოეული LoRaWAN კვანძი აღჭურვილია 2.15 დბი გაძლიერების მქონე ყველა-მიმართულებით ფუნქციონირებადი ანტენით და ვვარაუდობთ, რომ LoRaWAN არატერესტრიალური კარიბჭე განლაგებულია Telesat-ის მსგავს თანამგზავრზე, რომელიც უზრუნველყოფს მრავალ წერტილოვან სხივს ანტენის მაღალი გაძლიერებით, რომელიც 35 დბი-ს ტოლია. ჩვენ ვგულისხმობთ, რომ მთლიან მეურნეობაში მიმოფანტული $N = 304\,500$ სენსორი დაფარულია ერთი წერტილოვანი სხივით.



ა) სიმულაციის სცენარი და ძირითადი აღნიშვნები

ბ) ელ-ჯაუფის სახნავი მიწების მეურნეობა

ნახ. 6.2. ჭკვიანი მეურნეობის სიმულაციური სცენარი, სადაც (ა) ასახავს U-DtS მიდგომის არქიტექტურას ძირითადი აღნიშვნებით და (ბ) ასახავს იმიტირებული პივოტური სარწყავი სისტემის შემცველი მეურნეობის გეოგრაფიულ მდებარეობას, რომელიც აღნიშნულია წითელი ხაზებით

პარამეტრები	მნიშვნელობები
ოპერაციული გარემო	
ველის წრეების რაოდენობა (M)	3045
კვანძები/ველის წრეები (S)	100
კვანძების რაოდენობა (N)	304 500
კვანძების განლაგება	თანაბარი მანძილი
განლაგების სიღრმე (D)	0.35 მ (ნაგულისხმევი)
წყლის მოცულობითი შემცველობა (VWC)	11.19% (ადგილზე), 30%
თიხა (C)	16.86% (ადგილზე), 50%
ფიზიკური ფენის სასარგებლო დატვირთვა (PL)	10 ბაიტი
ანგარიშის პერიოდი (T)	1800 წმ
ტრაფიკის ნიმუში	პერიოდული
Telesat-ის მსგავსი თანამგზავრული კონფიგურაცია	
სიმაღლის კუთხეები (E)	$10° \leq E \leq 90°$
რაისის ფაქტორი (K)	$1.24 \leq K \leq 25.11$
ორბიტული სიმაღლე (H)	1015 კმ
ლინკის მანძილი (L)	1015 კმ ~ 2792 კმ
რადიოკონფიგურაცია	
გადამტანი სიხშირე (f_c)	915 მჰც
ანტენის გაძლიერება	G_t=2.15 დბი, G_r=35 დბი
გზაში დანაკარგების ექსპონენტის მაჩვენებელი (η)	2
SIR-ის ზღურბლი (γ)	6 დბ
LoRa MCS	
გადაცემის სიმძლავრე (P_{tx})	20 დბმ
გადაცემის დენის ძალა (I_{tx})	133 მა
SF	10
LoRa BW	125 კჰც
სიხშირული არხები	64
LoRa-ს მიმღების მგრძნობიარობა (SF10)	–132 დბმ
LR-FHSS MCS	
გადაცემის სიმძლავრე (P_{tx})	28 დბმ
გადაცემის დენის ძალა (I_{tx})	650 მა
DR5/DR6 OBW არხები	3120
სათაურის ასლები ($\overline{N}$)	3 (DR5), 2 (DR6)
CR	$\frac{1}{3}$ (DR5), $\frac{2}{3}$ (DR6)
სათაურის ასლების ხანგრძლივობა (T_H)	233.472 მწმ
ფრაგმენტის ხანგრძლივობა (T_F)	102.4 მწმ
LR-FHSS OBW-ის სიხშირული ზოლი	488 ჰც
LR-FHSS-ის მიმღების მგრძნობიარობა	–137 დბმ

ცხრილი 6.1. სისტემის მოდელი და პარამეტრები მონტე-კარლოს სიმულაციებისთვის

გარდა ამისა, განვიხილავთ სიმაღლის დინამიურ კუთხეს ($10° \leq E \leq 90°$), რომელიც იწვევს არხის მახასიათებლების ცვალებადობას. განხილული სისტემა მოდელირებულია რაისის ფედინგის არხის მოდელით, რაისის ფაქტორით (K) და საკომუნიკაციო მანძილი 2792 კმ-დან 1015 კმ-მდეა მიწისქვეშა კვანძსა და თანამგზავრზე დაფუძნებულ კარიბჭეს შორის.

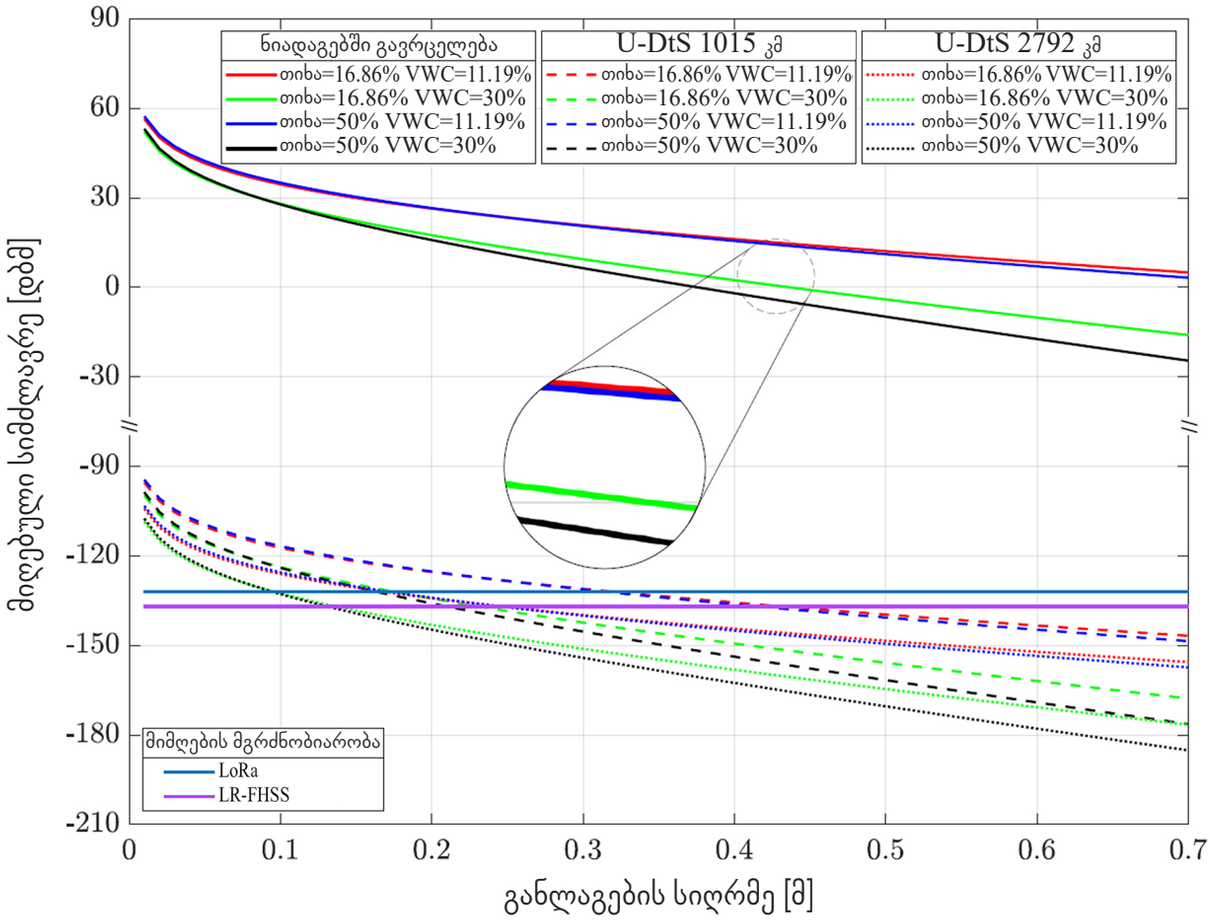
ჩვენ განვიხილავთ U-DtS სისტემას, რომელიც მუშაობს 915 მჰც (აშშ-ში გამოყენებული სიხშირე ინდუსტრიული, სამეცნიერო და სამედიცინო საჭიროებებისათვის) დიაპაზონში, გადაცემის სიმძლავრით 20 დბმ LoRa-სთვის და 28 დბმ LR-FHSS-ისთვის. LoRa-ს კონფიგურაციებისთვის, DR0, რომელსაც ყველაზე მაღალი გავრცელების უნარი აქვს (რაც შეესაბამება SF10-ს, BW125-ს, მიმღების მგრძნობიარობას -132 დბმ და მაქსიმუმ 64 აპლინკის არხს), გადალახავს სიგნალის ძლიერ მილევას ნიადაგში. აღსანიშნავია, რომ LR-FHSS მოდულაცია შეიძლება თანაარსებობდეს ჩვეულებრივ LoRa-სთან, LoRaWAN-ის ძველი ქსელის არქიტექტურისა და პროტოკოლის შეცვლის გარეშე. აშშ-ში მიღებული პრაქტიკის შესაბამისად, მხოლოდ DR5 და DR6 უჭერს მხარს LR-FHSS-ს. ორივე DR საშუალებას აძლევს მოწყობილობას გამოიყენოს ერთი ოპერაციული არხი, რომელიც მოიცავს 3120 OBW არხს. გარდა ამისა, DR5 გულისხმობს უფრო დაბალ ბიტურ სიჩქარეს (162 ბიტი/წმ), სადაც CR = 1/3 და სათაურის გამეორება, $\overline{N}$ = 3, ხოლო DR6-ს აქვს უფრო მაღალი ბიტური სიჩქარე — 325 ბიტი/წმ, სადაც CR = 2/3 და $\overline{N}$ = 2. გადაცემის უფრო მაღალი სიმძლავრით და მიმღების უფრო მაღალი მგრძნობიარობით (-137 დბმ), LR-FHSS არხის მაქსიმალური ბიუჯეტი აღწევს 167 დბ-ს, რაც 13 დბ-ით მეტია ვიდრე იგივე სიდიდე LoRa SF10-ისთვის.

იმისათვის, რომ უფრო ზუსტი წარმოდგენა შეგვექმნას ორი განსხვავებული MCS-ის გამოყენების მიზანშეწონილობისა და პოტენციური კომპრომისის შესახებ U-DtS-ის დაკავშირების კუთხით, ჩვენ წარმოვადგენთ MATLAB-ის მონტე-კარლოს მეთოდით აგებულ U-DtS სიმულატორს, რომელიც დაფუძნებულია LR-FHSS მოდელზე. წარმოდგენილი სიმულატორი ახდენს რეალური დისტანციური მორწყვის სცენარის მოდელირებას, იყენებს ზუსტ U-DtS მილევისა და ენერგიის მოხმარების მოდელს. გზაში ჯამური დანაკარგი ითვალისწინებს (1) ნიადაგის შთანთქმას, რომელიც გამოითვლება მოდიფიცირებული ფრიისის (Friis) განტოლებით და იყენებს მინერალოგიაზე დაფუძნებულ ნიადაგის დიელექტრიკულ მოდელს, და (2) თანამგზავრის მობილურობის გათვალისწინებით, LoS-ისთვის თავისუფალ სივრცეში გზაში დანაკარგებს, რომელიც ხასიათდება რაისის ფაქტორით (K). LoRaWAN-ის კარიბჭის მიერ პაკეტის სწორად მიღების ალბათობა აღინიშნება როგორც წარმატების ალბათობა (P_S), რომელიც შედგება ორი კომპონენტისგან. პირველი კომპონენტი, P_{SNR}, წარმოადგენს SNR-ის ალბათობას მიღებულ პაკეტზე, რომელიც აჭარბებს კონკრეტული DR-ისთვის SNR დემოდულაციის ზღურბლს (D_{SNR} = -15 დბ LoRa DR0-ისთვის და D_{SNR} = 4 დბ LR-FHSS-ში, სადაც გამოიყენება DR5/DR6). მეორე კომპონენტი, P_{SIR}, ითვალისწინებს ინტერფერენციის სიგნალებს და აღნიშნავს პაკეტების სწორად დემოდულაციის შესაძლებლობას „დაჭერის ეფექტის" გამოყენებით, რომელიც დაკავშირებულია სიხშირულ მოდულაციასთან. დაჭერის ეფექტით სარგებლობისთვის, სამიზნე პაკეტის SIR მნიშვნელობა უნდა იყოს გარკვეულ ზღურბლზე (γ = 6 დბ) ზემოთ.

გარდა ამისა, ენერგია თითო პაკეტზე (EPP) ნიშნავს ენერგიის საშუალო რაოდენობას, რომელსაც მოიხმარს საბოლოო მოწყობილობა პაკეტის თანამგზავრული კარიბჭისთვის მიწოდების მიზნით. ის გამოითვლება თანამგზავრული კარიბჭის მიერ წარმატებით მიღებული პაკეტისთვის მოხმარებული ენერგიის შესაფასებლად, რათა გამოავლინოს თითოეული მიწისქვეშა კვანძის ბატარეის მუშაობის პოტენციური (სიცოცხლის) ხანგრძლივობა. ბატარეის მუშაობის ხანგრძლივობის ზუსტად მოდელირებისთვის, ჩვენ განვიხილავთ A კლასის LoRaWAN საბოლოო მოწყობილობების ენერგიის მოხმარების სრულ მოდელს (მათ შორის, გაღვიძებისა და ძილის მდგომარეობების ჩათვლით) და ვვარაუდობთ, რომ ბატარეის ტევადობა თითოეული მიწისქვეშა მოწყობილობისთვის არის 3 000 მა/სთ. აქ მოქმედი ძაბვისა და გადაცემის დენის მნიშვნელობები მიიღება SX1262 LoRa მოდულის მონაცემთა ცხრილებიდან.

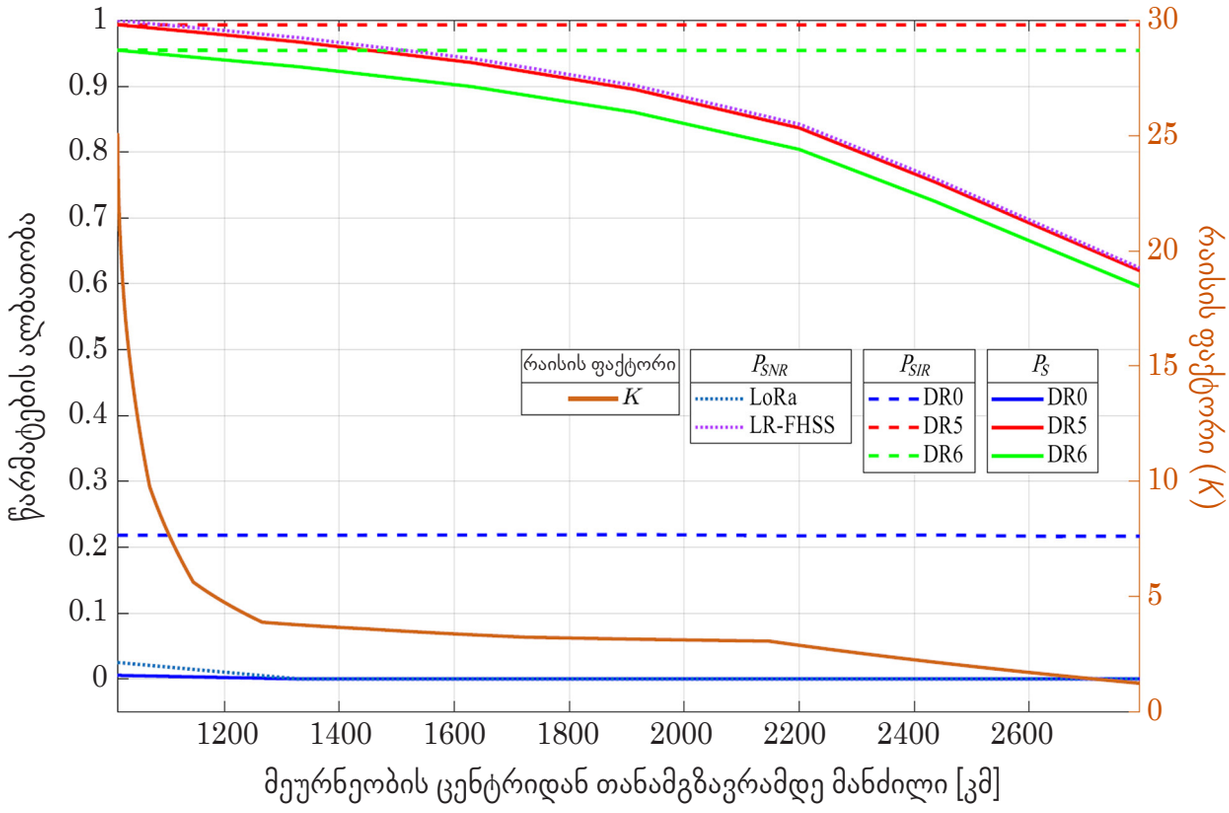
ბ. კომპიუტერული სიმულაციის ძირითადი რიცხობრივი შედეგები:

პირველ რიგში, ჩვენ ვაანალიზებთ მიწისქვეშა კვანძიდან აპლინკის სიგნალის შესაძლებლობებს, რომელიც აღწევს თანამგზავრზე დაფუძნებულ კარიბჭეს. ნახ. 6.3 ასახავს კვანძის ჩამარხვის სიღრმისა და ნიადაგის თვისებების (ანუ VWC-ის და თიხის პროცენტული შემადგენლობის) ეფექტს კარიბჭეზე მიღებულ სიმძლავრეზე.



ნახ. 6.3. მიღებული სიგნალის სიმძლავრის ფუნქციური დამოკიდებულება LoRaWAN კვანძის ჩამარხვის სიღრმესთან, თიხის პროცენტულ შემადგენლობასთან და VWC-სთან. ზედა ოთხი უწყვეტი მრუდი წარმოადგენს მიღებულ სიმძლავრეს მიწისქვეშა გარემოში (ჩამარხული კვანძიდან მიწის ზედაპირამდე), სადაც წყვეტილი და წერტილოვანი მრუდები ასახავენ მიღებულ სიმძლავრეს მინიმალურ და მაქსიმალურ შესაძლო მანძილზე, შესაბამისად, 1015 კმ-ზე და 2792 კმ-ზე. ქვედა უწყვეტი მრუდები ასახავენ მიმღების მგრძნობიარობის ზღურბლს LoRa-სთვის და LR-FHSS-ისთვის, შესაბამისად

უფრო მეტიც, ის ასევე ასახავს მიმღების მგრძნობიარობის ზღურბლებს LoRa-სთვის და LR-FHSS-ისთვის, რათა აჩვენოს სიმძლავრის მინიმალური დონეები, რომლითაც კარიბჭეს შეუძლია მიიღოს პაკეტი. აღვნიშნავთ, რომ მოცემული ორი MCS-ის სამართლიანი შედარებისთვის ნახ. 6.3-ზე გამოყენებულია ერთი და იგივე გადამცემი სიმძლავრე (ე. ი. P_{tx} = 20 დბმ). ნიადაგში მილევა მნიშვნელოვანი კომპონენტია გზაში ჯამური დანაკარგებისთვის U-DtS კავშირში, ამიტომ ჩვენ გამოვსახავთ მას ცალ-ცალკე ზედა ოთხი უწყვეტი მრუდით ნახ. 6.3-ზე. ნახაზიდან ჩანს, რომ მიღებული სიმძლავრე მნიშვნელოვნად მცირდება კვანძის ჩამარხვით უფრო დიდ სიღრმეზე. ნიადაგის მახასიათებლებიდან გამომდინარე, ნიადაგის VWC უფრო ძლიერ გავლენას ახდენს სიგნალის მილევაზე ვიდრე ნიადაგის შემადგენლობა, განსაკუთრებით თიხის უფრო მაღალი პროცენტის შემთხვევაში. თუ სამარხის სიღრმე 0.2 მ-ზე მეტია, VWC = 30%-ისთვის მიღებული სიმძლავრე 1015 კმ მანძილზე კიდევ უფრო დაბალია, ვიდრე VWC = 11.19%-ისთვის, როდესაც მანძილი შეადგენს 2792 კმ-ს. მეორე მხრივ, კონკრეტულ ადგილზე (in situ) შემთხვევისთვის, როდესაც VWC = 11.19%, თიხა = 16.86%, და თანამგზავრამდე მანძილია 1015 კმ, მიღებული სიმძლავრე უფრო დაბალია, ვიდრე LoRa მიმღების მგრძნობიარობა კვანძის სიღრმეზე 0.33 მ. ამავდროულად, თუ გამოიყენება LR-FHSS MCS, მიღებული სიგნალი რჩება მიმღების მგრძნობიარობის ზემოთ, როდესაც ჩამარხვის სიღრმე აღწევს 0.43 მ-ს. აღსანიშნავია, რომ კვანძს, რომელიც მუშაობს LR-FHSS-სთან შეუძლია

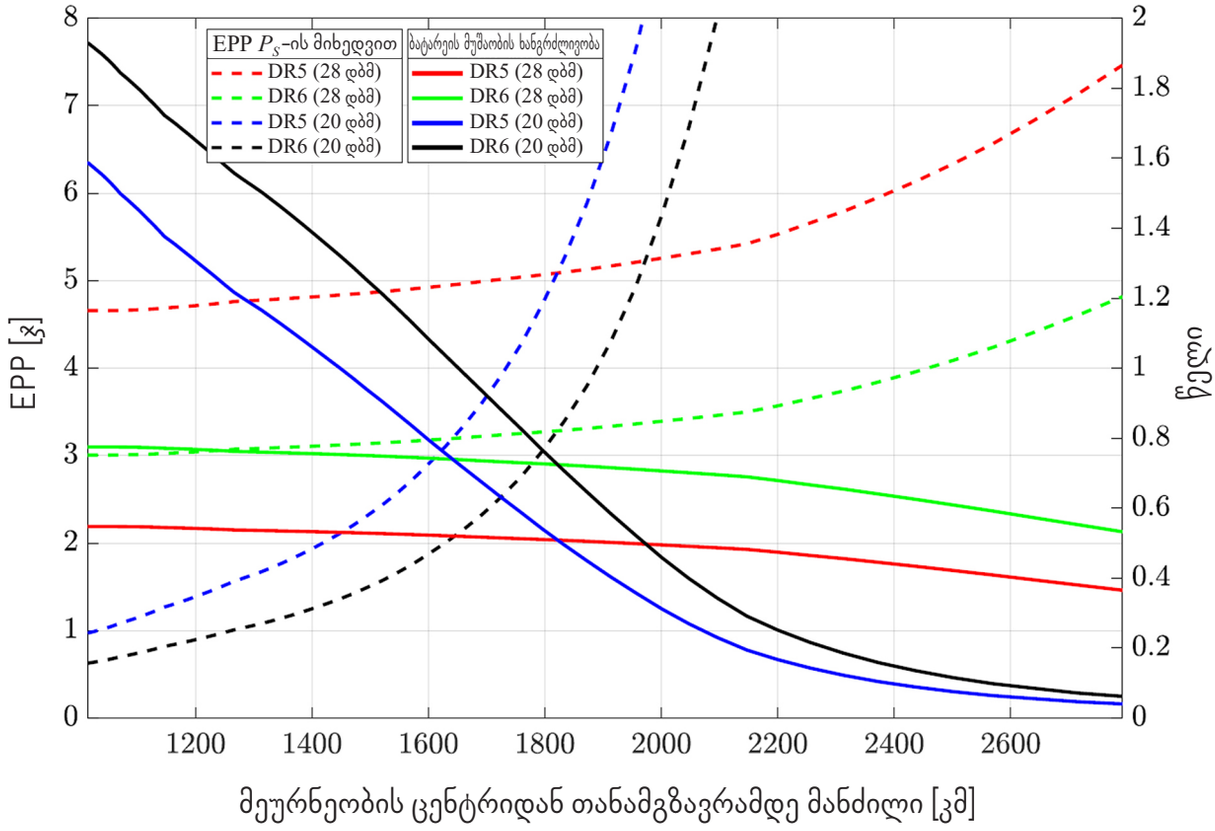


ნახ. 6.4. წარმატების საშუალო P_S ალბათობა, როგორც მანძილის ფუნქცია მეურნეობის ცენტრიდან თანამგზავრამდე და მის კომპონენტებამდე: P_{SNR} LoRaWAN კარიბჭეზე SNR-ის ალბათობაა, რომელიც აჭარბებს დემოდულაციის ზღურბლს და P_{SNR} ინტერფერენციის ალბათობაა, რომელიც არ ბლოკავს პაკეტის მიღებას. ორდინატის მარჯვენა ღერძი ასახავს არხის მახასიათებლების ცვალებადობას (რაისის ფაქტორს (K)) მანძილის მიხედვით

გამოიყენოს P_{tx} = 28 დბმ-მდე (LoRa-სთვის მაქსიმალურ 20 დბმ-თან შედარებით), რაც მიუთითებს იმაზე, რომ LR-FHSS-ს შეუძლია დაამყაროს U-DtS კავშირი უფრო დიდ სიღრმეზე ვიდრე LoRa-ს.

წარმატების ალბათობა და მისი კომპონენტები (მაგალითად, P_{SNR} და P_{SIR}) LoRaWAN-ის ორი MCS-ისთვის, როგორც კვანძებიდან თანამგზავრამდე მანძილის ფუნქცია, გამოსახულია ნახ. 6.4-ზე, რაისის დინამიური ფაქტორის (K) დროში ცვალებადი მახასიათებლებით. ნახ. 6.4-ზე და ნახ. 6.5-ზე, ჩვენ ვგულისხმობთ, რომ კვანძები განლაგებულია (ჩამარხულია) 0.35 მ სიღრმეზე და ადგილზე VWC = 11.19% და თიხა = 16.86%, ასევე P_{tx} = 28 დბმ LR-FHSS-ისთვის.

ნახ. 6.4-ზე, P_{SNR} მრუდი (< 0.03) LoRa-სთვის გვიჩვენებს, რომ მას არ შეუძლია დაამყაროს კავშირი მიწისქვეშა სენსორებსა და თანამგზავრს შორის, მიუხედავად მათ შორის მანძილისა. თუმცა, LR-FHSS P_{SNR} რჩება 0.9-ზე მაღლა 1900 კმ-მდე, რის შემდეგაც P_{SNR} ეცემა 0.624-მდე, მაქსიმალური დაფარვის მანძილით 2792 კმ. აღსანიშნავია, რომ P_{SIR} DR0-სთვის რჩება დაახლოებით 0.22 ყველა მანძილისთვის, მაღალი თანაარხის ინტერფერენციის გამო, რომელიც გამოწვეულია აპლინკის მრავალი პაკეტით. იმავდროულად, ორივე DR5 და DR6 აჩვენებენ უფრო მაღალ P_{SIR}-ს, 0.95-ზე მეტს, რადგან LR-FHSS იყენებს სიხშირის გადახტომას და ეფექტიანად ამცირებს შეჯახების შანსებს ფიზიკური არხების რაოდენობის გაზრდის გზით (გამოიყენება დაახლოებით 3120 OBW არხი) და ზედმეტი ფიზიკური სათაურების და CR-ის შემცირებით. უფრო კონკრეტულად, DR5-ის P_{SIR} 0.038-ით უფრო მაღალია, ვიდრე DR6-ის, დაბალი CR = 1/3-ის და მეტი რაოდენობის სათაურის ასლების ($\bar{N}$ = 3) გამო. DR0-ის წარმატების საერთო ალბათობა P_S დაახლოებით რჩება 0-ის ტოლი ყველა მანძილისთვის, ხოლო DR5-ისთვის ის რჩება 0.620-ზე მაღალი მაქსიმალურ მანძილზე, რაც ოდნავ უკეთესია ვიდრე DR6-ის შესაბამისი მნიშვნელობა.



ნახ. 6.5. EPP LR-FHSS-ისთვის და მიწისქვეშა მოწყობილობის მუშაობის ხანგრძლივობა, რომელიც ფუნქციონირებს DR5-ით და DR6-ით ორ გადამცემ სიმძლავრეზე (ანუ 20 დბმ-ზე და 28 დბმ-ზე), როგორც საკომუნიკაციო მანძილის ფუნქცია

ჩვენ ასევე შევადარებთ თითოეული მიწისქვეშა მოწყობილობის EPP-ის და ბატარეის მუშაობის ხანგრძლივობას LR-FHSS ორი DR-ის მიხედვით და ორ გადამცემ სიმძლავრეზე (ანუ, 20 დბმ და 28 დბმ), როგორც ნაჩვენებია ნახ. 6.5-ზე. აღსანიშნავია, რომ წარმატების მაღალი ალბათობის გამო (მაგალითად, $P_S \geq 80\%$), DR5 და DR6-ის ბატარეის მუშაობის ხანგრძლივობა P_{tx} = 28 დბმ-ის შემთხვევაში თანდათან მცირდება მანამ, სანამ მანძილი 2200 კმ-ს მიაღწევს, P_{tx}=20 დბმ შემთხვევასთან შედარებით. ნახ. 6.5 გვიჩვენებს, რომ EPP DR6-ისთვის მნიშვნელოვნად უკეთესია, ვიდრე DR5-ისთვის; ეს იმიტომ ხდება, რომ მიუხედავად იმისა, რომ DR5 აჩვენებს წარმატების უკეთეს ალბათობას, DR5-ის ეთერში ფუნქციონირების დრო (1423.69 მწმ) გაცილებით მაღალია ვიდრე DR6-ისთვის (883.02 მწმ), რაც ამ შემთხვევაში განმსაზღვრელი ფაქტორია. უფრო კონკრეტულად, 1830 კმ საკომუნიკაციო მანძილის ფარგლებში, როგორც DR5-ის, ასევე DR6-ისთვის, EPP P_{tx} = 20 დბმ უფრო მცირეა ვიდრე P_{tx} = 28 დბმ, გადაცემის დაბალი დენის ძალის გამო. ნახ. 6.5 ასევე გვიჩვენებს, რომ მიწისქვეშა მოწყობილობას, რომელიც კონფიგურირებულია DR6-ით და რომლისთვისაც P_{tx} = 28 დბმ-ია, აქვს მუშაობის ხანგრძლივობის ვადა მინიმუმ 0.53 წელი, გადაცემის შედარებით მაღალ სიხშირეზე. ბატარეის მუშაობის ხანგრძლივობა შეიძლება კიდევ უფრო გაუმჯობესდეს ანგარიშის წარმოდგენის პერიოდის კორექტირებით, U-DtS სისტემაზე დაწესებული მოთხოვნების შესაბამისად. მაგალითად, საანგარიშო პერიოდის გაზრდა გააუმჯობესებს P_{SIR}-ს (ტრაფიკის შემცირებული დატვირთვის გამო) და შეამცირებს ენერგიის მთლიან მოხმარებას, რაც ახანგრძლივებს ბატარეის მუშაობის ხანგრძლივობას.

6.5. გამოწვევები და კვლევის შემდგომი მიმართულებები

ზემოთ მოყვანილი რაოდენობრივი ანალიზი ადასტურებს U-DtS კავშირის მიდგომის მიზანშეწონილობასა და მასშტაბურობას, ამასთან ის აჩვენებს, რომ მის შესრულებაზე მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს როგორც რთული მიწისქვეშა პირობები, ასევე სენსორებსა და თანამგზავრს შორის საკომუნიკაციო მანძილი. ბალანსი წარმატების მაჩვენებელსა და ენერგოეფექტიანობას შორის შეიძლება დარეგულირდეს სხვადასხვა DR-ებით. აღსანიშნავია, რომ გამოკვლეული U-DtS მიდგომა შეიძლება შემდგომ განზოგადდეს სხვა მიწისქვეშა სცენარებზე, როგორიცაა მიწისქვეშა მილსადენის მონიტორინგი და კატასტროფებთან დაკავშირებული სამაშველო ოპერაციები. თუმცა, ზოგიერთი ღია საკითხი მაინც გულდასმით უნდა იქნეს შესწავლილი U-DtS კავშირის განსახორციელებლად mMTC-ისა და WUSN-ების შერწყმისათვის, როგორც ეს შეჯამებულია ქვემოთ:

ზედაპირის დაჩრდილვა და ინტერფერენცია:

იმის გამო, რომ U-DtS კომუნიკაციებზე გავლენას ახდენს სხვადასხვა სეზონური კულტურები ან ამინდის პირობები (მაგალითად, თოვლის საფარი), საჭიროა შემდგომი კვლევა და განსაკუთრებით საველე ექსპერიმენტები, რათა შესწავლილი იქნეს დაჩრდილული ზედაპირების გავლენა წარმატების ალბათობაზე. ზემოთ წარმოდგენილ კვლევაში ჩვენ განვიხილავდით მხოლოდ კომპიუტერზე იმიტირებულ მეურნეობაში ჩამარხული LoRaWAN მოწყობილობების მიერ გამოწვეულ ინტერფერენციას. იმავე სიხშირულ დიაპაზონში მომუშავე სხვა მოწყობილობების მიერ U-DtS კავშირზე წარმოქმნილი ინტერფერენციის ეფექტი უნდა იქნეს გამოკვლეული მომავალ სამუშაოებში.

ინტელექტუალური ADR:

როგორც წინა კვლევებმა აჩვენა, ადაპტიური DR (ADR) მექანიზმი იძლევა LoRaWAN-ის მუშაობის სრულყოფილად დარეგულირების საშუალებას. წარმოდგენილი შედეგები ნათლად აჩვენებს, რომ U-DtS კავშირის დროს სიგნალის მილევა იცვლება ნიადაგის თვისებების მიხედვით, რაც გასათვალისწინებელია ADR-ში. ეს მოითხოვს ახალი ADR სქემების შემუშავებას DR-ის ინტელექტუალურად ოპტიმიზაციისთვის, რაც უზრუნველყოფს ენერგოეფექტიან კომუნიკაციას დინამიურ მიწისქვეშა გარემოში.

ქსელის ფუნქციონირების ხანგრძლივობა:

ენერგოეფექტიანობა განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია WUSN-ებისთვის. გარდა ენერგომოხმარების ოპტიმიზაციის მექანიზმებისა, ტრაფიკის ნიმუშის და ისეთი საკომუნიკაციო პარამეტრებისთვის, როგორიცაა გადაცემის სიმძლავრე და ADR, ენერგიის ბიუჯეტი შეიძლება გაიზარდოს ენერგიის შეგროვების სხვადასხვა ტექნოლოგიით, მაგალითად, ენერგიის უსადენო გადაცემის, გარემოში ენერგიის უკუგაფანტვისა და ვიბრაციული ენერგიის შეგროვების გზით. ეფექტიანობის ოპტიმიზაცია ენერგიის მოპოვების შეზღუდვების პირობებში წარმოადგენს შესასწავლად საინტერესო კვლევით მიმართულებას.

სიხშირის მარეგულირებელ ნორმებთან შესაბამისობა:

ცნობილია, რომ LoRaWAN მიჰყვება რეგიონალურ სიხშირულ გეგმებსა და რეგულაციებს. შესაბამისად, მიზანშეწონილია იმის შესწავლა, თუ როგორ იცვლება U-DtS სისტემების მუშაობა რეგიონების მიხედვით (მაგალითად, ევროპასა და აზიაში).

დაუნლინკში კომუნიკაციის შესაძლებლობა:

გასათვალისწინებელია, რომ LoRaWAN მხარს უჭერს მხოლოდ LR-FHSS-ის აპლინკს, ამიტომაც არის ჩვეულებრივი LoRa საჭირო დაუნლინკისთვის. თუმცა, წარმოდგენილი შედეგები ცხადყოფს, რომ LoRa მოდულაცია არ არის შესაფერისი U-DtS კავშირისთვის ნიადაგში არსებულ გზაში უფრო ძლიერი დანაკარგების გამო. დაუნლინკის უზრუნველსაყოფად საჭიროა გადაცემის უფრო მაღალი სიმძლავრე, ანტენის უფრო დიდი გაძლიერება და ოპტიმალური გადამტანი სიხშირე, რათა კონკურენცია გაუწიოს მიწისქვეშ გზაში დანაკარგებს. გარდა ამისა, თანამგზავრების მობილურობისა და LoRaWAN-ის მიღების ფანჯრების მკაცრად შეზღუდული ხანგრძლივობის გამო, დაუნლინკში კომუნიკაციის დამყარება კრიტიკული გამოწვევა იქნება U-DtS-ისთვის.

6.6. მეექვსე თავის დასკვნა

ახლახან შემუშავებული DtS mMTC-ის მიწისქვეშა დომენზე გასავრცელებლად, ამ თავში ჩვენ განვიხილავთ მიწისქვეშა DtS-ის (U-DtS) გაერთიანებას WUSN-ებთან და DtS mMTC-ებთან. პირდაპირი და არაპირდაპირი არქიტექტურების წარმოდგენის შემდეგ, ჩვენ ყურადღებას ვამახვილებთ U-DtS-ის მიზანშეწონილობის შეფასებაზე. რეალური მეურნეობის სცენარის ვრცელი კომპიუტერული სიმულაციის მეშვეობით LoRaWAN-ის ორი MCS-ით (LoRa და LR-FHSS) შექმნილი სისტემისათვის, რიცხვითი შედეგები აჩვენებს, რომ LR-FHSS აღწევს საიმედო კავშირს რამდენიმე ათეული სანტიმეტრის სიღრმეზე ჩამარხულ მიწისქვეშა მოწყობილობას და თანამგზავრს შორის ინტერფერენციების მნიშვნელოვანი ჩახშობით. მეორე მხრივ, ჩვეულებრივი LoRa MCS უარესად ფუნქციონირებს ლინკის ბიუჯეტის შეზღუდვის, პაკეტების შეჯახების მაღალი ალბათობისა და რთულ მიწისქვეშა გარემოში ძლიერი მილევის გამო. წარმოდგენილი შედეგები ასევე მიუთითებს ნიადაგის პირობების (მაგალითად, VWC და თიხის პროცენტული მაჩვენებელი) გავლენაზე საკომუნიკაციო არხზე და შემოთავაზებული U-DtS მიდგომის ეფექტიანობის საერთო მახასიათებელზე. ვფიქრობთ ამ თავში მოცემული შედეგები, რომელიც ადგენს საბაზისო დონეს და ადასტურებს LoRaWAN U-DtS-ის პოტენციურ მიზანშეწონილობას, მოტივაციას გაუწევს მომავალ მოდელირებას და ექსპერიმენტებს ამ ახალი კონცეფციის შემდგომი განვითარებისთვის.

თავი 7 LEO თანამგზავრებზე დაფუძნებული პოზიციონირება მომავალი თანასწორი წვდომის ლოკალიზაციისთვის

7.1. შესავალი

პირველ რიგში მოვიყვანთ რამდენიმე განმარტებას:

- პოზიციონირება, ეს არის ადგილმდებარეობისა და ორიენტაციის აკურატულად და ზუსტად განსაზღვრის შესაძლებლობა ორგანზომილებიან (ან, როცა საჭიროა სამგანზომილებიან) მითითებულ სტანდარტულ გეოდეზიურ სისტემაში (როგორიცაა მსოფლიო გეოდეზიური სისტემა 1984, ან WGS84);
- ნავიგაცია, ეს არის მიმდინარე და სასურველი პოზიციის (ფარდობითი ან აბსოლუტური) დადგენის და კურსის, ორიენტაციისა და სიჩქარის კორექტირების უნარი, რათა მივაღწიოთ სასურველ პოზიციას მსოფლიოს ნებისმიერ წერტილში, დედამიწის წიაღიდან მის ზედაპირამდე და დედამიწის ზედაპირიდან კოსმოსამდე;
- თაიმინგი, ეს არის დროის აკურატულად და ზუსტად მოპოვების და შენარჩუნების უნარი სტანდარტის მიხედვით (კოორდინირებული უნივერსალური დრო, ან UTC), მსოფლიოს ნებისმიერ წერტილში და მომხმარებლის მიერ განსაზღვრული დროულობის პარამეტრების ფარგლებში. თაიმინგი ასევე მოიცავს დროის მონაცემების გადაცემას.

პოზიციონირების, ნავიგაციისა და თაიმინგის (PNT) სერვისები ძირითადად უზრუნველყოფილია გლობალური სანავიგაციო თანამგზავრული სისტემების (GNSS) სიგნალებით, რომლებიც გადაცემულია დედამიწის საშუალო ორბიტის თანამგზავრებით (MEO). GNSS გვთავაზობს უწყვეტ, გლობალურ და უფასო პოზიციონირებას შენობის გარეთ (შემდგომში, სიმარტივისთვის — გარე) სივრცეებში, სიზუსტით რამდენიმე მეტრამდე და უფრო ნაკლებ დონემდე. მიუხედავად იმისა, რომ GNSS წარმატებული ტექნოლოგიაა მრავალი აპლიკაციისთვის, მას აქვს გარკვეული უარყოფითი მხარეები, მათ შორის შემდეგი:

- შენობების შიგნით არსებულ არეალში ლოკალიზაციის ზუსტი გადაწყვეტილებები ამჟამად მიუწვდომელია მიღებული სიგნალის სისუსტის გამო;
- მჭიდრო ურბანულ დასახლებებში, გვირაბებითა და მკვრივი ფოთლებით/ხეებით სავსე უბნებში, გვაქვს ცუდი მახასიათებლები მრავალგზიანი არეკვლისა და ძლიერი მილევის გამო;
- ახალი MEO თანამგზავრების გაშვებას ნავიგაციის შესაძლებლობების გასაუმჯობესებლად სჭირდება ხანგრძლივი დრო და ძვირადღირებული განვითარების ციკლი.

LEO თანამგზავრული სიგნალების არსებული შესაძლებლობების გაერთიანებით, ეს თავი გვიჩვენებს, თუ რამდენად მიზანშეწონილია მათი გამოყენება თანასწორი წვდომის ლოკალიზაციისთვის. მოყვანილია დღეისათვის გადაუჭრელი პრობლემები და გადაწყვეტები მათ მოსაგვარებლად. ასევე წარმოდგენილია საილუსტრაციო სცენარი LEO და MEO თანამგზავრების შენობის შიგნით (შემდგომში, სიმარტივისთვის — შიდა) დაფარვის შესადარებლად მიღებული გადამტანი სიგნალის და ხმაურის თანაფარდობის (C/N_0) და სიზუსტის გეომეტრიული შემცირების (GDOP) თვალსაზრისით, რომლებიც ორი ცნობილი და ფართოდ გამოყენებული მეტრიკაა ნავიგაციის საზოგადოებაში. აღვნიშნავთ, რომ GDOP-ით სარგებლობენ თანამგზავრულ ნავიგაციასა და საინჟინრო გეომატიკაში, რათა აღიწეროს შეცდომების გავრცელება, როგორც სანავიგაციო თანამგზავრის გეომეტრიის მათემატიკური ეფექტი პოზიციური გაზომვების სიზუსტეზე.

7.2. LEO თანამგზავრების მეგათანავარსკვლავედები და მათი შესაძლებლობები პოზიციონირების კუთხით

ამჟამინდელი LEO თანამგზავრული თანავარსკვლავედები განკუთვნილია სამი ძირითადი გამოყენებისთვის:

- გაუმჯობესებული მობილური ფართოზოლოვანი აპლიკაციები (მაგალითად, Starlink, Kuiper, OneWeb);
- საგნების ინტერნეტის აპლიკაციები და ვიწროზოლოვანი კომუნიკაციები (მაგალითად, Astrocast, Myriota);
- დედამიწაზე დაკვირვებისა და მეთვალყურეობის აპლიკაციები (მაგალითად, ICEYE, Satellogic).

როგორც წესი, ათასობით თანამგზავრის შემცველი LEO მეგათანავარსკვლავედები ფოკუსირებულია პირველ კატეგორიაზე, ხოლო დანარჩენი ორი კატეგორია ეყრდნობა რამდენიმე ასეულ თანამგზავრს თანავარ-სკვლავედზე.

როგორც წინა თავებში აღვნიშნეთ, მომავლის ცა მხარს დაუჭერს ათიათასობით LEO თანამგზავრს, სადაც პოზიციონირებისთვის ერთ-ერთი მთავარი უპირატესობა დედამიწაზე თანამგზავრების გაზრდილი ხილვადობა იქნება. მიუხედავად იმისა, რომ არცერთი ზემოხსენებული თანავარსკვლავედი არ არის შექმნილი სპეციალურად პოზიციონირების მიზნებისთვის, მათი უსადენო სიგნალები შეიძლება გამოყენებულ იქნეს როგორც ოპორტუნისტული (შესაძლებლობების) სიგნალები (SoO) PNT გადაწყვეტის შესაფასებლად. SoO არის ნებისმიერი უსადენო სიგნალი, რომელიც შეიძლება გამოყენებულ იქნეს პოზიციონირებისთვის, მიუხედავად იმისა, რომ ის თავდაპირველად შექმნილი იყო სხვა მიზნისთვის. SoO არის კარგად დამკვიდრებული კონცეფცია, თუმცა, ის არ არის ფართოდ შესწავლილი LEO პოზიციონირების კონტექსტში.

SoO-ზე დაფუძნებული LEO მეგათანავარსკვლავედების საილუსტრაციო ბლოკ-სქემა ნაჩვენებია ნახ. 7.1-ზე, სადაც სამი არსებული LEO მეგათანავარსკვლავედია გამოსახული მაგალითის სახით. მიღებული სიგნალები შეიძლება დამუშავდეს SoO-ჰიბრიდიზაციის მოდულის მეშვეობით, რომელიც მუშაობს დროითი, დოპლერის ან დროითი-დოპლერის გაზომვებით. თუ LEO თანამგზავრის პოზიცია ცნობილია, PNT გადაწყვეტა შეიძლება ჩამოყალიბდეს მულტილატერაციის მეშვეობით, ანალოგიურად GNSS ოპერაციებისა (განვმარტავთ, რომ მულტილატერაცია, რომელიც ასევე ცნობილია როგორც ჰიპერბოლური პოზიციონირება, არის ობიექტის მდებარეობის განსაზღვრის პროცესი ობიექტის მიერ გასხივებული სიგნალის სამ ან მეტ მიმღებში მისვლის დროში სხვაობის ზუსტი გაანგარიშებით). შესაძლოა საჭირო გახდეს სინქრონიზაციის ამოცანების გადაჭრაც, როდესაც LEO სიგნალები არ არის ერთმანეთთან სინქრონიზებული.

LEO SoO შეიძლება განვიხილოთ სამ განზომილებაში, როგორებიცაა:

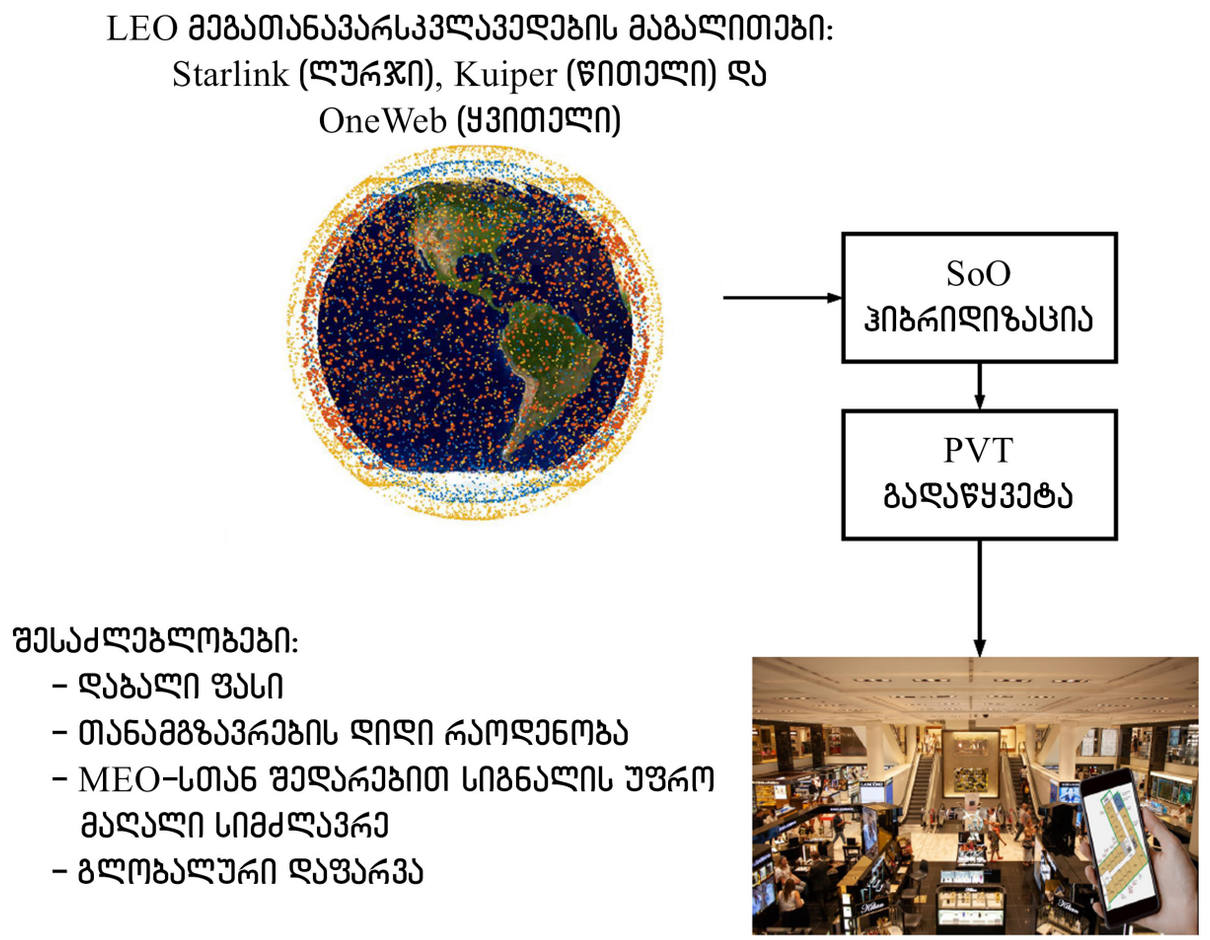
1. დროითი დომენი, რომელიც იყენებს სხვადასხვა LEO სიგნალებს, გადაცემულს სხვადასხვა სიხშირეზე და სიხშირულ ზოლში;

2. კუთხის/სივრცითი დომენი;

3. დოპლერის/სიხშირული დომენი, LEO თანამგზავრების მაღალი ორბიტული სიჩქარისა და მდიდარი სიხშირული სპექტრის გამოყენებით.

LEO თანამგზავრების უმეტესობა აღჭურვილი იქნება მრავალანტენიანი მესრებით, რაც უზრუნველყოფს სხივის ფორმირებას და საანტენო სხივების სივრცით-დროით „თითის ანაბეჭდებს“. მაგალითად, LEO თანავარსკვლავედებიდან გამოგზავნილი სიგნალების უმეტესობა მოქმედებს Ku, K ან Ka სიხშირულ დიაპაზონში, კერძოდ 12–40 გჰც-ის ფარგლებში, სადაც გზაში დანაკარგები დაახლოებით 10–30 დბ-ით მეტია L სიხშირული დიაპაზონის (1–2 გჰც) MEO GNSS-თან შედარებით. მაღალი გადამტანი სიხშირე ასევე ზრდის გზაში დანაკარგებს ატმოსფერული მილევის გამო. თუმცა, LEO თანამგზავრები მოქმედებენ ორბიტებზე, რომლებიც 10-დან 115-ჯერ უფრო ახლოს არიან დედამიწასთან, რაც გზაში მთლიანი დანაკარგებს 30 დბ-მდე ნაკლებს ხდის, ვიდრე იმავე სიხშირეზე მომუშავე MEO სიგნალისთვის. ამრიგად, გზაში დანაკარგებისთვის ეს საპირისპირო ეფექტები, კერძოდ ფუნქციონირება უფრო მაღალ გადამტან სიხშირეებზე, მაგრამ მიწასთან უფრო ახლოს, მოითხოვს საფუძვლიან შესწავლას.

LEO-ს, როგორც SoO-ს კიდევ ერთი პოტენციური სარგებელი პოზიციონირებისთვის, დაკავშირებულია კაპიტალურ დანახარჯებთან (CAPEX), პოზიციონირების ახალ სისტემაში ინვესტირებისთვის. ასეთი CAPEX



ნახ. 7.1. LEO მეგათანავარსკვლავედების საილუსტრაციო ბლოკ-სქემა SoO-ს სახით

ხარჯები სამმაგია: ინფრასტრუქტურის ხარჯები, რომელიც როგორც წესი, ყველაზე მაღალია სამ ნაწილს შორის; მიმღების/მომხმარებლის აღჭურვილობის ღირებულება; და მომსახურების/მოვლის ღირებულება. თუ ვივარაუდებთ, რომ არსებული ინფრასტრუქტურის გამოყენება შესაძლებელია დაბალ ფასად ან საერთოდ უფასოდ, LEO სიგნალებს ექნებათ აშკარა უპირატესობა ღირებულების კუთხით ლოკალიზაციის სხვა ტერე-სტრიალურ გადაწყვეტებთან შედარებით, მაგალითად, როგორებიცაა WiFi, ულტრა ფართოზოლოვანი (UWB) მოწყობილობა, დაბალი ენერგიის Bluetooth (BLE), ან ფიჭურ 5G-ზე დაფუძნებული პოზიციონირება, რომლებიც მოითხოვს მკვრივ ან ულტრა მკვრივ ინფრასტრუქტურას გონივრული დაფარვისთვის. შიდა პოზიციონირების არსებული ტექნიკის საფუძვლიანი გამოკვლევა გვიჩვენებს, რომ ლიტერატურაში აღწერილი ყველა მეთოდი ეყრდნობა ხელმისაწვდომ არსებულ შიდა ინფრასტრუქტურას, როგორიცაა WiFi/BLE წვდომის წერტილები ან ინტერნეტის წვდომის სხვა ფორმა.

თანასწორი წვდომის უზრუნველსაყოფად, ასევე შეზღუდული რესურსების და ტერესტრიალური უსადენო ინფრასტრუქტურის ნაკლებობის მქონე რეგიონების დაფარვისთვის, თანამგზავრებიდან მომავალი სიგნალების გამოყენება, რომლებიც უზრუნველყოფენ გლობალურ დაფარვას, ძალიან პერსპექტიული გამოსავალია. კერძოდ, 5G-ზე დაფუძნებული პოზიციონირება მოითხოვს მნიშვნელოვან ინვესტიციებს 5G ინფრასტრუქტურაში, რომელიც ეყრდნობა მკვრივ და ულტრა მკვრივ ქსელებს კარგი დაფარვისთვის, განსაკუთრებით მილიმეტრული ტალღების (mmWave) სიგნალებით. LEO მეგათანავარსკვლავედებს შეუძლიათ ერთდროულად უზრუნველყონ გლობალური დაფარვა და ასევე გადაიტანონ ინფრასტრუქტურის ხარჯების ტვირთი საბოლოო მომხმარებლიდან სისტემის მწარმოებელზე, რადგან მომხმარებელს სჭირდება მხოლოდ მიმღები, რომელიც თავსებადია

მოცემულ სიხშირულ დიაპაზონებთან. LEO ბიზნესმოდელები ჯერ კიდევ განსაზღვრის ფაზაშია და არსებული წინადადებებით ძირითადი შემოსავლის წყაროები მომხმარებლებიდან გადადის ინვესტორებზე. LEO-ზე დაფუძნებული პოზიციონირებისთვის დარჩენილი ძირითადი ხარჯები მომდინარეობს მიმღების ხარჯებიდან, სადაც მიმღების მიერ ჩატარებული დამუშავება უნდა მოიცავდეს PNT-ის გამოთვლას ერთი ან რამდენიმე LEO მეგათანავარსკვლავედის სიგნალზე დაყრდნობით. მიმღების ასპექტები LEO-ზე დაფუძნებულ პოზიციონირებაში ქვემოთ განიხილება.

LEO-ს, როგორც SoO-ს სრული პოტენციალის გასახსნელად, ჯერ კიდევ არის რამდენიმე გამოწვევა, რომლებიც უნდა გადაიჭრას. პირველ რიგში, ჩვენ განვიხილავთ სცენარებს, რომლებიც ადარებენ MEO-სა და LEO-ს შესაძლებლობებს და დეტალურად განვიხილავთ მიმღების დამუშავების დიზაინის ასპექტებს, თანაც ფოკუსირებული ვიქნებით MIMO-ს სხივის ფორმირების ინოვაციურ კონცეფციაზე პოზიციონირებისთვის. შემდეგ განვიხილავთ შესაძლებლობებს, გამოწვევებს და პრობლემების შესაძლო გადაწყვეტებს LEO-ზე დაფუძნებული შიდა ნავიგაციისთვის.

7.3. სცენარების მაგალითი და დიზაინთან დაკავშირებული მოსაზრებები

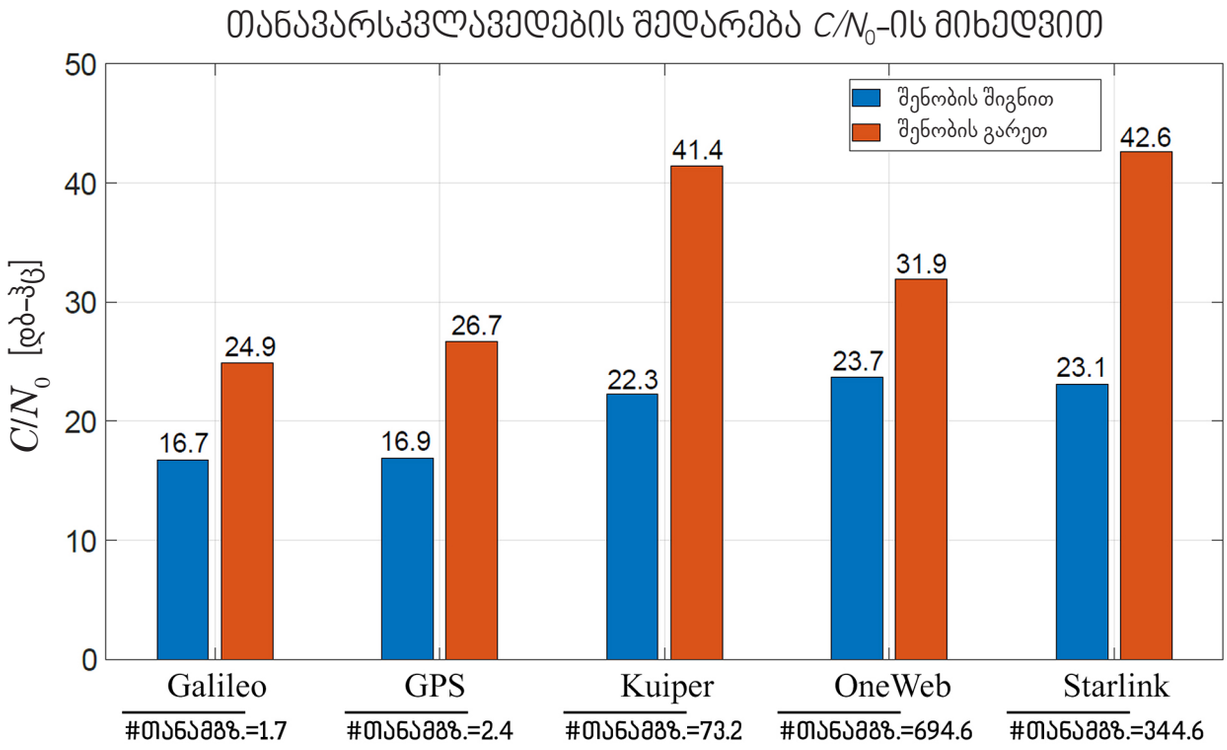
იმისათვის, რომ გავაანალიზოთ LEO-ს, როგორც SoO-ს პოტენციალი, საჭიროა რამდენიმე ასპექტის განხილვა, კერძოდ:

- მახასიათებლების მეტრიკის ანალიზი C/N_0-ის, ხილული თანამგზავრების რაოდენობის და თანამგზავრული გეომეტრიის თვალსაზრისით რეალისტური, NLoS შიდა სცენარის მიხედვით;
- LEO სიგნალის დამუშავების მიმღების დიზაინის ასპექტების განხილვა;
- ინოვაციური, MIMO-ზე დაფუძნებული მასიური დამუშავების კონცეფციის მოკლე აღწერა პოზიციონირებისთვის.

LEO-ს პოტენციალი — კერძო შემთხვევის შესწავლა:

ქვემოთ წარმოდგენილია მახასიათებლების მეტრიკის შედარება LEO-სა და MEO-ზე დაფუძნებული პოზიციონირების თვალსაზრისით. ამ მიზნით არჩეულია მახასიათებლის ორი მეტრიკა: შიდა C/N_0 და GDOP. გამოყენებულია Starlink, OneWeb და Kuiper, როგორც წარმომადგენლობითი LEO თანავარსკვლავედები, რომლებიც მუშაობენ 12–20 გჰც ზოლში (Ku/K დიაპაზონები) და Galileo და GPS, როგორც წარმომადგენლობითი MEO თანავარსკვლავედები, რომლებიც მუშაობენ 1.575 გჰც დიაპაზონში (L დიაპაზონი). გარდა ამისა, ნაჩვენებია ხილული თანამგზავრების საშუალო რაოდენობა განსაზღვრული დედამიწის ერთ წერტილზე და ერთ თანავარსკვლავედზე. განხილული MEO GNSS თანავარსკვლავედები დაახლოებით 20 000–23 000 კმ სიმაღლეზეა, ხოლო LEO თანავარსკვლავედები დაახლოებით 600 კმ, 1200 კმ და 300–600 კმ სიმაღლეზე, შესაბამისად Kuiper, OneWeb და Starlink თანავარსკვლავედებისთვის. C/N_0 არის ცნობილი მეტრიკა ნავიგაციის საზოგადოებაში, რომელიც განსაზღვრავს SNR-ის მოცემული მნიშვნელობისთვის სასურველ სიხშირულ ზოლს და, შესაბამისად, იზომება დბ-ჰც-ის ერთეულებში; ის ძირითადად ზომავს თუ რამდენად კარგად არის შესაძლებელი სიგნალის მიღება და დამუშავება შიდა სივრცეში: რაც უფრო მაღალია C/N_0, მით უკეთესია სიგნალის მიღება. GDOP არის საზომი, თუ რამდენად კარგია თანამგზავრის პოზიციის გეომეტრია; რაც უფრო მცირეა GDOP, მით უკეთესია გეომეტრია და, შესაბამისად, უფრო მაღალია პოზიციონირების სიზუსტე.

ნახ. 7.2 გვიჩვენებს საშუალო C/N_0 თანაფარდობის შედარებით მაგალითს შიდა და გარე სცენარებში დედა-მიწაზე 104 შემთხვევითი წესით განლაგებული მომხმარებლის ადგილას LEO/MEO სიგნალებისთვის. გზაში დანაკარგების სიმულატორი დაფუძნებული იყო ლიტერატურიდან ცნობილ QuaDRiGa პლატფორმაზე, რომელიც მოიცავს ანტენის გაძლიერებას, ატმოსფერულ შეყოვნებას და მრავალგზიან გავრცელებას. თანავარსკვლავედის ორბიტის სიმულატორი ეყრდნობა MATLAB-ის თანამგზავრული კომუნიკაციის პროგრამული უზრუნველყოფის კომპლექტს. განხილული სცენარი არის მკვრივი ურბანული სცენარი NLoS-ის გავრცელებით. თითოეული სცენარი შედგება 10 NLoS კომპონენტისგან. სცენარის განლაგება შეიცავს 60 მეტრამდე სიმაღლის შენობებს. იგულისხმება, რომ შიდა მიმღები განთავსებულია შენობის შიგნით 10 მ მანძილზე. სამი შერჩეული LEO



ნახ. 7.2. LEO და MEO მეგათავარსკვლავედების შედარება C/N_0 პარამეტრის მიხედვით

მეგათანავარსკვლავედი ნახ. 7.2-ზე იყენებს Ku/K (12–20 გჰც) სიხშირულ დიაპაზონებს, ხოლო GNSS თანავარსკვლავედები იყენებენ L დიაპაზონს (1.575 გჰც).

უნდა აღინიშნოს, რომ ზოგიერთი მომავალი LEO სისტემა გამოიყენებს კიდევ უფრო მაღალ გადამტან სიხშირეს, რომელიც უახლოვდება მილიმეტრულ ტალღებს. ნახ. 7.2-ზე LEO თანამგზავრების მიღების შესაძლებლობა უფრო მაღალია MEO-სთან შედარებით, რაც აჩვენებს უკეთეს პოტენციალს, ვიდრე GNSS შიდა მიღებისთვის. ამ ანალიზში, თანავარსკვლავედის თითოეული თანამგზავრისთვის EIRP დაყენებული იყო მნიშვნელობებზე 59 დბმ, 59 დბმ, 69.5 დბმ, 65 დბმ და 69.1 დბმ, შესაბამისად Galileo, GPS, Kuiper, OneWeb და Starlink თანავარსკვლავედებისთვის. შენობის გარეთ, LEO-ს C/N_0 დონეები 32–43 დბ-ჰც-ის დიაპაზონშია (Starlink-ს აქვს ყველაზე მაღალი C/N_0 თანაფარდობა დაბალი ორბიტული სიმაღლის გამო, რასაც მოჰყვება Kuiper), ხოლო C/N_0 განხილული MEO თანავარსკვლავედებისთვის არის დაახლოებით 25–27 დბ-ჰც. შენობაში, LEO-სა და MEO C/N_0-ს შორის განსხვავება ოდნავ უფრო მცირეა, ვიდრე გარეთ, მაგრამ მაინც შესამჩნევია: მიღებული C/N_0 არის დაახლოებით 17 დბ-ჰც და 16–19 დბ-ჰც LEO-სა და MEO-სთვის, შესაბამისად. მაშასადამე, LEO თანავარსკვლავედები აღწევს მოგებას 18 დბ-მდე გარე და 5 დბ-მდე შიდა სივრცეში. ნახ. 7.2 ასევე აჩვენებს მხედველობის არეში თანამგზავრების საშუალო რაოდენობას (# თანამგზ.) თითოეული შერჩეული შიდა თანავარსკვლავედისთვის (აქ იგულისხმება ის თანამგზავრები, რომელთაც აქვთ 10°-მდე ან მეტი სიმაღლის კუთხე მომხმარებლის კონკრეტული პოზიციიდან და მიღებული სიმძლავრე, მეტი ვიდრე მიმღების მგრძნობიარობა დაყენებული 150 დბმ-ზე, რომელიც არის ტიპური PNT მიმღების მგრძნობიარობა). კვლევაში არ იყო გათვალისწინებული ანტენის მიმართულობის დიაგრამის კონკრეტული ნიმუში, რადგან ანტენის მიმართულობის დიაგრამის შესახებ ინფორმაცია LEO თანამგზავრებზე ამჟამად არ არის საჯარო, თუმცა გამოყენებული იყო სიმაღლის კუთხეზე დაფუძნებული მომსახურების კუთხის მათემატიკური მოდელი სხივის ფორმირების ნაწილისთვის. MEO თანავარსკვლავედებისთვის, შენობაში მხედველობის არეში არსებული თანამგზავრების საშუალო რაოდენობა არის დაახლოებით 2, ხოლო LEO-სთვის ეს რიცხვი გაცილებით უფრო დიდია, რაც მიუთითებს უკეთეს დაფარვაზე და მულტილატერაციის შესანიშნავ პოტენციალზე (ანუ

ხორციელდება რამდენიმე თანამგზავრიდან სიგნალების გაერთიანება PNT გადაწყვეტილებების მისაღებად), და დაახლოებით ტოლია 73-ის, 694-ის და 344-ის, შესაბამისად Kuiper-ისთვის, OneWeb-ისთვის და Starlink-ისთვის. თანავარსკვლავედის კომპიუტერული სიმულაციის პროცესში, გამოყენებული იყო თანამგზავრების ჯამური დაგეგმილი რაოდენობა LEO მეგათანვარსკვლავედისთვის, რომელიც არის 7 774, 47 844 და 34 408, შესაბამისად Kuiper-ისთვის, OneWeb -ისთვის და Starlink-ისთვის.

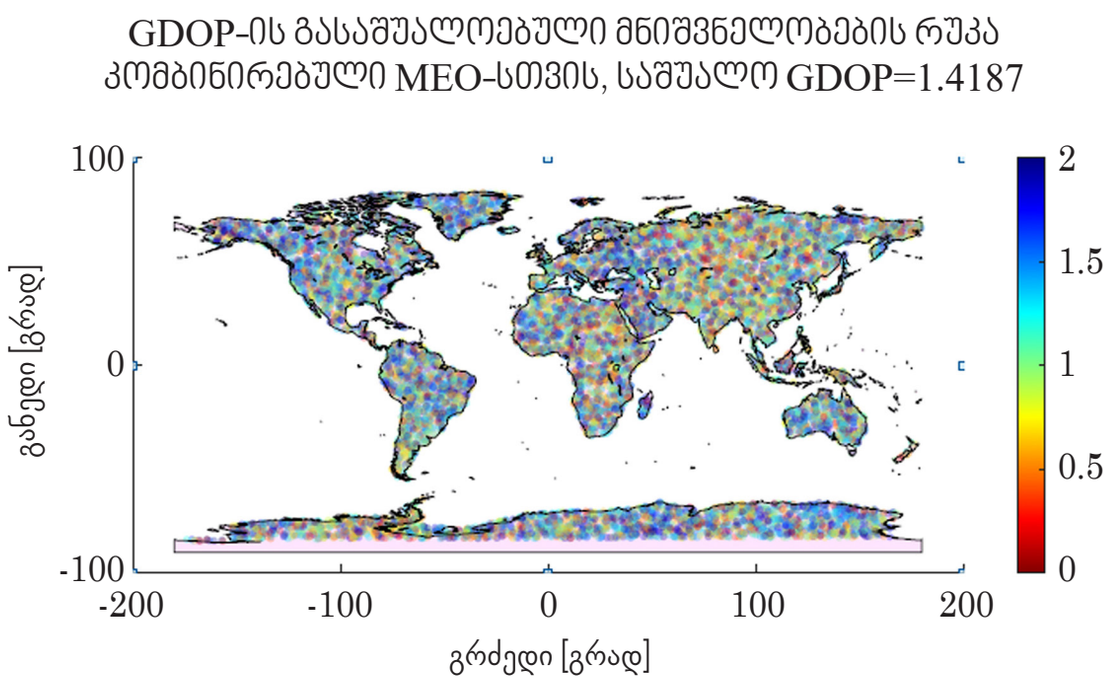
ნახ. 7.3 გვიჩვენებს GDOP შედარებას მრავალი თანავარსკვლავედის ერთობლივი დამუშავების შემთხვევაში: შედარება ხდება LEO თანავარსკვლავედის სამ კომბინაციას (ნახ. 7.3-ის ზედა ნაწილი) და MEO თანავარსკვლავედის ოთხ კომბინაციას შორის (ნახ. 7.3-ის ქვედა ნაწილი). ცაში თანამგზავრების ჯამური რაოდენობა MEO-ს ამჟამინდელი ოთხი თანავარსკვლავედისთვის (Galileo, Glonass, GPS და Beidou) არის 111, ხოლო ცაში თანამგზავრების ჯამური რაოდენობა სამი განხილული LEO თანავარსკვლავედისათვის (OneWeb, Kuiper და Starlink), რომელთა გაშვება იგეგეგმება უახლოეს ხუთ წელიწადში არის 44 732. ნახ. 7.3-ზე მოცემული შედეგები აჩვენებს, რომ LEO სიგნალების ერთობლივი დამუშავებით შესაძლებელია მიღწეულ იქნეს 1-ზე მნიშვნელოვნად დაბალი GDOP დონე და საშუალოდ 2.5-ჯერ უფრო დაბალი ვიდრე MEO-სთვის. გარდა ამისა, ჩვენ ასევე გამოვთვალეთ თანამგზავრების საშუალო რაოდენობა, მოსული დედამიწის ერთ წერტილზე: მხოლოდ სამი LEO მეგათანავარსკვლავედის კომბინაციით, შეგვიძლია მივიღოთ თანამგზავრების საშუალო რაოდენობა — 2 658 თანამგზავრი მხედველობის არეში, ხოლო გაერთიანებული ოთხი MEO GNSS სისტემის საშუალო მაჩვენებელია 35. ხილული მომავალი LEO თანამგზავრების მნიშვნელოვანი რაოდენობა დედამიწის ერთ წერტილზე შეიძლება იყოს პოზიციონირების ახალი მეთოდების მდიდარი წყარო, გარდა ტრადიციული, კოდზე დაფუძნებული და დოპლერის მონაცემებზე დაფუძნებული პოზიციონირებისა. მაგალითად, ქვემოთ განვიხილავთ ML-ს, რომელიც დაფუძნებულია სხივის მიმართულობის დიაგრამაზე.

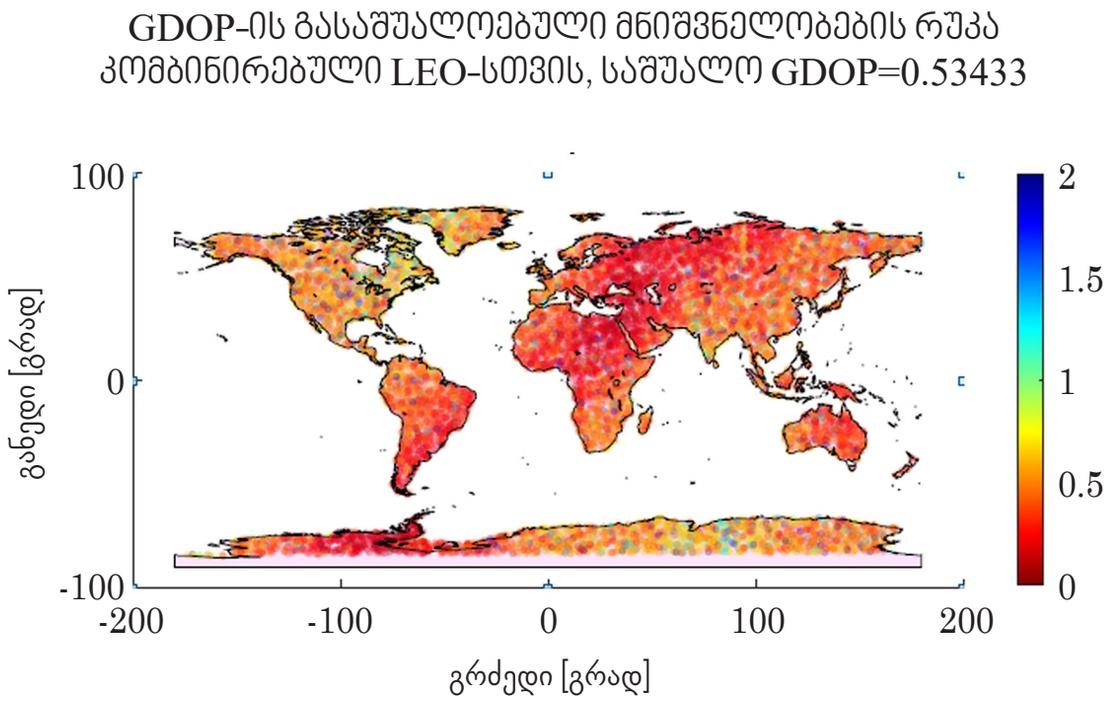
მიმღების დამუშავება:

LEO თანამგზავრების გამოყენებით ოპორტუნისტული ნავიგაციის მიმღების დიზაინის ერთ-ერთი მთავარი პრობლემა არის გადაცემულ სიგნალში მომხმარებლის პოზიციონირების პარამეტრების ნაკლებობა. იმის ნაცვლად, რომ დავეყრდნოთ ასეთ გადაცემას, როგორც ეს ხდება MEO GNSS-ის შემთხვევაში, დამატებითი წყაროები უნდა იქნეს გამოყენებული პოზიციონირების დაკარგული ინფორმაციის მისაღებად. თუ LEO თანამგზავრის გადამტანი სიხშირის დოპლერის წანაცვლება გამოყენებული იქნება პოზიციონირებისთვის, მიმღების პოზიციონირების გამოთვლის ალგორითმი უნდა იქნეს შემუშავებული განსხვავებულად, ვიდრე MEO GNSS მიმღებებისთვის, რათა გაიზომოს, დაკავშირდეს და დამუშავდეს ყველა ხილული LEO თანამგზავრის დოპლერის წანაცვლება. მიმღების ასეთმა ალგორითმმა ასევე უნდა გაითვალისწინოს სინქრონიზაციასთან დაკავშირებული უცნობი დროითი წანაცვლება თანამგზავრის საათსა და მიმღების საათს შორის, ასევე თითოეული ხილული თანამგზავრის უცნობი პოზიცია და გადაადგილების სიჩქარე.

გავრცელებული გადაწყვეტებია თანამგზავრის მდგომარეობის განსაზღვრა ორსტრიქონიანი ელემენტების (Two Line Element) ფაილებიდან, რომლებიც სავარაუდოდ ხელმისაწვდომი იქნება ღია წვდომით, მაგრამ თანამგზავრის მდებარეობის განსაზღვრის სიზუსტე ამ პარამეტრის საშუალებით ჩვეულებრივ ცუდია და საჭიროა გადაწყვეტები ამ შეცდომის წყაროს დასაძლევად. გარდა ამისა, დამატებითმა სენსორებმა, როგორებიცაა ალტიმეტრები ან ინერციული ნავიგაციის სენსორები, შეიძლება მოგვაწოდონ ზღვის დონიდან მომხმარებლის სიმაღლის შესახებ ინფორმაცია. დაკავებული პოზიციისა და დროითი წანაცვლების გამოთვლა შეიძლება განხორციელდეს, მაგალითად, გაფართოებული კალმანის ფილტრის გამოყენებით. გარე ინფორმაცია შეიძლება იყოს ინტეგრირებული LEO მიმღებში, თუ გამოიყენება პროგრამული უზრუნველყოფით განსაზღვრული რადიო (SDR).

როგორც ზემოთ იყო ნაჩვენები, LEO სიგნალებს აქვთ უფრო მაღალი C/N_0 თანაფარდობა და უკეთესი GDOP, ვიდრე MEO სიგნალებს, რაც მიმზიდველი მაჩვენებლებია LEO-ზე დაფუძნებული ოპორტუნისტული ნავიგაციის (opportunistic navigation) მხარდასაჭერად მიმღებ მხარეზე. უფრო მაღალ სიხშირეზე ფუნქციონირებად LEO თანავარსკვლავედებს დასჭირდებათ უკეთესი ელექტრონული კომპონენტები, უფრო სწრაფად ცვალებადი სიგნალის დასამუშავებლად. ეს, როგორც წესი, მოითხოვს უფრო მაღალ ეკონომიკურ დანახარჯებს. უფრო





ნახ. 7.3. GDOP კომბინირებული MEO GNSS-ისთვის (GPS, Galileo, BeiDou და Glonass, ზედა ნახაზი) და LEO-სთვის (Kuiper, OneWeb, ქვედა ნახაზი)

მეტიც, უფრო ფართო სიხშირული ზოლი ხელმისაწვდომია გადამტანი სიხშირის უფრო მაღალ დიაპაზონში GNSS-ის L-დიაპაზონთან შედარებით. უფრო ფართო სიხშირული ზოლი მოითხოვს უფრო რთულ და ძვირადღირებულ ზოლოვან ფილტრებს მიმღების შესასვლელში. ალტერნატიულად, შეიძლება გამოყენებულ იქნეს ქვედიაპაზონზე ან ფილტრების ბანკზე (filterbank) დაფუძნებული დამუშავება. LEO-ში უფრო ფართო სიხშირული ზოლი შეიძლება იყოს უპირატესობა, თუ ცნობილია სიგნალის მახასიათებლების შესახებ ინფორმაცია და, შესაბამისად, მისი გამოყენება შესაძლებელია ნავიგაციისთვის, რადგან უფრო ფართო სიხშირული ზოლი უზრუნველყოფს უფრო მაღალ სიზუსტეს დროზე დაფუძნებული პოზიციონირების კუთხით. მრავალი სიხშირის გამოყენება ასევე წარმოადგენს გამოწვევებს ანტენების დიზაინისთვის.

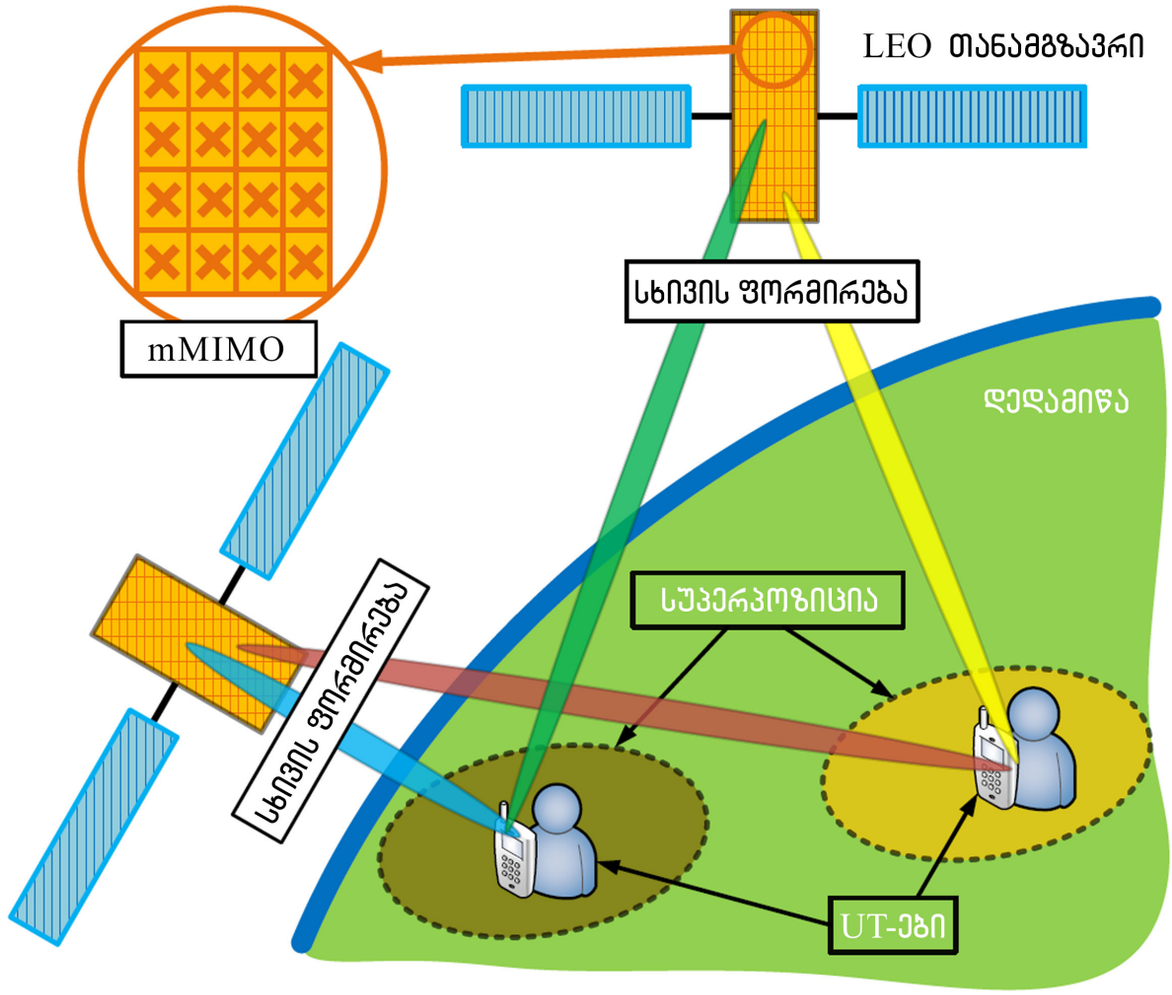
მასიური MIMO LEO-ზე დაფუძნებული პოზიციონირებისათვის:

მასიური MIMO-ს (mMIMO) დანერგვა LEO თანამგზავრებში ჯერ არ დაწყებულა, რადგან ეს თემა ჯერ კიდევ კვლევის პროცესშია. თუმცა, სხივის ფორმირების დანერგვამ mMIMO ტექნოლოგიებში შეიძლება გამოიყენოს LEO თანამგზავრები არა მხოლოდ თანამგზავრიდან დედამიწასთან რეგულარული კომუნიკაციებისთვის, არამედ როგორც SoO, პოზიციონირების მიზნებისათვის. mMIMO-ს კონცეფცია განხორციელებულია მრავალი საანტენო მესრის გამოყენებით (1000 ან მეტი ანტენის ელემენტი), რომლებიც დაშორებულია ტალღის სიგრძის ნახევრის ეკვივალენტური მანძილით, ნაცვლად ერთანტენიანი სისტემების გამოყენებისა, და ამდენად, მრავალგზიანი გავრცელების ტექნოლოგიების გამოყენებით. ამ კონფიგურაციას აქვს ბევრი უპირატესობა, რომელსაც შეუძლია გააძლიეროს LEO-ზე დაფუძნებული ლოკალიზაცია. ანტენების გამოყენება სივრცითი მულტიპლექსირებით აუმჯობესებს აპლინკისა და დაუნლინკის გამტარუნარიანობას, რადგან ეს ზრდის სისტემის ჯამურ გამტარუნარიანობას, მომსახურების ხარისხს და მონაცემთა გადაცემის სიჩქარეს. სხივის ფორმირების ერთ-ერთი მთავარი უპირატესობაა დედამიწაზე დაფარვის არეალის გაფართოება LEO თანამგზავრზე სივრცით-დროითი ბლოკური კოდირების გამოყენებით, რაც მაქსიმალურად ზრდის მომხმარებლების ტერმინალების (UT) რაოდენობას, როგორც ნაჩვენებია ნახ. 7.4-ზე. სხივის ფორმირების ეს კონცეფცია შეიძლება დამატებით იქნეს გამოყენებული პოზიციონირების კონტექსტში, რათა მივიღოთ სხივების გარკვეული ნიმუშები, რომლებიც ხილული იქნება მხოლოდ დედამიწის გარკვეულ წერტილში, გარკვეულ დროს. ML ალგორითმების შერწყმით ასეთ სხივის ფორმირების ინფორმაციასთან, შეიძლება ასევე შეიქმნას სხივის ფორმირებაზე დაფუძნებული პოზიციონირების ახალი კონცეფცია, რომელიც ჯერ კიდევ შესასწავლია. გარდა ამისა, მრავალი ანტენის გამოყენება სხივის ფორმირებისათვის ხელს უწყობს ენერგიის ფოკუსირებას, რითაც ის აუმჯობესებს ეფექ-ტიანობას და ამცირებს მგრძნობიარობას დაბლოკვისა და ინტერფერენციის მიმართ.

როგორც პოტენციური გამოწვევა, mMIMO-ს გამოყენება LEO თანამგზავრებში უფრო მაღალ ხარჯებთანაა დაკავშირებული, რადგან ისინი საჭიროებენ სიგნალის დამუშავებასთან დაკავშირებულ გაზრდილ რესურსებს როგორც გადამცემის, ასევე მიმღების მხარეს, რათა შეძლონ სისტემის პროგრამულ სეგმენტში რთული ალგორითმების გადაჭრა. გარდა ამისა, რთული ელექტრონული კომპონენტებია საჭირო თანამგზავრის მხარეს, რათა გააკონტროლოს ანტენების დიდი რაოდენობა აპარატურულ სეგმენტში. შესაბამისად, mMIMO მიმღებების ენერგიის ბიუჯეტი შეიძლება შეიზღუდოს mMIMO ML ფუნქციონირებისას ენერგიის დიდი მოხმარების გამო. ეს აწესებს ტექნიკურ შეზღუდვებს და ითხოვს დამატებით ხარჯებს სამომხმარებლო დონის მიმღებ მოწყობილობებზე. აღნიშნული პრობლემა შეიძლება დაიძლიოს გრძელვადიან პერსპექტივაში ნულოვანი ენერგიის მოწყობილობების გამოჩენით (ანუ მოწყობილობებით, რომლებიც იყენებენ გარემოს ენერგიას და ინტერფერენციის სიგნალებს და შეუძლიათ ბატარეების თვითდატენვა).

7.4. თანასწორი წვდომის უწყვეტ PNT სერვისებთან დაკავშირებული შესაძლებლობები, გამოწვევები და გადაწყვეტები

უწყვეტი PNT სერვისები წარმოადგენენ მდებარეობაზე დაფუძნებულ სერვისებს, რომლებიც ეყრდნობა, შენობების მიმართ როგორც შიდა, ასევე გარე ლოკალიზაციას. მიუხედავად იმისა, რომ GNSS-ს ამჟამად შეუძლია უზრუნველყოს გარე წვდომა უმეტეს რაიონებში, ზოგიერთი რთული გარე სცენარი, როგორიცაა მცენარეულობით



ნახ. 7.4. LEO თანამგზავრებში გამოყენებული mMIMO-ზე დაფუძნებული სხივის ფორმირების პრინციპი

მჭიდროდ დაფარული რეგიონები და/ან მთიანი რელიეფები, ისევე როგორც შიდა სცენარები კვლავ მოითხოვენ თანასწორი წვდომის პოზიციონირების სერვისებს. ასეთი თანაბარი ხელმისაწვდომობის გამოწვევებია, მაგალითად, ადეკვატური და საკმარისად მკვრივი სახმელეთო ინფრასტრუქტურის აშენების ღირებულება ან სირთულე, ბუნებრივი ჰაბიტატის ან ინფრასტრუქტურით ხელუხლებელი მწვანე ველის შენარჩუნების სურვილი და სცენარები, სადაც არსებული GNSS გადაწყვეტები ვერ გვთავაზობს საკმარისად საიმედო პოზიციონირებას, სხვადასხვა სახის განზრახ შექმნილი ან უნებლიე ინტერფერენციების გამო. პოზიციონირების თვალსაზრისით, ძირითადი განსხვავებები შიდა და გარე სივრცეებს შორის არის:

- მიღებული სიგნალის დაბალი სიმძლავრე შიდა სივრცეში კედლით გამოწვეული შთანთქმის, სიგნალის გაფანტვისა და მრავალგზიანი გავრცელების გამო;
- მრავალგზიანი გავრცელებით მდიდარი გარემო და LoS გავრცელების არარსებობა;
- სწრაფად ცვალებადი გავრცელების სცენარები, გამოწვეული ადამიანების გადაადგილებით, კარების დახურვითა და გახსნით, ავეჯის ადგილმდებარეობის შეცვლით და ა.შ.

ლოკაციებზე დაფუძნებულ სერვისებზე თანასწორი წვდომის მნიშვნელოვან შეზღუდვას ადგილი აქვს წვდომისას ისეთ ინფრასტრუქტურაზე, როგორიცაა WiFi/BLE/UWB/ფიჭური წვდომის წერტილები ან სხვა მსგავსი ინფრასტრუქტურა. ინფრასტრუქტურისგან თავისუფალ პოზიციონირების გადაწყვეტილებებს, როგორიცაა მაგნიტურ ველზე დაფუძნებული პოზიციონირება, შეიძლება ჰქონდეს ფარული ხარჯები სასწავლო ბაზების შესაქმნელად და შენახვაზე, რადგან ასეთი მეთოდები, როგორც წესი, ეყრდნობა მონაცემთა ავტონომიურად

შეგროვებას ML ალგორითმების მოსამზადებლად. ალტერნატივა შეიძლება იყოს საყოველადგილოდ ხელმისაწვდომი სიგნალების გამოყენება, როგორიცაა სიგნალები თანამგზავრული სისტემებიდან, დედამიწის ფართო არეალის დაფარვით. ორივე, MEO GNSS და LEO მეგათანავარსკვლავედებს ამჟამად აქვთ შესანიშნავი გარე დაფარვა და კიდევ უფრო მაღალი დაფარვაა მოსალოდნელი მომდევნო 5–10 წლის განმავლობაში მომავალი LEO თანავარსკვლავედებით.

შიდა ადგილმდებარეობაზე დაფუძნებულ სერვისებთან ურთიერთობისას, უსაფრთხოების საკითხების გადაწყვეტა უმნიშვნელოვანესია. MEO GNSS ამჟამად აგვარებს უსაფრთხოების საკითხებს გამოყოფილი ავთენტიფიცირებული სიგნალებით, როგორიცაა თანამგზავრული სისტემა Galileo–სთვის ღია სერვისის ნავიგაციის შეტყობინებების ავთენტიფიკაციით. LEO სისტემები ასევე მხარს უჭერს ავთენტიფიკაციის სხვადასხვა მექანიზმს, როგორიცაა ფიზიკური ფენის უსაფრთხოება ან ML–ის გამოყენება, რომლებიც ასევე პერსპექტიულია პოზიციონირების კონტექსტში.

დამატებითი გამოწვევაა თანამგზავრების რაოდენობასა და მიღწეულ დაფარვას შორის ურთიერთკომპრომისი, რადგან ორბიტაზე საჭიროა მრავალი LEO თანამგზავრი, რათა მათი დაფარვა შეესაბამებოდეს ერთი MEO თანამგზავრის დაფარვის ზონას. ამ გამოწვევას ადვილად გადალახავს LEO თანამგზავრების უზარმაზარი რაოდენობა, რომლებიც ცაში იქნება გაშვებული მომდევნო რამდენიმე წლის განმავლობაში. კიდევ ერთი გამოწვევა ის არის, რომ პატარა თანამგზავრები და იაფი გადამცემები LEO სისტემებში იწვევს ნაკლებად სტაბილურ დროით სინქრონიზაციას და, ამ მხრივ, უფრო მაღალ უზუსტობებს, უფრო მაღალ ფაზურ ხმაურს და I/Q დისბალანსს, და კომპონენტების უფრო მაღალ არაწრფივობას, ვიდრე MEO–ში, რაც დამატებით შეზღუდვებს უქმნის LEO–ზე დაფუძნებულ PNT–ის. მიუხედავად ამისა, აპარატურული უზრუნველყოფის ასეთი უზუსტობები იძლევა ფიზიკურ ფენაზე დაფუძნებული ავთენტიფიკაციის საშუალებას, როგორიცაა რადიოსიხშირული თითის ანაბეჭდი (RFF) ან ML ალგორითმები, რომლებიც იყენებენ თითოეული თანამგზავრული გადამცემის აპარატურულ ხარვეზებს, როგორც მეთოდს იმის დასადგენად, გადამცემი ავთენტურია თუ არა.

ქვემოთ შეჯამებულია არსებული შესაძლებლობები, თითოეული მათგანისთვის მოცემულია გამოწვევები და წარმოდგენილია შესაძლო გადაწყვეტები:

1. *შესაძლებლობა:* MEO თანამგზავრებთან შედარებით, სისტემის აშენებისა და გაშვების დაბალი ღირებულება.

გამოწვევა: ამჟამინდელი ორბიტული სიბრტყეები/ორბიტის სიმაღლეები არ არის ოპტიმიზებული PNT–სთვის.

გადაწყვეტა: დოპლერის მონაცემებზე, კუთხეზე, RFF–ზე და კოდზე დაფუძნებული პოზიციონირების კომბინაციამ შეიძლება საუკეთესოდ გამოიყენოს LEO SoO–ს შესაძლებლობები. მომავალი უსადენო მოწყობილობების დანერგვასთან ერთად, რომლებიც მხარს უჭერენ ტერესტრიალური და თანამგზავრული სიგნალების ინტეგრაციას მიმღების მხარეს, ლოკალიზაციის დამატებითი ამოცანები შეიძლება განხორციელდეს პროგრამული დანამატების სახით. LEO სიგნალების ტალღური სპეციფიკის გვერდის ავლა შესაძლებელია არა–დროზე დაფუძნებული ლოკალიზაციის გადაწყვეტილებების საშუალებით.

2. *შესაძლებლობა:* თანამგზავრების დიდი რაოდენობა სხვადასხვა LEO მეგათანავარსკვლავედებიდან.

გამოწვევა: LEO–ს თანავარსკვლავედები, როგორც წესი, არ არის სინქრონიზებული და არ არის აგებული ურთიერთქმედებისთვის; კოდზე დაფუძნებული პოზიციონირების მიდგომები შეიძლება რთული იყოს.

გადაწყვეტა: დოპლერის მონაცემებზე და კუთხეზე დაფუძნებული პოზიციონირების ჰიბრიდიზაცია ყველა არსებული თანავარსკვლავედისთვის; ბორტზე განთავსებული GNSS მიმღებები LEO თანამგზავრებს შორის სინქრონიზაციის პრობლემების გადასაჭრელად; LEO სერვისების ერთობლივი დიზაინი თავსებადობის გასაუმჯობესებლად.

3. *შესაძლებლობა:* თანამგზავრების მაღალ დინამიკასა და გაზრდილ სიჩქარეს შეუძლია უზრუნველყოს დოპლერის მონაცემებზე დაფუძნებული უკეთესი პოზიციონირება, ვიდრე MEO თანამგზავრებს.

გამოწვევა: პოზიციონირების მიზნების მისაღწევად ეფემერების (Ephemeris) გადაცემის მონაცემების მოპოვება შეიძლება რთული იყოს საკუთარი შეზღუდვების გამო; დოპლერის ფაზის/გადამტანის ფაზის გაურკვევლობა უნდა მოგვარდეს.

გადაწყვეტა: ბრმა დოპლერის შეფასება და მრავალსისტემური პოზიციონირება ბუნდოვანობისა და არასრული ინფორმაციის პრობლემის მოსაგვარებლად; გადამცემისა და მიმღების მდებარეობის ერთდროული განსაზღვრა გეომეტრიული მოდელირების გზით.

4. *შესაძლებლობა:* გლობალური დაფარვა, გაზრდილი ხილვადობა.

გამოწვევა: დედამიწის ერთი პოზიციიდან უნდა იყოს ხილული მინიმუმ ოთხი თანამგზავრი; საკომუნიკაციო მიზნებისთვის გლობალური დაფარვა ჯერჯერობით ოპტიმიზებულია მხოლოდ ერთი თანამგზავრის ხილვადობის შემთხვევისთვის.

გადაწყვეტა: სხვადასხვა მეგათანავარსკვლავედებიდან გადმოცემული სიგნალების გაერთიანება.

5. *შესაძლებლობა:* გზაში პოტენციურად ნაკლები დანაკარგები, ვიდრე აქვთ MEO თანამგზავრებს, დედამიწასთან უფრო ახლოს მდებარეობის გამო.

გამოწვევა: შენობის შიგნით წარმოქმნილი დამატებითი დანაკარგები საჭიროებს ფრთხილად მოდელირებას და მათ შემცირებას.

გადაწყვეტა: სხივის ფორმირების და მრავალანტენიანი LEO შესაძლებლობები შეიძლება გამოყენებულ იქნეს მრავალგზიან გავრცელებასთან დაკავშირებულ ხელშეშლებთან გაუმჯობესებული მეთოდებით საბრძოლველად.

6. *შესაძლებლობა:* გადამცემის მდიდარი აპარატურული ფუნქციები, გადამცემის სასარგებლო დატვირთვის წრედების არასრულყოფილების გამო (სიმძლავრის გამაძლიერებლები, მიქსერები და ა. შ.), ავთენტიფიკაციის/უსაფრთხოების ფუნქციას ასრულებს.

გამოწვევა: დროზე დაფუძნებული პოზიციონირების მეთოდები უფრო რთულია, თუ დროითი სინქრონიზაციის შეცდომები მაღალია.

გადაწყვეტა: დოპლერის მონაცემებზე/კუთხზე დაფუძნებული პოზიციონირება დროზე დაფუძნებული შეფასების უზუსტობების კომპენსაციისთვის ან დროზე დაფუძნებული შეფასებების მთლიანად ჩანაცვლება იაფი მიმღებებისთვის, რომლებიც მხარს უჭერენ მხოლოდ გარკვეულ ტალღურ ფორმებს.

7. *შესაძლებლობა:* ვიწროზოლოვანი მოდულაციები, რომლებიც უზრუნველყოფენ მიმღების მუშაობას უფრო დაბალი ენერგომოხმარებით (მაგალითად, მონაცემთა უფრო მაღალი სიჩქარით მიღების და ლინკის უკეთესი ბიუჯეტის გამო), ვიდრე MEO GNSS-ში გამოყენებული ფართოზოლოვანი მოდულაციები.

გამოწვევა: დროზე დაფუძნებული პოზიციონირების სიზუსტე იზრდება უფრო ფართო ხელმისაწვდომი სიხშირული ზოლის გამოყენებისას; ვიწროზოლოვანი მოდულაციებით შეიძლება ვერ იქნეს მიღწეული დროითი შეყოვნების შეფასების მაღალი სიზუსტე.

გადაწყვეტა: დროზე/კოდზე დაფუძნებული პოზიციონირება გაძლიერებული კუთხეზე/დოპლერის მონაცემებზე დაფუძნებული პოზიციონირებით თანამგზავრის მაღალი სიჩქარის და სხივის ფორმირების მდიდარი სტრუქტურების გამოყენებით; ML-ზე დაფუძნებული პოზიციონირება ასევე შეიძლება უზრუნველყოფილი იყოს LEO-ს მდიდარი სივრცითი მონაცემების გამოყენებით.

8. შესაძლებლობა: ავთენტიფიკაციისა და დაშიფვრის სიგნალების შემოღების შესაძლებლობა, რომელიც არ შემოიფარგლება ძველი MEO სიგნალებით.

გამოწვევა: ავტორიზებული წვდომა შეიძლება შეიზღუდოს LEO სერვისის პროვაიდერის მიერ.

გადაწყვეტა: ფიზიკური ფენის ავთენტიფიკაციის მექანიზმებმს, როგორიცაა RFF/ML, შეუძლიათ შეავსონ სიგნალები ავტორიზებული გამოყენებით.

პარაგრაფის ბოლოს აღვნიშნავთ, რომ ბაზართან დაკავშირებული სხვადასხვა ანგარიშის მიხედვით, როგორიცაა ReportLinker/MarketandMarket ანგარიშები, პოზიციონირების ბაზარი მკვეთრად გაიზრდება უახლოეს პერიოდში. საყოველადგილო ლოკალიზაციამ, როგორც მეგათანავარსკვლავედების მიერ შემოთავაზებული დაკავშირების სერვისის გვერდითმა პროდუქტმა, შესაძლოა გამოიწვიოს დეველოპერების/სტარტაპების ინოვაციების კიდევ უფრო მნიშვნელოვანი ზრდა, რაც ხელს შეუწყობს ბაზრის შემდგომ განვითარებას. LEO თანავარსკვლავედების სიძლიერე, რომელიც უზრუნველყოფს PNT-ის, არის ის, რომ სერვისი შეიძლება შეიქმნას ბაზრის სპეციფიკური მოთხოვნების დასაკმაყოფილებლად, რაც უზრუნველყოფს ბაზარზე ორიენტირებულ ახალ გადაწყვეტებს და არა ძველი სისტემების განახლებას.

7.5. შემაჯამებელი დისკუსიები და მეშვიდე თავის დასკვნა

თანამედროვე LEO მეგათანავარსკვლავედებს შეუძლიათ წარმადობა და ენერგოეფექტიანობა მომდევნო დონეზე აიყვანონ, თუ ისინი გადაკეთდება შიდა პოზიციონირების ფუნქციის შესასრულებლადაც, როგორც SoO, და კოსმოსიდან გამოყენებული იქნება კოდური, დოპლერის მონაცემებზე და სხივზე დაფუძნებული გაზომვები. LEO თანამგზავრების დიდი რაოდენობა და მათი სიახლოვე დედამიწასთან, ისევე როგორც ავთენტიფიკაციის/უსაფრთხოების სიგნალების უფრო მარტივი მხარდაჭერა, წარმოადგენს LEO-ს სასარგებლო თვისებებს, მაგრამ მათ მიერ უფრო ფართო ზოლის გადამტანი სიხშირეების გამოყენება (მაგალითად, 12 მჰც ან მეტი) შეიძლება შემაკავებელი ფაქტორი იყოს, გზაში დამატებითი დანაკარგების და შიდა შეღწევადობის დანაკარგების გამო. LEO მეგათანავარსკვლავედების, როგორც SoO-ს ლოკალიზაციის ფუნქციის დიდი უპირატესობა მდგომარეობს მათ პოტენციურ ნულოვან ღირებულებაში მსოფლიო მასშტაბით კოსმოსიდან სიგნალებზე თანასწორი წვდომის მიღწევისას, რაც მოხსნის შიდა ინფრასტრუქტურის სპეციფიკურ საჭიროებას და დაეყრდნობა მორგებულ SDR-ებს. პოზიციონირების მიზნობრივი მახასიათებლების კრიტერიუმები უნდა ჩამოყალიბდეს, როგორც ზუსტი პოზიციონირების, მაღალი დაფარვისა და მაღალი ენერგოეფექტიანობის მიღწევის მრავალგანზომილებიანი ამოცანა, რომელიც მოიცავს როგორც თავდაპირველად ჩამოყალიბებული საკომუნიკაციო მიზნების შენარ-ჩუნებას, რომლებისთვისაც გაშვებული იქნა LEO მეგათანავარსკვლავედები (მაგალითად, მაღალი გამტარ-უნარიანობა და დაბალი შეყოვნება კომუნიკაციებში), ასევე საბოლოო მომხმარებლების სრული უსაფრთხოებისა და კონფიდენციალურობის უზრუნველყოფას.

თუ ზოგიერთ მომავალ LEO მეგათანავარსკვლავედებში ასევე იქნება ბორტზე GNSS გადამცემები, შეიძ-ლება გათვალისწინებული იყოს დამატებითი ჰიბრიდული LEO-GNSS გადაწყვეტილებები, ბორტზე GNSS გადამცემებით, რომლებიც გვთავაზობენ სინქრონიზაციის ინფორმაციას, სინქრონიზაციასთან დაკავშირებულ კორექტირებას და ასევე დამხმარე მონაცემებს, როგორიცაა ატმოსფერული კორექტირება. მონაცემთა შერწყმა და ჰიბრიდიზაციის გადაწყვეტილებები შეიძლება დაეყრდნოს კლასიკურ ალგორითმებს, როგორიცაა კალმანის სრული და პარციალური ფილტრაცია, ან შეუძლია გამოიყენოს მიღწევები ML სფეროდან და ამავდროულად დარჩეს მომავალი კვლევების თემად. LEO მეგათანავარსკვლავედების გამოყენებით სანდო და ზუსტი პოზიციო-ნირებისთვის შეიძლება გამოყენებულ იქნეს ახალი მიდგომები ტრადიციულ ტრილატერაციასთან შედარებით, განსაკუთრებით კოდური და დოპლერის გაზომვების გაერთიანებისას. ნაკლებად სტაბილური დროითი სინქრონიზაციის და თანამგზავრების ზუსტი განლაგების გამოწვევებთან გასამკლავებლად, მათემატიკური და გამოთვლითი მეთოდები, რომლებიც ტრადიციულად გამოიყენება სხვა კონტექსტში, შეიძლება გაფართოვდეს მულტილატერაციის პრობლემის სწრაფი, ზუსტი და საიმედო გადაწყვეტილებების მოსაძებნად. მომავალი LEO თანამგზავრების მრავალსხივიანი ფორმირების გამტარუნარიანობა ასევე გვთავაზობს თითის ანაბეჭდზე დაფუძნებულ პოზიციონირებას, სადაც სხვადასხვა თანამგზავრების სხივების კომბინაციები დედამიწაზე უნიკალურ ანაბეჭდს გამოიწვევს და მისი იდენტიფიცირება შესაძლებელია ML ალგორითმების საშუალებით. კვლევები სხივის სიგანის შეზღუდვის მოთხოვნებთან დაკავშირებით, რათა უზრუნველყოფილ იქნეს საუკეთესო ადგილმდებარეობის მქონე თითის ანაბეჭდის შესაძლებლობები, ამჟამად ნაკლებად არის წარმოდგენილი ლიტერატურაში და რჩება მომავალი გამოკვლევების თემად.

დასასრულ აღვნიშნავთ, რომ LEO მეგათანავარსკვლავედებს აქვთ ჯერ კიდევ შეუსწავლელი პოტენციალი თანასწორი წვდომის შიდა ნავიგაციისთვის, განსაკუთრებით შორეულ და მწირად დასახლებულ ადგილებში დახურული სახლებითა და ქარხნებით, სადაც შიდა პოზიციონირების ამჟამინდელი გადაწყვეტილებები არ არის ხელმისაწვდომი. ათასობით LEO თანამგზავრი, რომლებიც მიეკუთვნება სხვადასხვა მეგათანავარსკვლავედს, გადაფარავს დედამიწას მომდევნო რამდენიმე წლის განმავლობაში და შესთავაზებს მსოფლიოს უსადენო სიგნალებს დაბალი და საშუალო ხარჯებით LEO მიმღებით აღჭურვილი საბოლოო მომხმარებლებისთვის. სახმელეთო და ციური ინფრასტრუქტურის ძირითადი CAPEX დანახარჯები უნდა დაფარონ LEO სისტემების მწარმოებლებმა და მათი ძირითადი შემოსავლის წყარო სავარაუდოდ იქნება საკომუნიკაციო სერვისები, როგორიცაა მობილური ფართოზოლოვანი ან IoT აპლიკაციები. ამავდროულად, კვლევის ნიშად რჩება ისეთი LEO სიგნალების გამოყენება, როგორიცაა SoO შიდა პოზიციონირებისთვის, სადაც დაბალი და საშუალო ღირებულების მიმღებები შეიძლება შეიქმნას LEO სიგნალების აღმოსაჩენად სხვადასხვა ახლომდებარე გადამტან სიხშირეებზე და შემდეგ გამოყენებულ იქნეს კოდზე, დოპლერზე, კუთხეზე და სხივის ფორმირებაზე დაფუძნებული პოზიციონირების ალგორითმები მომხმარებლების ადგილმდებარეობის განსაზღვრისათვის შენობის შიგნით.

თავი 8 კოსმოსურ-საჰაერო-სახმელეთო FSO ქსელები მაღალი გამტარუნარიანობის მქონე თანამგზავრული კომუნიკაციებისთვის

8.1. შესავალი

ბოლო წლების განმავლობაში, ტერესტრიალური საკომუნიკაციო ქსელები გადატვირთულია გამტარუნარიანობის მზარდი მოთხოვნით და საყოველადგილო დაფარვის საჭიროებით. კერძოდ, ინტერნეტტრაფიკი აგრძელებს გაორმაგებას ყოველ ორ წელიწადში. მოსალოდნელია, რომ ახალი 5G ქსელები უზრუნველყოფენ მობილურ ფართოზოლოვან სერვისებს და დააკავშირებენ ბევრ ჭკვიან მოწყობილობას. ასეთი განვითარება დამატებით ტვირთს აკისრებს ტერესტრიალურ ქსელებს, რათა უზრუნველყონ ბექჰოლის მხარდაჭერა 5G-სა და შემდგომი თაობის მობილური კავშირის სისტემებისთვის. გარდა ამისა, მხოლოდ ტერესტრიალური ქსელების გამოყენებით ძვირი ხდება სატელეკომუნიკაციო სერვისების მიწოდება ძნელად მისადგომ ადგილებში. თანამგზავრული საკომუნიკაციო სისტემები კარგად შეეფერება ამ ამოცანების გადაჭრას მათი უნიკალური უნივერსალური დაფარვის შესაძლებლობების გამო.

როგორც წინა თავებში აღვნიშნეთ, LEO თანამგზავრული თანავარსკვლავედები ახლახან გამოჩნდა, მომავლის კომუნიკაციების უკეთეს კანდიდატად ტრადიციულ GEO თანამგზავრულ სისტემებთან შედარებით მათი უფრო დაბალი შეყოვნების გამო და მათი უნარიდან გამომდინარე, დაუკავშირდნენ მიწისპირა ტერმინალების ფართო სპექტრს. ეს უკანასკნელი მოიცავს ფიქსირებულ სახმელეთო სადგურებს მოძრავ პლატფორმებზე, IoT მოწყობილობებს და 5G gNB-ებს. ამიტომ, LEO თანამგზავრების მეგათანავარსკვლავედები განკუთვნილია გლობალური ფართოზოლოვანი ინტერნეტით წვდომის უზრუნველსაყოფად. სამწუხაროდ, ჯერჯერობით ყველა არსებული LEO თანამგზავრული თანავარსკვლავედი დაფუძნებულია ძირითადად რადიოსიხშირულ (RF) ზოლებზე მარეგულირებელი ნორმებით, მაღალი დანახარჯებით და შეზღუდული გამტარუნარიანობით. ამიტომ, ერთი ბიტის გადაცემის ღირებულების შესამცირებლად და ხელმისაწვდომობის გაზრდის მიზნით, მნიშვნელოვანია თანამგზავრული საკომუნიკაციო სისტემის პროექტირება წამში ტერაბიტი გამტარუნარიანობით, რაც ძალიან რთულია ჩვეულებრივი RF ტრანსივერებისთვის.

RF სპექტრის სიმცირის პრობლემის მოსაგვარებლად და ტერაბიტი წამში მონაცემთა გადაცემის სიჩქარის ეკონომიური გზით მიღწევისთვის, ერთ-ერთი შესაძლო გამოსავალი ბევრად უფრო ფართო ოპტიკურ სპექტრში ფუნქციონირება და ოპტიკური გადაცემის ტექნოლოგიის დიდი პოტენციალის გამოყენებაა. კერძოდ, თავისუფალი სივრცის ოპტიკურ კომუნიკაციას (FSO) შეუძლია უზრუნველყოს მონაცემთა გადაცემის უკიდურესად მაღალი სიჩქარე. მაგალითად, გერმანიის საჰაერო კოსმოსურმა ცენტრმა 2018 წლის მაისში დაამტკიცა FSO კომუნიკაციის გამოყენების მიზანშეწონილობა GEO-ეკვივალენტურ ტურბულენტურ არხში მსოფლიო რეკორდის დამყარებით — 13.16 ტბიტი/წმ და ეს კვლევები წარმოადგენს „ტერაბიტიანი გამტარუნარიანობის ოპტიკური თანამგზავრული სისტემების ტექნოლოგიური პროგრამის“ ნაწილს. უახლოეს პერიოდში NASA გეგმავს დედამიწაზე პირდაპირი ლაზერული კომუნიკაციის დემონსტრირებას LEO-ს გამოყენებით, გადაცემის სიჩქარით 200 გბიტი/წმ და ეს იქნება „ტერაბაიტიანი ინფრაწითელი მიწოდების“ პროგრამის ნაწილი. უზარმაზარი ხელმისაწვდომი სიხშირული ზოლის გარდა, FSO კომუნიკაციები სარგებლობს რამდენიმე დამატებითი უპირატესობით, როგორიცაა არალიცენზირებული სპექტრი, ინტერფერენციებისადმი იმუნიტეტი, შემცირებული ზომა (≈ 0.1 RF) და ენერგიის დაბალი მოხმარება (≈ 0.5 RF). ამიტომ, FSO-ზე დაფუძნებული თანამგზავრული საკომუნიკაციო სისტემები იდეალური გადაწყვეტაა გადაცემული ბიტის ღირებულების შესამცირებლად და ხელმისაწვდომი მაღალსიჩქარიანი ინტერნეტით წვდომის უზრუნველსაყოფად მსოფლიოს ნებისმიერ წერტილში.

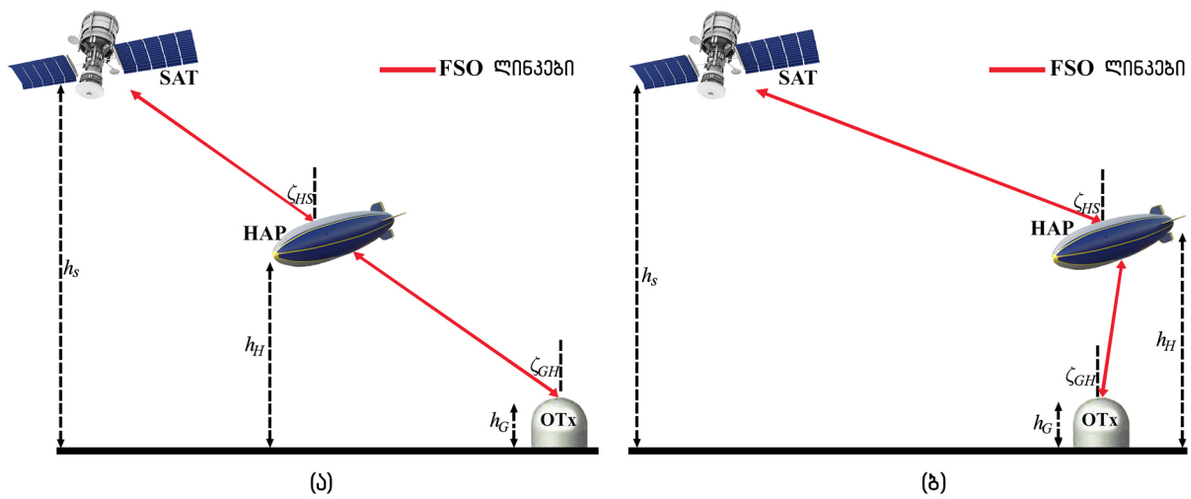
მეორე მხრივ, FSO კომუნიკაციები დაუცველია ატმოსფერული ტურბულენტობისა და მილევის მიმართ ამინდის სხვადასხვა პირობების გამო, როგორიცაა ნისლი, თოვლი და ღრუბლები. უფრო მეტიც, მიმღებსა და გადამცემს შორის შეუსაბამობით გამოწვეული შეცდომები და სხივის მოხეტიალე ბუნება გავლენას ახდენს FSO კომუნიკაციების საიმედოობაზე. საიმედოობის გაზრდის ერთ-ერთი გზაა FSO და RF ლინკების ინტეგრირება ერთ სისტემაში და მათი გაერთიანების ბუნების შესწავლა. RF კომუნიკაცია შედარებით დაცულია ატმოსფერული ტურბულენტობის, სხივის დამიზნების შეცდომების, ღრუბლების, თოვლის და ნისლის მიმართ, მაგრამ უფრო

მგრძნობიარეა ძლიერი წვიმისა და ჟანგბადის შთანთქმის მიმართ. შედეგად მიღებული ერთნახტომიანი (SH)-FSO/RF თანამგზავრული კომუნიკაცია სარგებლობს ორივე ლინკის უპირატესობით და თავიდან აიცილებს ამინდზე დამოკიდებულ ეფექტებს. იმავდროულად, სპექტრის დეფიციტის გამო, RF ლინკის გამოყენება შეამცირებს სისტემის გამტარუნარიანობას. ამიტომ, FSO ლინკის გამოყენებადობის გაუმჯობესება გადამწყვეტია მისი გადაცემის უფრო მაღალი სიჩქარის უკეთ მისაღწევად და თანამგზავრული საკომუნიკაციო სისტემებისთვის ტბიტი/წამში სიჩქარიანი გადაწყვეტილების შესაქმნელად, რისი წარმოდგენაც ამ თავის მთავარი მიზანია.

8.2. კოსმოსურ-საჰაერო-სახმელეთო FSO ქსელები

სარელეო გადაცემა HAP-ის საშუალებით კიდევ ერთი შესაძლო გადაწყვეტაა FSO-ლინკის გამოყენებადობის გასაზრდელად. ისეთი UAV-ები როგორებიცაა საჰაერო ბურთები, შეიძლება გამოყენებულ იქნეს სარელეო გადაცემის განსახორციელებლად მიწისპირა სადგურსა და თანამგზავრს შორის. ბოლო დროს, UAV საჰაერო ბურთებმა პოპულარობა მოიპოვა რამდენიმე პროექტში, მათ შორის Google-ის პროექტ Loon-ში, მათი უპირატესობების გამო სწრაფი განლაგების, მარტივი მოვლისა და საშუალო ოპერაციული ხარჯების კუთხით. ისინი, როგორც წესი, განლაგებულია სტრატოსფეროში, ზღვის დონიდან 17-დან 32 კმ-მდე, სადაც არ ხდება ამინდის ზემოქმედება. აქედან გამომდინარე, მათ შეუძლიათ უზრუნველყონ LoS კვაზი-სტაციონარული კომუნიკაციები, რომლებიც ძალიან საიმედოა. მათ ასევე შეუძლიათ ატარონ დიდი რაოდენობით საწვავი (ასობით კილოგრამი) და ასობით დღე იმუშაონ ჩარევის გარეშე (მაგალითად, NASA-ს ჰელიუმის ბურთების მსგავსად). ეს HAP-ზე დაფუძნებული FSO-ები ქმნიან კოსმოსურ-საჰაერო-სახმელეთო (SAG) FSO ქსელს თანამგზავრული კომუნიკაციისათვის. 2021 წლის დეკემბერში NASA-მ წამოიწყო ლაზერული სარელეო კომუნიკაციების დემონსტრირების მისია GEO-დან მონაცემების გადასაცემად 1.2 გბიტი/წმ სიჩქარით.

ლიტერატურაში შემოთავაზებული და შესწავლილი იყო SAG-FSO ქსელის ნიმუში, სადაც სარელეო HAP განლაგებულია მიწისპირა სადგურს (რომელსაც აქვს ოპტიკური გადამცემი (OTx)) და თანამგზავრს შორის ისე, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 8.1ა-ზე. თანამგზავრული საკომუნიკაციო სისტემის აპლინკში, FSO სიგნალი პირველად მიემართება მიწისპირა სადგურიდან HAP სარელეო სადგურამდე; შემდეგ HAP-ზე დაფუძნებული სარელეო სადგური გადასცემს თავის მიღებულ სიგნალს თანამგზავრზე, კვლავ FSO გადაცემის გამოყენებით. ასეთი SAG ქსელის დიზაინის მთავარი მიზანია შეამსუბუქოს სხივის ხეტიალით გამოწვეული დამიზნების შეცდომები (beam-wandering-induced pointing errors), რომლებიც უარესდება გავრცელების მანძილის მატებასთან ერთად. HAP-ის ჩართვით, FSO ლინკი დაყოფილია არსებითად უფრო მოკლე ქველინკებად. თანაგზავრული საკომუნიკაციო სისტემის აპლინკში SAG-FSO დიზაინი უზრუნველყოფს დაახლოებით 4 დბ



ნახ. 8.1. კოსმოსურ-საჰაერო-სახმელეთო FSO ქსელები: (ა) არსებული სისტემა; (ბ) ახალი სისტემა (h_S-ით, h_H-ით და h_G-ით აღნიშნულია შესაბამისად მანძილები თანამგზავრამდე (SAT) და HAP-მდე და OTx-ის სიმაღლე; ζ_{GH} და ζ_{HS} არის კუთხეები შესაბამისად OTx-სა და HAP-ს შორის და HAP-სა და თანამგზავრს შორის)

ენერგეტიკულ მოგებას SH–FSO გადაცემასთან შედარებით, სიმბოლოზე შეცდომის საშუალო ალბათობისთვის (SEP) 10^{-2}. მიუხედავად ამისა, ის იძლევა ძალიან მცირე გაუმჯობესებას SH–FSO დაუნლინკის სისტემასთან შედარებით, სადაც უგულებელყოფილია სხივის ხეტიალით გამოწვეული დამიზნების შეცდომები. მიუხედავად იმისა, რომ SAG–FSO–ის მახასიათებლებში განსხვავება აპლინკში და დაუნლინკში გადაცემას შორის რჩება, თანამგზავრული სისტემის აპლინკში მიღებული მოგება გვთავაზობს პოტენციურ გზას FSO ლინკის გამოყენებადობის გასაუმჯობესებლად.

ატმოსფერულ ტურბულენტობას ადგილი აქვს მაშინ, როდესაც აეროზოლის ნაწილაკები თბება ქარით და მზის შუქით, რაც ქმნის რყევებს რეფრაქციულ ინდექსში სიგნალის გზის გასწვრივ და, თავის მხრივ, ეს იწვევს შემთხვევით ცვლილებებს მიღებული ოპტიკური სიგნალის ფაზასა და ამპლიტუდაში. ატმოსფერული ტურბულენტობის სიძლიერე დამოკიდებულია აეროზოლის ნაწილაკების განაწილებაზე და ჩვეულებრივ იზომება გარდატეხის ინდექსის სტრუქტურული მუდმივით — C_n^2. მიუხედავად იმისა, რომ C_n^2 რჩება მუდმივი მიწისპირა ჰორიზონტალური ლინკებისთვის, ის მცირდება სიმაღლის მატებასთან ერთად. აღსანიშნავია, რომ აეროზოლის ნაწილაკები ძირითადად კონცენტრირდება დედამიწის ზედაპირიდან 2 კმ–ზე და ხდება უმნიშვნელო, როდესაც სიმაღლე 17 კმ–ზე მეტია. ლიტერატურაში აღწერილ ორნახტომიან FSO გადაცემაში, HAP განლაგებულია თანამგზავრსა და მიწისპირა სადგურს შორის არსებულ ხაზზე. მიწისპირა–HAP გადაცემა განიცდის იგივე დონის ტურბულენტურ ეფექტს, როგორც მიწიდან თანამგზავრზე გადაცემა. SAG–FSO გადაცემას შეუძლია შეამციროს სხივის ხეტიალით გამოწვეული დამიზნების შეცდომები, მაგრამ ვერ შეამსუბუქებს ატმოსფერულ–ტურბულენტურ ეფექტს FSO კომუნიკაციისთვის.

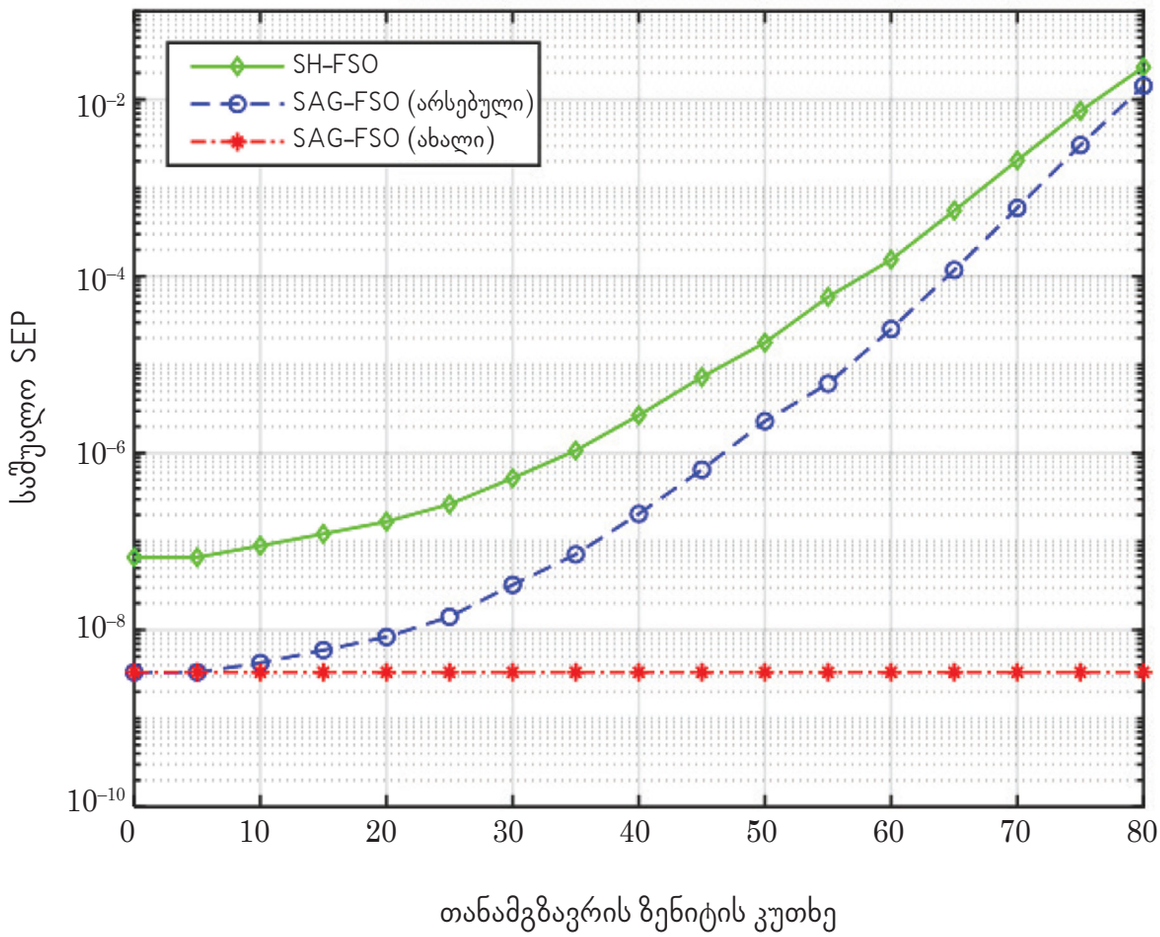
8.3. გაუმჯობესებული SAG–FSO ქსელი

FSO კომუნიკაციების მახასიათებლები მკვეთრად უარესდება, როდესაც გავრცელების მანძილი იზრდება ძლიერ ტურბულენტურ გარემოში. აღსანიშნავია, რომ რაც უფრო დიდია ზენიტის კუთხე, მით უფრო დიდ მანძილს გადის ოპტიკური სიგნალი მაღალი ტურბულენტობის პირობებში. იდეალურ შემთხვევაში, ჩვენ ვეძებთ FSO კომუნიკაციას ზენიტის პატარა კუთხის მიმართულებით, რაც ხშირად შეუძლებელია მიწიდან თანამგზავრამდე არსებული პირდაპირი ლინკებისთვის თანამგზავრების ზენიტის კუთხის გამო. ზენიტის კუთხე ფიქსირებულია GEO თანამგზავრებისთვის და იცვლება LEO თანამგზავრების საკომუნიკაციო სესიის დროს. თუმცა, როდესაც საქმე ეხება FSO გადაცემას SAG ქსელის საშუალებით, HAP–ის სტრატეგიულმა განლაგებამ უშუალოდ მიწისპირა სადგურის თავზე, ჩვეულებრივ, შეიძლება უზრუნველყოს გადაცემა ზენიტის პატარა კუთხის მიმართულებით. შედეგად მიღებული SAG–FSO ქსელი ნაჩვენებია ნახ. 8.1ბ–ზე. ახლად შემოთავაზებულ SAG–FSO ქსელში, HAP–ს აქვს ზენიტის ფიქსირებული და პატარა კუთხე მიწისპირა სადგურთან მიმართებაში, ანუ $\zeta_{GH} \leq 5^\circ$, რაც ამცირებს გავრცელების მანძილს ძლიერ ტურბულენტურ გარემოში და, შესაბამისად, მნიშვნელოვნად ამცირებს სხივის ხეტიალით გამოწვეულ დამიზნების შეცდომებს და სხივის ციმციმის ეფექტს, რომლებიც გვხვდება მიწისპირა სადგურიდან HAP–ზე FSO გადაცემის ნახტომის დროს. აქვე უნდა აღვნიშნოთ, რომ მიწისპირა სადგურის გეოგრაფიული მდებარეობიდან გამომდინარე, ყოველთვის არ არის შესაძლებელი HAP–ის განთავსება 5°–ზე ნაკლები ზენიტის კუთხით. აღსანიშნავია, რომ გავრცელების ეს მინიმალური მანძილი არ არის დამოკიდებული თანამგზავრის ზენიტის კუთხეზე, რაც მნიშვნელოვანია LEO თანამგზავრებთან მუშაობისას. გარდა ამისა, ლიტერატურაში ადრე აღწერილი SAG–FSO ქსელი უკეთ შეეფერება GEO თანამგზავრებს ზენიტის პატარა კუთხით. მეორე მხრივ, ამ თავში აღწერილი SAG–FSO ქსელი აზოგადებს ადრინდელ დიზაინს და კარგად მუშაობს როგორც LEO, ასევე GEO თანამგზავრებისთვის, ზენიტის ნებისმიერი კუთხით. ამ თავში წარმოდგენილი SAG–FSO ქსელი იძლევა ოდნავ უფრო დიდ გავრცელების მანძილს HAP–დან თანამგზავრამდე ადრე აღწერილ ანალოგიურ ქსელებთან შედარებით, განსაკუთრებით თანამგზავრის ზენიტის უფრო დიდი კუთხეებისთვის. იმავდროულად, 17 კმ–ზე მეტ სიმაღლეზე აეროზოლის დაბალი სიმკვრივის გამო, FSO გადაცემა HAP–SAT ნახტომის (გადასვლის) მეშვეობით აწყდება სუსტ ტურბულენტურ ეფექტებს. ამგვარად, სხივის ხეტიალით გამოწვეული დამიზნების შეცდომები და სხივის ციმციმით გამოწვეული ეფექტები მნიშვნელოვნად მცირდება.

ამრიგად, შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ შემოთავაზებული SAG–FSO–ის მახასიათებლები არ არის მგრძნობიარე თანამგზავრის ზენიტის კუთხის ცვალებადობის მიმართ, თუ ოპტიკურ ტრანსივერებს შეუძლიათ ზუსტად აკონტროლონ ერთმანეთი.

შერჩეული რიცხვითი შედეგების გამოყენებით, ჩვენ შევადარებთ ამ თავში წარმოდგენილ SAG–FSO დიზა–

ინს თანამგზავრული კომუნიკაციის ლიტერატურაში ადრე აღწერილ SH-FSO და SAG-FSO სისტემებთან, რათა ვაჩვენოთ შემოთავაზებული დიზაინის გაუმჯობესებული მახასიათებლები. ჩვენ ვვარაუდობთ, რომ FSO გადაცემები განიცდის გამა-გამა ფედინგს სხივის ხეტიალით გამოწვეული დამიზნების შეცდომებით. FSO კომუ-ნიკაციის პროცესში ქვეგადამტანის ინტენსივობის მოდულაციისთვის მისადაგებულია ორობითი ფაზური მო-დულაცია (BPSK). ოპტიკური მიმღები იყენებს პირდაპირ დეტექტირებას. ხმაურის გადამისამართების თავიდან ასაცილებლად, გამოყენებულია დეკოდირებისა და გადამისამართების სარელეო სქემა (decode-and-forward relaying scheme) HAP-ში. სისტემის პარამეტრებს ვაყენებთ შემდეგნაირად: FSO ლინკის ტალღის სიგრძეა 1550 ნმ; თანამგზავრის, HAP-ის და მიწისპირა სადგურის სიმაღლეებია, შესაბამისად — 620 კმ, 20 კმ და 1 მ; გადამცემი სხივის რადიუსი არის 0.02 მ, ქარის სიჩქარეა 21 მ/წმ, ოპტიკურ-ელექტრული ეფექტიანობაა 0.8 და მიწის დონეზე ტურბულენტობაა 1.7×10^{-14} $მ^{-2/3}$. აღსანიშნავია, რომ HAP-იდან თანამგზავრამდე და მიწისპირა სადგურიდან თანამგზავრამდე FSO ლინკების ზენიტის კუთხე იცვლება თანამგზავრის პოზიციის მიხედვით, ხო-ლო მიწისპირა სადგურიდან HAP-მდე FSO ლინკისთვის ის არ არის დამოკიდებელი თანამგზავრის პოზიციაზე და შენარჩუნებულია 5°-ზე. შედარების მიზნით და პრეზენტაციის სიცხადისთვის, ჩვენ ვვარაუდობთ, რომ მიწისპირა სადგურიდან თანამგზავრამდე, HAP-იდან თანამგზავრამდე და მიწისპირა სადურიდან HAP-მდე FSO ბმულებს აქვთ ერთნაირი საშუალო SNR. ამრიგად, ამ სამ FSO ლინკს შეიძლება ჰქონდეს სხვადასხვა გადაცემის სიმძლავრე. სისტემის მოცემული კონფიგურაციისთვის კარგი ამინდის პირობებში, როდესაც თანამგზავრული ზენიტის კუთხეა 80° და გამოიყენება იგივე FSO გადამცემები 90 დბ გადაცემის გაძლიერებით, 92 დბ მიღების გაძლიერებით, 250 მკვტ ფონური ხმაურის სიმძლავრით და 10 სმ აპერტურის დიამეტრით, გადაცემის საჭირო სიმძლავრე, რომლისთვისაც მიღწეული იქნება ერთნაირი 20 დბ-ის ტოლი საშუალო მიღებული SNR, განხილული

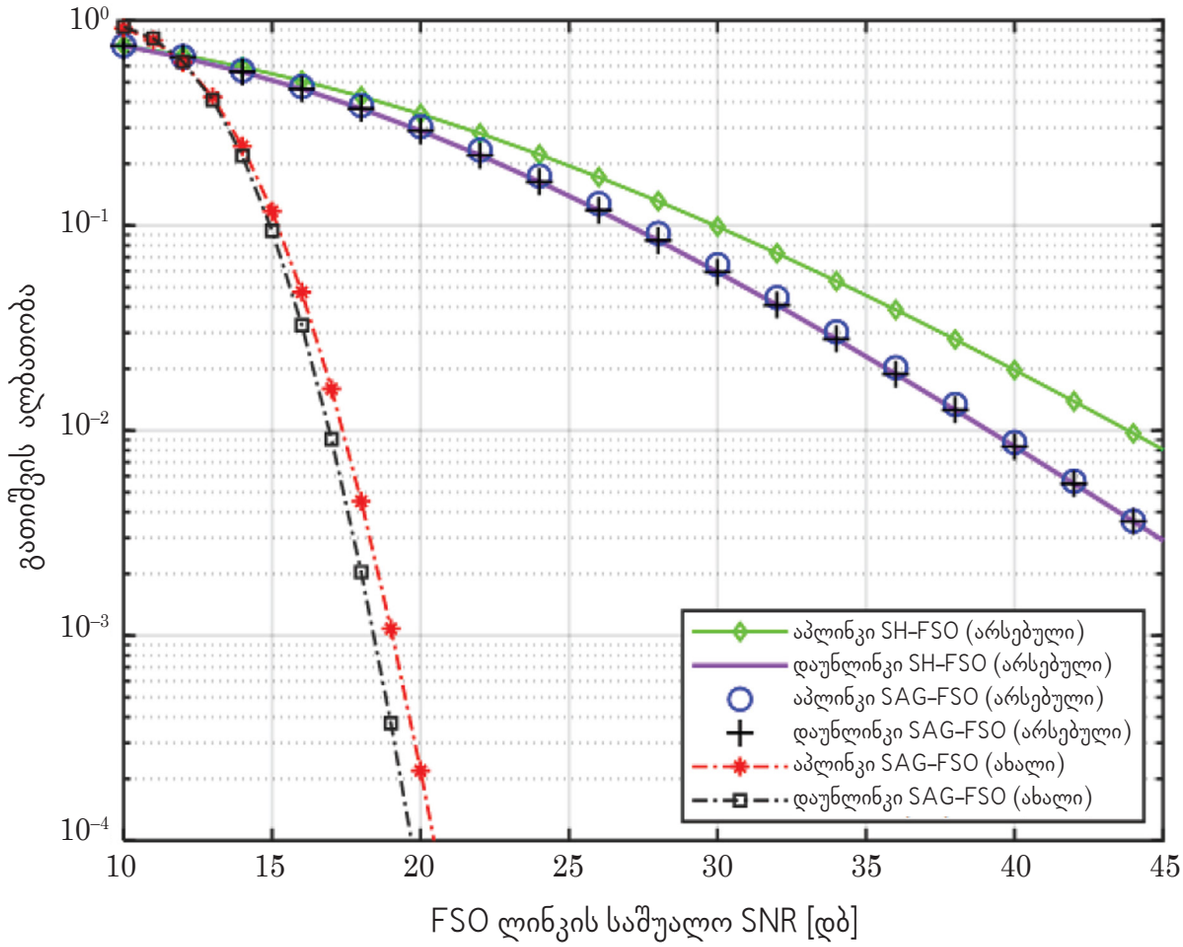


ნახ. 8.2. თანამგზავრის ზენიტის კუთხის ზეგავლენა საშუალო SEP მახასიათებელზე

FSO ლინკებისათვის, შესაბამისად, მიწისპირა სადგურიდან თანამგზავრამდე, HAP-იდან თანამგზავრამდე და მიწისპირა სადგურიდან HAP-მდე, არის 5.6 ვტ, 5.07 ვტ და 1.29 მკვტ. ამრიგად, SAG-FSO (მიწისპირა სადგური + HAP) ლინკის გადაცემის მთლიანი სიმძლავრე უფრო დაბალია, ვიდრე SH-FSO ლინკის. ანალოგიური დასკვნა კეთდება ზენიტის სხვა კუთხეებისთვის, SAG-FSO ქსელში ორკასკადიანი ოპტიკური გაძლიერების უპირატესობის გამო.

ნახ. 8.2-ზე, ჩვენ წარმოვადგენთ საშუალო SEP მახასიათებელს ცვალებადი თანამგზავრული ზენიტის კუთხებით. განიხილება თანამგზავრული კავშირის აპლინკის სცენარი და საშუალო მიღებული SNR არის 20 დბ. ამ ნახაზიდან შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ SH-FSO გადაცემის საშუალო SEP მნიშვნელობა არსებითად უარესდება 6.6×10^{-8}-დან 2.3×10^{-2}-მდე, რადგან თანამგზავრის ზენიტის კუთხე იზრდება 5°-დან 80°-მდე. მცირე და ფართომასშტაბიანი ფედინგის პარამეტრები SH-FSO ბმულზე იცვლება (31.46, 26.28)-დან (1.95, 2.11)-მდე თანამგზავრის ზენიტის კუთხისთვის, შესაბამისად, 5° და 80°. ეს შედეგი ასახავს თანამგზავრის ზენიტის დიდი კუთხეების სერიოზულ გავლენას საშუალო SEP მაჩვენებელზე. მიუხედავად იმისა, რომ როგორც ნაჩვენებია ადრინდელ ლიტერატურაში SAG-FSO გადაცემას შეუძლია შეინარჩუნოს გარკვეული გაუმჯობესება SH-FSO გადაცემასთან შედარებით, მისი საშუალო SEP უარესდება თანამგზავრის ზენიტის კუთხის მატებასთან ერთად. მეორეს მხრივ, შემოთავაზებული ახალი SAG-FSO გადაცემა იძლევა SEP-ის საუკეთესო მნიშვნელობას ($=3.3\times10^{-9}$) თანამგზავრის ზენიტის კუთხეების მთლიან დიაპაზონში. მახასიათებლის მიღწეული გაუმჯობესება განპირობებულია ატმოსფერული ტურბულენტური ეფექტების შერბილებით ზენიტის პატარა კუთხით FSO გადაცემისთვის მიწისპირა სადგურიდან HAP-ზე ნახტომის პროცესში.

ნახ. 8.3-ზე ჩვენ ვაჩვენებთ სისტემის გათიშვის (ფუნქციონირების შეწყვეტის) ალბათობას როგორც დაუნლინკის, ასევე აპლინკის გადაცემისთვის. აქ განვიხილავთ თანამგზავრის ზენიტის კუთხეს 80°-ს და



ნახ. 8.3. საშუალო SNR-ის ზეგავლენა გათიშვის ალბათობის მახასიათებელზე

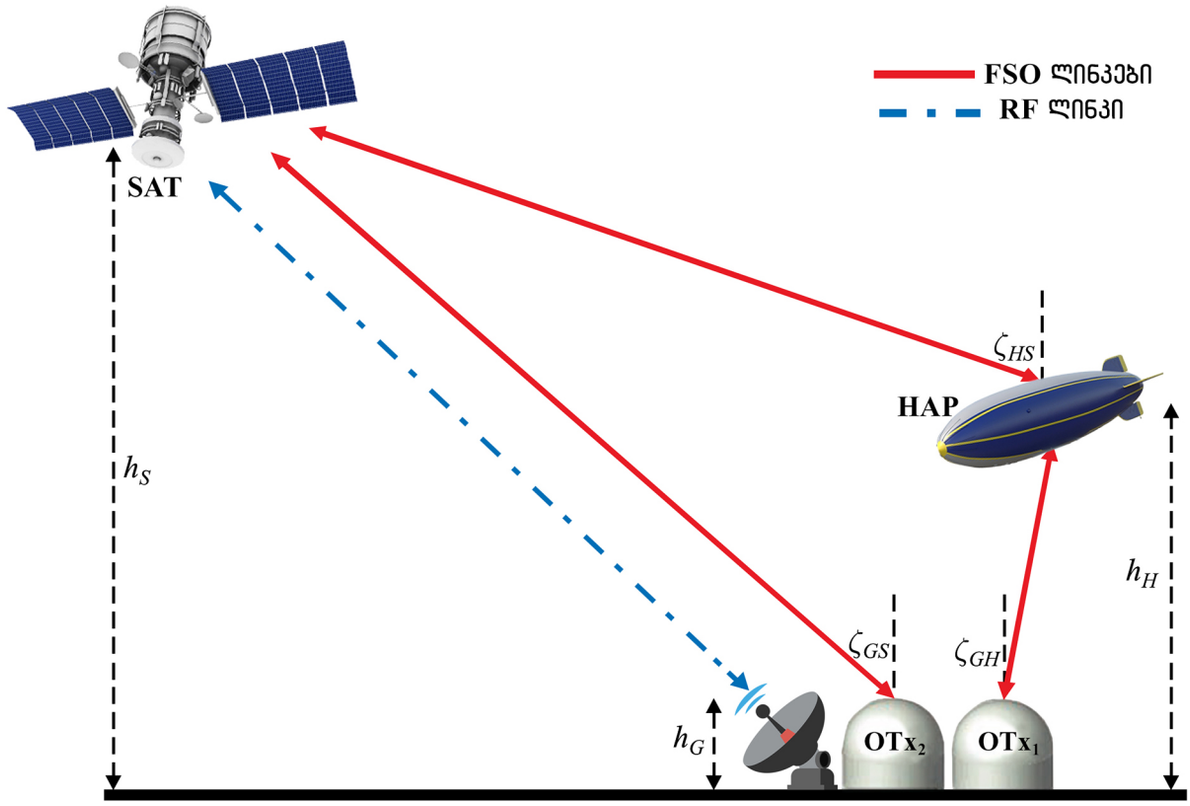
გათიშვის ზღურბლს 10.5 დბ–ს. ლიტერატურიდან ცნობილი SAG–FSO ქსელი აღწევს გარკვეულ გაუმჯობესებას SH–FSO–სთან შედარებით აპლინკში გადაცემისას, მაგრამ გაუმჯობესება უმნიშვნელოა დაუნლინკისთვის. ეს იმის გამო ხდება, რომ სხივის ხეტიალით გამოწვეული დამიზნების შეცდომები უგულვებელყოფილია დაუნლინკში გადაცემისას. მიუხედავად ამისა, შემოთავაზებული SAG–FSO ქსელი აღემატება ლიტერატურიდან ცნობილ SAG–FSO–ს დაახლოებით 22 დბ–ით, როგორც აპლინკისთვის, ისე დაუნლინკისთვის, როდესაც სისტემის გათიშვის ალბათობა არის 10^{-2}. შემოთავაზებული SAG–FSO ქსელი ასევე აღწევს დაახლოებით 0.6 დბ მოგებას დაუნლინ–კის სცენარში აპლინკთან შედარებით, აპლინკში ნარჩენი სხივის მოხეტიალე ბუნების გამო. მახასიათებლების უპირატესობა თანამგზავრული კომუნიკაციის სისტემების როგორც დაუნლინკის, ასევე აპლინკის სცენარებში მიუთითებს იმაზე, რომ შემოთავაზებული SAG–FSO ქსელი უფრო მიმზიდველია პრაქტიკული გამოყენებისთვის, ვიდრე ადრე შესწავლილი SAG–FSO დიზაინი ან SH–FSO გადაცემა. შემოთავაზებული SAG–FSO ქსელით, ჩვენ ვამცირებთ მიწისპირა სადგურის თვალთვალის სირთულეს HAP–ის განლაგებით ზენიტის ფიქსირებული და პატარა კუთხით. HAP–ზე განთავსებულ ოპტიკურ გადამცემს დასჭირდება თანამგზავრის მოძრაობის თვალყურის დევნება. იგივე თვალთვალის მექანიზმი, რომელიც გამოიყენება SH–FSO გადაცემაში, შეიძლება გამოყენებულ იქნეს HAP–ისთვის. გარდა ამისა, ორსაფეხურიანი ოპტიკური გამაძლიერებლები SAG–FSO გადაცემის პროცესში ხელს უწყობს გადაცემის საჭირო სიმძლავრის შემცირებას.

8.4. ინტეგრირებული SAG–FSO ქსელი თანამგზავრული კომუნიკაციების სისტემებისთვის

ნახ. 8.1ბ–ზე მოცემული SAG–FSO გადაცემის კარგი მახასიათებლების გამოყენებით ჩვენ წარმოვადგენთ ინტეგრირებულ SAG–FSO ქსელს თანამგზავრული კომუნიკაციის სისტემებისთვის. კერძოდ, ჩვენ განვიხილავთ ახალი SAG–FSO ქსელის გაერთიანებას ტრადიციულ ჰიბრიდულ SH–FSO/RF–თან, რათა შეიქმნას სანდო და მაღალი გამტარუნარიანობის გადაცემის სქემა თანამგზავრული კომუნიკაციისათვის. ასეთი სისტემის შემადგენლობაში შედის: მიწისპირა სადგური ერთი RF გადამცემით და ორი ოპტიკური გადამცემით; FSO–ზე დაფუძნებული HAP სარელეო სადგური, რომელიც განთავსებულია პირდაპირ მიწისპირა სადგურის თავზე; თანამგზავრი RF და FSO მიმღებებით, როგორც ნაჩვენებია ნახ. 8.4–ზე. ჩვენ ვუშვებთ, რომ თანამგზავრზე შეიძლება ჰიბრიდული FSO/RF ტერმინალების განთავსება.

აღსანიშნავია, რომ ორი ოპტიკური გადამცემი გამოიყენება SH–FSO და SAG–FSO გადაცემებს შორის გადართვის დროის შესამცირებლად. კერძოდ, OTx_1 მიმართულია HAP–ისკენ, ხოლო OTx_2 მიმართულია თანამგზავრისკენ SH–FSO გადაცემის განსახორციელებლად. თანამგზავრული საკომუნიკაციო სისტემის მუშაობის რეჟიმი ითვალისწინებს ერთზღურბლიან „ხისტ“ გადართვას. ჩვენ პრიორიტეტს ვანიჭებთ SAG–FSO გადაცემას მისი გადაცემის დაბალი საერთო სიმძლავრის და გაუმჯობესებული მახასიათებლების გამო SH–FSO გადაცემასთან შედარებით. კერძოდ, ინტეგრირებული სისტემა გამოიყენებს SAG–FSO გადაცემას, როდესაც მისი ხარისხი მისაღებია (ანუ არც მიწისპირა სადგურიდან HAP–ზე და არც HAP–იდან თანამგზავრზე გადახტომების მყისიერი SNR–ები არ არის გარკვეულ ზღურბლზე ქვემოთ). როდესაც FSO გადაცემა SAG ქსელის მეშვეობით მიუღებელია, თანამგზავრული კომუნიკაციის სისტემა შეამოწმებს SH–FSO ლინკს RF ლინკის აღდგენამდე. მიუხედავად SH–FSO ლინკის დაუცველობისა ატმოსფერული ტურბულენტობის ეფექტების მიმართ, მას შეუძლია უზრუნველყოს გადაცემის გაცილებით უფრო მაღალი სიჩქარე, ვიდრე შეზღუდული გამტარუნარიანობის მქონე RF ლინკს. გარდა ამისა, როდესაც თანამგზავრის ზენიტის კუთხე მცირდება, SH–FSO ლინკის მახასიათებლები მნიშვნელოვნად უმჯობესდება, როგორც ნაჩვენებია ნახ. 8.2–ზე. ინტეგრირებული თანამგზავრული კომუნიკაციის სისტემა მუდმივად ამოწმებს SAG–FSO ხარისხს და ააქტიურებს მას, როდესაც ის მისაღები იქნება. ჩვეულებრივი FSO/RF გადაწყვეტილებებისგან განსხვავებით, რომელიც იყენებს შეზღუდული გამტარუნარიანობის RF ლინკს, როგორც ერთადერთ სარეზერვო საშუალებას, ჩვენი ინტეგრირებული სისტემა ამატებს SH–FSO გადაცემის კიდევ ერთ სარეზერვო შესაძლებლობას, რაც მნიშვნელოვნად აუმჯობესებს სისტემის საიმედოობასა და მახასიათებლებს.

ინტეგრირებული ქსელის FSO ლინკები ბუნებრივად ქმნიან ორ FSO გზას მიწისპირა სადგურსა და თანამგზავრს შორის. როდესაც თანამგზავრის ზენიტის კუთხე არ არის ძალიან მცირე, ორივე SAG–FSO და SH–FSO გადაცემები უფრო მეტად განიცდიან დამოუკიდებელ ატმოსფერულ მილევას, რომელიც გამოწვეულია



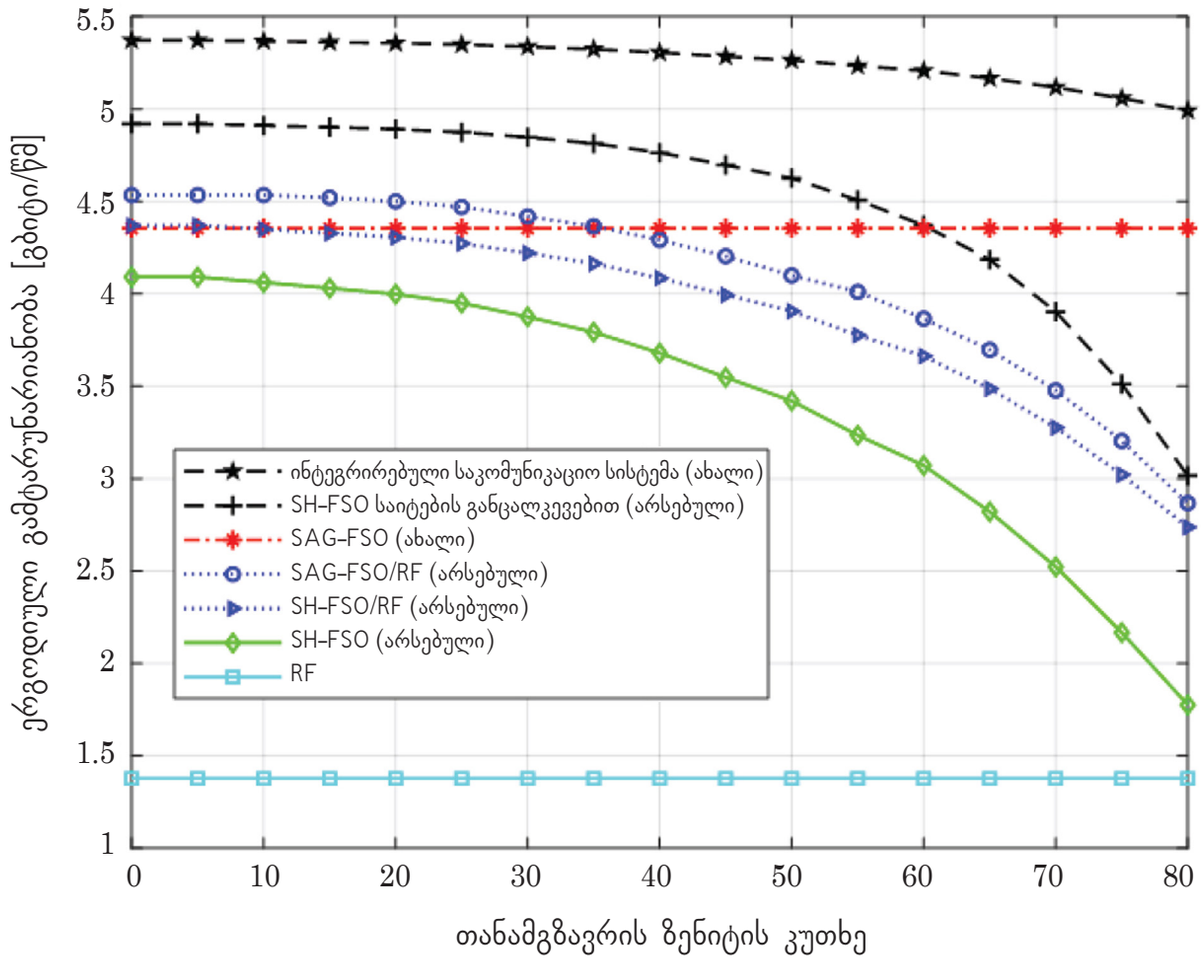
ნახ. 8.4. შემოთავაზებული ინტეგრირებული FSO ქსელი თანამგზავრული კომუნიკაციებისთვის (ζ_{GS} არის კუთხე დედამიწიდან თანამგზავრამდე (SAT), ხოლო დანარჩენი აღნიშვნები იგივე, რაც ნახ. 8.1-ზე)

მცირე ღრუბლებით. ღრუბლები წარმოიქმნება მიწიდან დაახლოებით 1 980-დან 6100 მეტრის სიმაღლეზე. უფრო მცირე ზენიტის კუთხითაც კი, ინტეგრირებულ ქსელს შეუძლია შეამსუბუქოს მოძრავი ობიექტების (ფრინველები, დრონები და ა. შ.) ბლოკირების ეფექტი, რაც საკმაოდ ხშირია ურბანულ რეგიონებში. დიდი ღრუბლების შემთხვევაში, ინტეგრირებული ქსელი შეიძლება გაერთიანდეს საიტების განცალკევებასთან, რათა გაზარდოს FSO ლინკის საიმედოობა. ორ FSO ლინკს შორის ადაპტიური გადართვით, ინტეგრირებულ ქსელს შეუძლია შეამსუბუქოს როგორც ამინდით, ასევე ტურბულენტობით გამოწვეული ფედინგის ეფექტები.

ინტეგრირებული ქსელი განსაკუთრებულად კარგად მუშაობს LEO თანამგზავრებთან. LEO თანამგზავრის საკომუნიკაციო სესია ფიქსირებულ მიწისპირა სადგურთან შეზღუდულია რამდენიმე წუთით მისი სწრაფი მოძრაობის გამო. სესიის სავარაუდო ხანგრძლივობა მერყეობს 8-დან 16 წუთამდე, რაც დამოკიდებულია თანამგზავრის ორბიტის დახრილობის კუთხეზე. თანამგზავრის მოსაპოვებლად საჭირო დროის გამო, კომუნიკაციის რეალური დრო კიდევ უფრო მცირდება. ამ პირობებში სასურველია მოპოვების პროცედურის დაწყება, თანამგზავრის ჰორიზონტზე გამოჩენისთანავე და FSO ლინკის გამოყენებადობის გაზრდა საკომუნიკაციო სესიის დროს. მიწისპირა სადგურიდან დაახლოებით 20 კმ-ით ამაღლებული HAP სარელეო სადგურის გამოყენებით, შემოთავაზებულ SAG-FSO ლინკს თანამგზავრის მოპოვება ბევრად უფრო ადრე შეუძლია, ვიდრე SH-FSO ლინკს. გარდა ამისა, SAG-FSO გადაცემის მახასიათებელი არ არის მგრძნობიარე თანამგზავრის ზენიტის კუთხის მიმართ, რომელიც მკვეთრად იცვლება საკომუნიკაციო სესიის დროს (დაახლოებით 85°-დან 0°-მდე და ისევ 85°-მდე დასასრულს).

ნახ. 8.5-ზე ნაჩვენებია ახალი, ინტეგრირებული FSO ქსელის ერგოდიული გამტარუნარიანობის მახასიათებლები თანამგზავრული კომუნიკაციის სისტემებისთვის სხვადასხვა თანამგზავრული ზენიტის კუთხით. სისტემების შედარების მიზნით აქ ასევე წარმოდგენილია ერგოდიული გამტარუნარიანობის მახასიათებლები შემდეგი სისტემებისთვის: არსებული (ლიტერატურიდან ცნობილი) SH-FSO, ჰიბრიდული SAG-FSO/RF, ჰიბრიდული SH-FSO/RF, SH-FSO საიტების განცალკევებით და ახალი, ამ თავში განხილული SAG-FSO. ჩვენ

ვიყენებთ BPSK მოდულაციას RF გადაცემისთვის და რაისის ფედინგის მოდელს RF ლინკის დასახასიათებლად. ჩვენ განვიხილავთ აპლინკის სცენარს, FSO ლინკს სიხშირული ზოლით 1 გჰც, RF ლინკს სიხშირული ზოლით 300 მჰც, რაისის *K* კოეფიციენტს ტოლს 6-ის, და ვაყენებთ საშუალო მიღებულ SNR-ს ყველა ლინკზე და გადართვის ზღურბლს, შესაბამისად, 15 დბ-ის და 10.5 დბ-ის ტოლს. აქ ჩვენ ვიღებთ დამოუკიდებელ ფედინგს SH-FSO და SAG-FSO გადაცემებისთვის. თანამგზავრის ზენიტის კუთხისთვის 0°, ჩვენ გვჭირდება დაშორება დაახლოებით 19.4 სმ (ყველაზე ცუდი სცენარი) ორ ოპტიკურ გადამცემს შორის, რათა მივაღწიოთ მათთვის ურთიერთდამოუკიდებელ ფედინგს. ეს ნახაზი გვიჩვენებს, რომ არსებული SH-FSO ლინკის ერგოდიული გამტარუნარიანობა მცირდება 4.1 გბიტი/წმ-დან 1.7 გბიტი/წმ-მდე, როდესაც თანამგზავრის ზენიტის კუთხე იცვლება 5°-დან 80°-მდე. თუმცა, SH-FSO გამტარუნარიანობის ვარიაციით, ის სჯობნის RF ლინკს თანამგზავრული ზენიტის კუთხეების მთელ დიაპაზონში FSO ლინკის უფრო მაღალი ხელმისაწვდომი გამტარუნარიანობის გამო. როდესაც SH-FSO გადაცემა შერწყმულია საიტების განცალკევების სქემასთან, ერგოდიული გამტარუნარიანობის მახასიათებელი მნიშვნელოვნად უმჯობესდება, მაგრამ გამტარუნარიანობა რჩება მგრძნობიარე თანამგზავრის ზენიტის კუთხის ცვალებადობის მიმართ. აღსანიშნავია, რომ ამ თავში შემოთავაზებული SAG-FSO დიზაინი აღწევს გამტარუნარიანობის მოგებას თანამგზავრულ ყველა საკომუნიკაციო სისტემასთან მიმართებაში, სადაც გამოიყენება SH-FSO საიტების განცალკევებით, ჰიბრიდული SAG-FSO/RF და ჰიბრიდული SH-FSO/RF სქემები, თანამგზავრული ზენიტის უფრო დიდი კუთხეებისთვის, შემოთავაზებული SAG-FSO სქემის საიმედო დიზაინის წყალობით. გამტარუნარიანობის მცირე ცვალებადობის მიუხედავად, ამ თავში შემოთავაზებული ინტეგრირებული სისტემა უკეთესად მუშაობს, ვიდრე სხვა თანამგზავრული კომუნიკაციის სისტემები თანამგზავრული ზენიტის კუთხეების მთელ დიაპაზონში. მართლაც, ინტეგრირებული სისტემის მუშაობის გაუმჯობესება განპირობებულია



ნახ. 8.5. თანამგზავრის ზენიტის კუთხის ეფექტი ერგოდიული გამტარუნარიანობის მახასიათებელზე

თანამგზავრთან ორი FSO ლინკის გამოყენებით (ანუ SH–FSO და SAG–FSO). ამასთან, ერთზღურბლიანი ხისტი გადართვის სქემის გამოყენებამ შეიძლება გაამარტივოს მიმღების დიზაინი და მინიმუმამდე დაიყვანოს გადაცემისთვის საჭირო სიმძლავრე. გარდა ამისა, წარმოდგენილი მიდგომის უპირატესობები თვალსაჩინოა, როდესაც სისტემის ღირებულება შედარებულია SH–FSO–სთან საიტების განცალკევებით, რაც მოითხოვს დამატებით ინვესტიციებს ტერესტრიალურ ინფრასტრუქტურაში.

8.5. მერვე თავის დასკვნა

LEO თანამგზავრული საკომუნიკაციო ქსელებისთვის, FSO კომუნიკაცია გვთავაზობს მონაცემთა მაღალ გამტარუნარიანობას და გაზრდილ საიმედოობას ჩვეულებრივ RF მიდგომებთან შედარებით, სიხშირული სპექტრზე დაწესებული შეზღუდვების გარეშე. ამ თავში წარმოდგენილია ახალი კოსმოსურ–საჰაერო–სახმელეთო FSO–ის გადაცემის სტრატეგია თანამგზავრული კომუნიკაციის სისტემებისთვის. კერძოდ, მიწისპირა სადგურის ზემოთ HAP სარელეო სადგურის განთავსებით, ჩვენ შეგვიძლია მნიშვნელოვნად შევამსუბუქოთ ატმოსფერული ტურბულენტობის ეფექტები და მივაღწიოთ მაღალი ხარისხის FSO გადაცემას, მიუხედავად თანამგზავრის ზენიტის კუთხის სიდიდისა. ასევე შემოთავაზებულია ახალი ინტეგრირებული FSO გადამცემი ქსელი FSO ლინკის გამოყენებადობის გასაუმჯობესებლად. შერჩეული რიცხვითი მაგალითებით ნაჩვენებია, რომ კოსმოსურ–საჰაერო–სახმელეთო სისტემის და ერთნახტომიანი FSO გადამცემების ინტეგრირებამ თანამგზავრზე შეიძლება მნიშვნელოვნად შეამციროს დაბალი გამტარუნარიანობის RF ლინკზე გადართვის სიხშირე, რაც საშუალებას მოგვცემს მაქსიმალურად ვისარგებლოთ FSO კომუნიკაციების გადაცემის მაღალი სიჩქარით და, ამავდროულად, მივაღწიოთ მაღალ საიმედოობას. აღსანიშნავია, რომ არსებობს სხვა ალტერნატიული მიდგომები, როგორიცაა დროის მიხედვით განცალკევება და/ან აპარტურაზე დაფუძნებული სივრცითი განცალკევება, რომლებიც დღესდღეობით გამოიყენება NASA–ს სისტემებში, და ისინი შეიძლება ინტეგრირებული იყოს პოპულარულ SAG–FSO ქსელთან FSO არხების ტურბულენტური ეფექტების შესამცირებლად.

თავი 9 თანამგზავრული ქსელების ფენებად დაყოფა: არქიტექტურა, მახასიათებლების ანალიზი და გამოწვევები

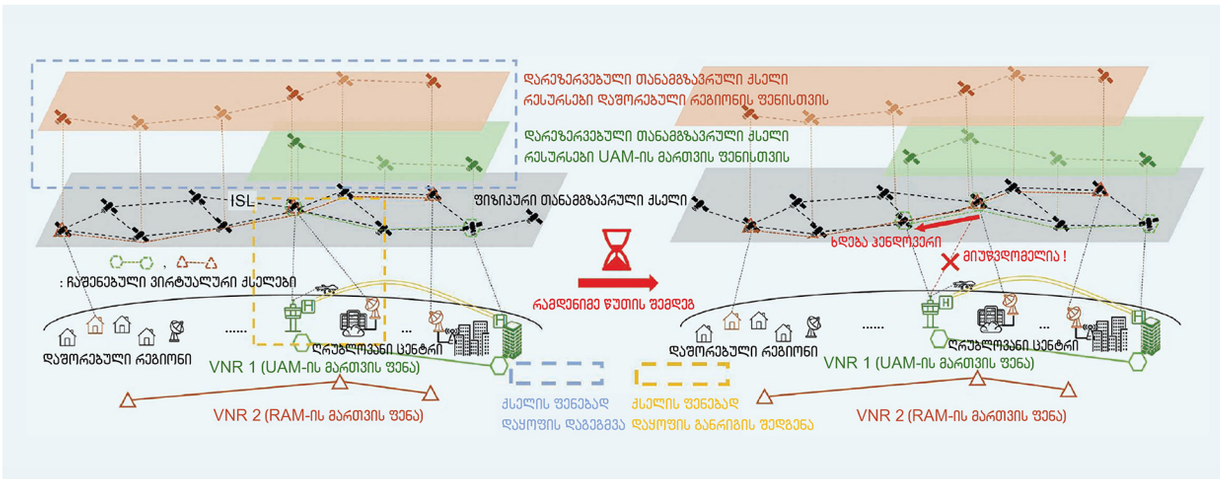
9.1. შესავალი

თანამგზავრული მეგათანავარსკვლავედები, შექმნიან დიდ ქსელს კოსმოსში, სადაც ISL–ები გამოყენებული იქნება გლობალური ფართოზოლოვანი კომუნიკაციებისთვის. ISL–ებით გამჭოლი (ერთი ბოლოდან მეორე ბოლომდე) გავრცელების შეყოვნებები და მიწისპირა კარიბჭეების რაოდენობა შემცირებულია. გარდა ამისა, თუ თანამგზავრებს აქვთ საკუთარი გამოთვლითი შესაძლებლობები, თანამგზავრული მეგათანავარსკვლავედის ქსელი ISL–ებით, შეიძლება ფუნქციონირდეს როგორც კოსმოსში „მცურავი“ უსადენო ძირითადი ქსელი. ამ ტენდენციის გამო, თანამგზავრული ქსელის ფენებად დაყოფამ (network slicing) მიიპყრო მკვლევრების და დეველოპერების ყურადღება და ეს არის ერთ–ერთი მთავარი მეთოდი ტერესტრიალურ 5G ქსელებში. ქსელის ფენებად დაყოფა უზრუნველყოფს თითოეულ მომხმარებელს გამოყოფილი სერვისით, დამოუკიდებელი ვირტუალური ქსელის (VN) შექმნით ფიზიკურად გაზიარებული საერთო ქსელის ინფრასტრუქტურისგან. დამოუკიდებელ VN–ს ეწოდება ქსელის ფენა და სრულად შეესაბამება კონკრეტულ სერვისს.

თანამგზავრული ქსელის ფენებად დაყოფა საშუალებას აძლევს სუბსტრატულ თანამგზავრულ ქსელს მხარი დაუჭიროს მსგავს მრავალფეროვან სერვისებს, როგორსაც ტერესტრიალური ქსელის ფენებად დაყოფისას (განვმარტავთ, რომ ზოგადად, სუბსტრატული ქსელი წარმოდგენილია გრაფით, რომელშიც ფიზიკური მარშრუტიზატორები მოდელირებულია, როგორც გრაფის წვეროები, ხოლო ფიზიკური ლინკები, როგორც წიბოები). ვინაიდან მოსალოდნელია, რომ თანამგზავრული ქსელი მოემსახურება სხვადასხვა ახალ განვითარებად აპლიკაციებს გლობალური მასშტაბით და შეიძლება იყოს ინტეგრირებული ტერესტრიალურ ქსელთან, თანამგზავრული ქსელის ფენებად დაყოფა აუცილებელი ტექნოლოგიაა 6G ქსელების გაფართოებული ვერტიკალური კონვერგენციისთვის ულტრა 3D დაფარვით.

თანამგზავრულ ქსელებში ქსელის ფენებად დაყოფის განხორციელების გამოწვევები უნიკალურია, რადგან ქსელი აგებულია გრძელ უსადენო ლინკებზე და თითოეული კვანძი მოძრაობს ძალიან მაღალი სიჩქარით. მიწისპირა ქსელის ფენის მოთხოვნის მოცემული ლოკაციებისთვის, წვდომის თანამგზავრებმა უნდა განახორციელონ ხშირი ჰენდოვერი, რათა მოემსახურონ ამ ფენას მომსახურების საჭირო დროის განმავლობაში. გარდა ამისა, ISL კავშირი და ლინკის მანძილები შეიძლება იცვლებოდეს დროთა განმავლობაში.

ქსელის ფენებად დაყოფის განხორციელება შეიძლება დანაწილდეს განრიგის შედგენად (scheduling) და დაგეგმვად (planning). როგორც ნახ. 9.1–ზეა ილუსტრირებული, განრიგის შედგენისას განისაზღვრება



ნახ. 9.1. თანამგზავრული ქსელის ფენებად დაყოფის ილუსტრაცია

VN-ების განრიგი საზიარო სუბსტრატის თანამგზავრულ კვანძებში (SN) და დაგეგმვისას ქსელის რესურსები რეზერვირებულია VN-ისთვის მისი მომსახურების დროს, რათა ფენის პროვაიდერმა უზრუნველყოს, რომ VN-ს შეეძლოს საიმედო მხარდაჭერა სასურველი სერვისისთვის. თანამგზავრული ქსელების ფენებად დაყოფის დაგეგმვის ნაწილი ბევრად უფრო კრიტიკულია, ვიდრე ტერესტრიალურ ქსელებში, რადგან ფენების მართვა ჰენდოვერით აუცილებელია სწრაფად მოძრავი თანამგზავრებისთვის. ქსელის წარმატებული განლაგებისთვის გათვალისწინებული უნდა იყოს ჩაშენებული VN-ების მართვა თანამგზავრული ჰენდოვერით მომსახურების დროს.

ამრიგად, თანამგზავრული ქსელის ფენების დაგეგმვა (SNSP) წარმოადგენს სერიოზულ გამოწვევას და არის ყველაზე ფუნდამენტური ნაბიჯი თანამგზავრული ქსელის ფენების დანერგვისას. SNSP-ის შედეგად მიღებული ინტუიციური გამოცდილება შეიძლება გადამწყვეტი იყოს განლაგებული თანამგზავრების მართვისთვის, ასევე WAN დიზაინის შემუშავების პროცესში გაშვებამდე.

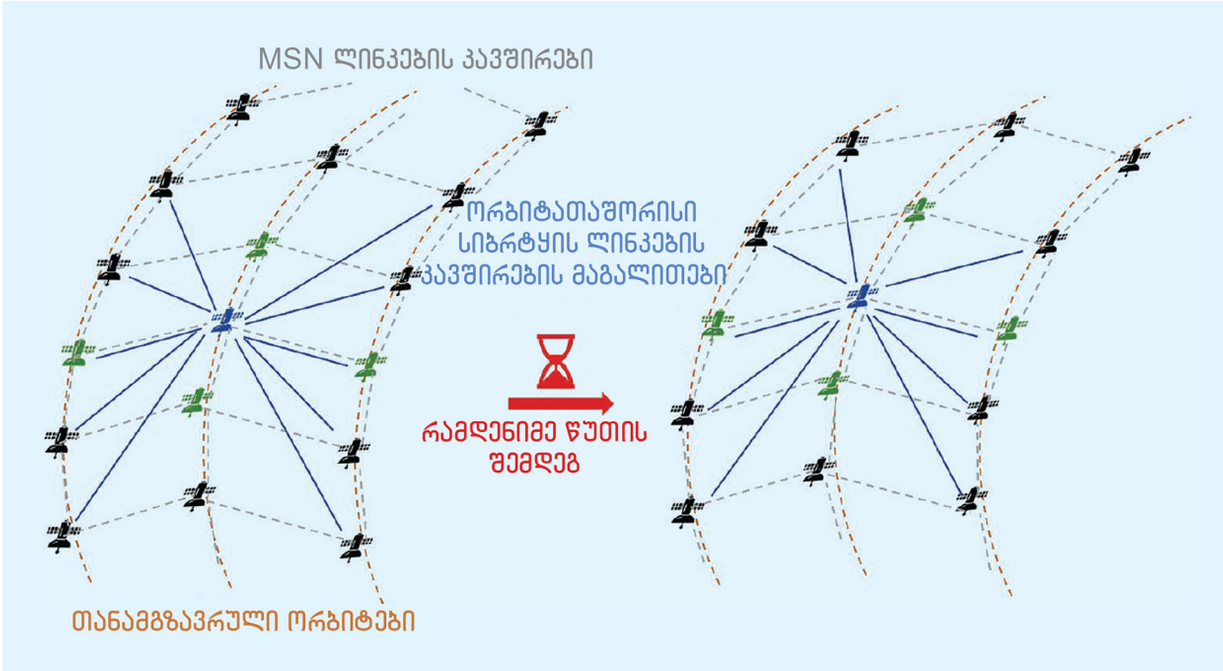
როგორც ნახ. 9.1-ზეა გამოსახული, განხილული SNSP მოიცავს მოსული VN მოთხოვნების (VNR) ჩაშენებას და ჰენდოვერთან ერთად ჩაშენებული VN-ების მართვას მომსახურების საჭირო დროის განმავლობაში, თანა-მგზავრების მობილურობის უზრუნველსაყოფად. SNSP მოდელირებულია, როგორც VN-ჩაშენების (VNE) პრობლემა VNR-ებისთვის. თითოეული ფენის ჩაშენებული ვირტუალური კვანძები ილუსტრირებულია უფრო მუქ ფერებში. ჰენდოვერებს ადგილი აქვს მაშინ, როდესაც ჩაშენებული SN აღარ არის ხელმისაწვდომი. იმის გამო, რომ VNE პრობლემა ცნობილია როგორც NP-რთული, ის იყოფა კვანძის ჩაშენებად და ლინკის ჩაშენებად. SNSP-ზე ცოტა კვლევაა ჩატარებული; მაგალითად, შემოთავაზებული იყო თანამგზავრული VNE ალგორითმი, რომელიც ვარაუდობს ISL-ების ხშირ გადართვას მარტივი სიმულაციის გამოყენებით. ამ თავში წარმოდგენილია VNE-ის ძირითადი მეთოდები და შემდეგ კი შემოთავაზებულია ჰენდოვერის სტრატეგიები. VNE პროცესის გამოთვლითი დატვირთვის შესამცირებლად და გაყოფადი გზის ლინკის ჩაშენების ეფექტიანობის გამო-საკვლევად, ასევე შემოთავაზებულია დამატებითი ნაბიჯი ლინკის ჩაშენებამდე, სახელწოდებით პრელინკის (წინასწარი ლინკის) ჩაშენება. SNSP-ის მახასიათებლები შეფასებულია სიმულაციების გამოყენებით მიღების კოეფიციენტისთვის, ჰენდოვერის რაოდენობისთვის, გამჭოლი შეყოვნებისთვის, მონაცემთა გამტარუნარიანობისთვის და ღირებულებისთვის. გარდა ამისა, განიხილება სისტემის „ვიწრო ადგილი“ (bottleneck — „ბოთლის ყელი“) და SNSP სისტემის მუშაობის ძირითადი პარამეტრები. ამ თავის მიზანია შემოგვთავაზოს სხვადასხვა პოტენციური SNSP მეთოდები ჰენდოვერის მენეჯმენტით და განიხილოს SNSP-ის ძირითადი გამოწვევები რეალური სიმულაციებისა და მახასიათებლების შეფასებების საფუძველზე.

9.2. 6G თანამგზავრული ქსელი

ქსელის სახით წარმოდგენილი თანამგზავრები უზრუნველყოფენ გლობალურ ინტერნეტსერვისებს და მრავალფეროვან სამომავლო აპლიკაციებს. სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ, თანამგზავრული მეგათა-ნავარსკვლავედები ერთმანეთთან დაკავშირებულია უსადენო ISL-ებით, რათა შექმნან დიდი ქსელი ცაში. 6G თანამგზავრული ქსელი ISL-ებით შეიძლება იყოს როგორც ქსელი, რომელიც მუშაობს ტერესტრიალური ქსელისგან დამოუკიდებლად, ასევე წარმოადგენდეს 3D ქსელის ნაწილს, რომელიც ინტეგრირებულია მის ტერესტრიალურ შემავსებელ ნაწილთან.

შესამჩნევი განსხვავება თანამგზავრულ და ტერესტრიალურ ქსელებს შორის არის ის, რომ თანამგზავრულ ქსელს აქვს უსადენო კავშირები მის მოძრავ კვანძებს შორის. სინამდვილეში, ეს შეიძლება იყოს თანამგზავრული ქსელების უნიკალური უპირატესობა. დროთა განმავლობაში ლინკების დინამიური კავშირი შეიძლება გამოყენებულ იქნეს თანამგზავრის მობილურობაზე და სხვადასხვა ტიპის სერვისებზე დაყრდნობით. მაგალითად, თუ მომხმარებელი მოითხოვს დაბალი შეყოვნების სერვისს, ISL-ები ხშირად უნდა განახლდეს ხილული მატრიცის საფუძველზე, რათა იპოვონ უმოკლესი კავშირის გზა. მეორე მხრივ, თუ სერვისი მოითხოვს საიმედო გამჭოლ კავშირს ხანგრძლივი პერიოდის განმავლობაში, უმჯობესია არ შეცვალოთ ISL კავშირი, მაგალითად, ორმიმართულებიანი მანჰეტენის ქუჩების ქსელის (MSN) განლაგებით, რომლის ლინკებით დაკავშირების სქემა შენარჩუნებულია მუდმივად.

ახლა განვიხილოთ ISL კავშირები თანამგზავრული ქსელის დასანაწევრებლად. SpaceX ამჟამად გეგმავს LEO თანამგზავრების ოთხი ISL-ის არსებობას თითო თანამგზავრზე. ნახ. 9.2 კონცეპტუალურად აჩვენებს



ნახ. 9.2. ISL–ების აღწერა

ლინკებით შესაძლო კავშირებს, სადაც ნაცრისფერი ლინკები წარმოადგენს MSN–ებს, რომელიც აკავშირებს ოთხ მიმდებარე ლინკს. მაგალითად, ლურჯი თანამგზავრი ნახ. 9.2–ზე დაკავშირებულია მწვანე თანამგზავრებთან MSN პროტოკოლის გამოყენებით. MSN ლინკები რჩება დაკავშირებული იმავე თანამგზავრებთან, მიუხედავად მათი მობილურობისა. თუმცა, ვინაიდან თანამგზავრების შედარებითი პოზიციები იცვლება და სხვა ხილული თანამგზავრების დაკავშირება შესაძლებელია უსადენო ISL–ების გამოყენებით, ასევე შესაძლებელია ლინკების დროში ცვალებადი კავშირის პროტოკოლის განთავსება. მაგალითად, ლურჯი ხაზები ნახ. 9.2–ზე წარმოადგენს ლურჯი თანამგზავრების შესაძლო ორბიტათაშორისი სიბრტყის ლინკების კავშირებს დროის ფიქსირებულ მომენტში და რამდენიმე წუთის შემდეგ. ვინაიდან SNSP–ის მიზანია თანამგზავრული ქსელის ქსელური რესურსების დაჯავშნა VNR–ებისთვის, MSN დაკავშირებაც შესაძლებელია ფენებად დაყოფილი სერვისებისთვის.

თუ ლინკით დაკავშირების დროში ცვალებადი პროტოკოლი გამოიყენება ფენებად დაყოფილი სერვისისთვის, ISL ჰენდოვერი ხშირად უნდა განხორციელდეს, გარდა თანამგზავრიდან მიწაზე ლინკის ჰენდოვერებისა. ეს დინამიურად ზრდის VN–ების შესანარჩუნებლად საჭირო სამუშაო დატვირთვას და არარეალურია ფენებად დაყოფილი სცენარისთვის. მაშასადამე, 6G თანამგზავრული ქსელისთვის გონივრული გამოსავალი იქნება MSN ლინკის პროტოკოლით განხორციელებული ქსელის ფენებად დაყოფის გაერთიანება დამატებით ლინკით დროებით დაკავშირებებთან, რომლებიც დაფუძნებულია დროში ცვალებად ხილულ მატრიცაზე დაფუძნებულ პროტოკოლზე შემთხვევითი წვდომისა და შეყოვნებისადმი მგრძნობიარე სერვისებისთვის.

9.3. შესაძლო თანამგზავრული VNE მეთოდები

MSN ლინკით კავშირის დაშვებით, SNSP სტრატეგია შემოთავაზებულია, როგორც VNR–ებისთვის VNE პრობლემა თანამგზავრული ქსელის რესურსების შესანახად. VNR–ები შედგება ვირტუალური კვანძებისა და ვირტუალური ლინკებისგან და VNE–ის დანიშნულებაა VNR–ების ეფექტურად ჩაშენება სუბსტრატის ქსელში. თანამგზავრული ქსელი და VNR–ები წარმოდგენილია ნაკადური გრაფების გამოყენებით. გარდა ამისა, თანამგზავრების გადაადგილებისას, ჰენდოვერის პროცედურა უნდა იყოს ჩართული ჩაშენებული VNR–ების სწორად მართვისთვის. როგორც ტერესტრიალურ ქსელში, ისე თანამგზავრულ ქსელში, VNE იყოფა ვირტუალური კვანძის და ლინკის ჩაშენებად. გარდა ამისა, შემოთავაზებულია პრელინკის ჩაშენების ნაბიჯი თანამგზავრული ქსელისთვის ძირითადი ლინკის ჩაშენებამდე. ნახ. 9.3 გვიჩვენებს VNE პროცესს შემოთავაზებული ჩაშენების მეთოდების გამოყენებით.

ვირტუალური კვანძის ჩაშენება:

ვირტუალური კვანძის ჩაშენებისას ძირითადი შეზღუდვებია მანძილი და კვანძის გამტარუნარიანობა. ჩაშენებული SN უნდა შეირჩეს თანამგზავრებიდან, რომელთა სახმელეთო სერვისის დაფარვა შეიცავს VNR–ის ადგილმდებარეობას. SN–მა ასევე უნდა უზრუნველყოს მონაცემთა გადაცემის საკმარისი სიჩქარე, რომელიც მინიმუმ უფრო მეტია ვიდრე ვირტუალური კვანძის მოთხოვნილი გამტარუნარიანობა. როგორც ეს ნახ. 9.3–ის წითელი ჩარჩოთი შემოსაზღვრულ სურათზეა ნაჩვენები, არსებობს SN–ზე დაფუძნებული კვანძის ჩაშენების ორი შესაძლო მეთოდი, რომელიც აკმაყოფილებს შეზღუდვებს. სურათზე მწვანე მარკერი წარმოადგენს VNR ვირტუალური კვანძის ადგილმდებარეობას, ხოლო ყვითელი და ლურჯი თანამგზავრები არის SN–ები, რომლებიც ჩაშენებულია შემოთავაზებული მეთოდების გამოყენებით.

პირველი მეთოდი (ვუწოდებთ უახლოესს), ყველაზე ინტუიციური, არის უახლოესი SN–ის არჩევა, რომელიც ამცირებს გავრცელების სავარაუდო შეყოვნებას და კვანძის ჩაშენების მაგალითში წარმოდგენილია ყვითელი თანამგზავრით. შეყოვნების მიხედვით განსხვავება, რომელიც შეიძლება მნიშვნელოვანი იყოს, დამოკიდებულია SN–ების შერჩევაზე. მაგალითად, 10°–ის ტოლი სიმაღლის კუთხით, თანამგზავრებს ზღვის დონიდან 1000 კმ სიმაღლეზე უნდა შეეძლოთ კომუნიკაცია სახმელეთო მომხმარებლებთან დაახლოებით 2700 კმ–მდე მანძილზე. სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ, კვანძის არჩევიდან გამომდინარე, აპლინკ/დაუნლინკის გავრცელების შეყოვნებები შეიძლება განსხვავდებოდეს 5.6 მწმ–მდე, რაც არ იქნება უმნიშვნელო 6G ქსელებში.

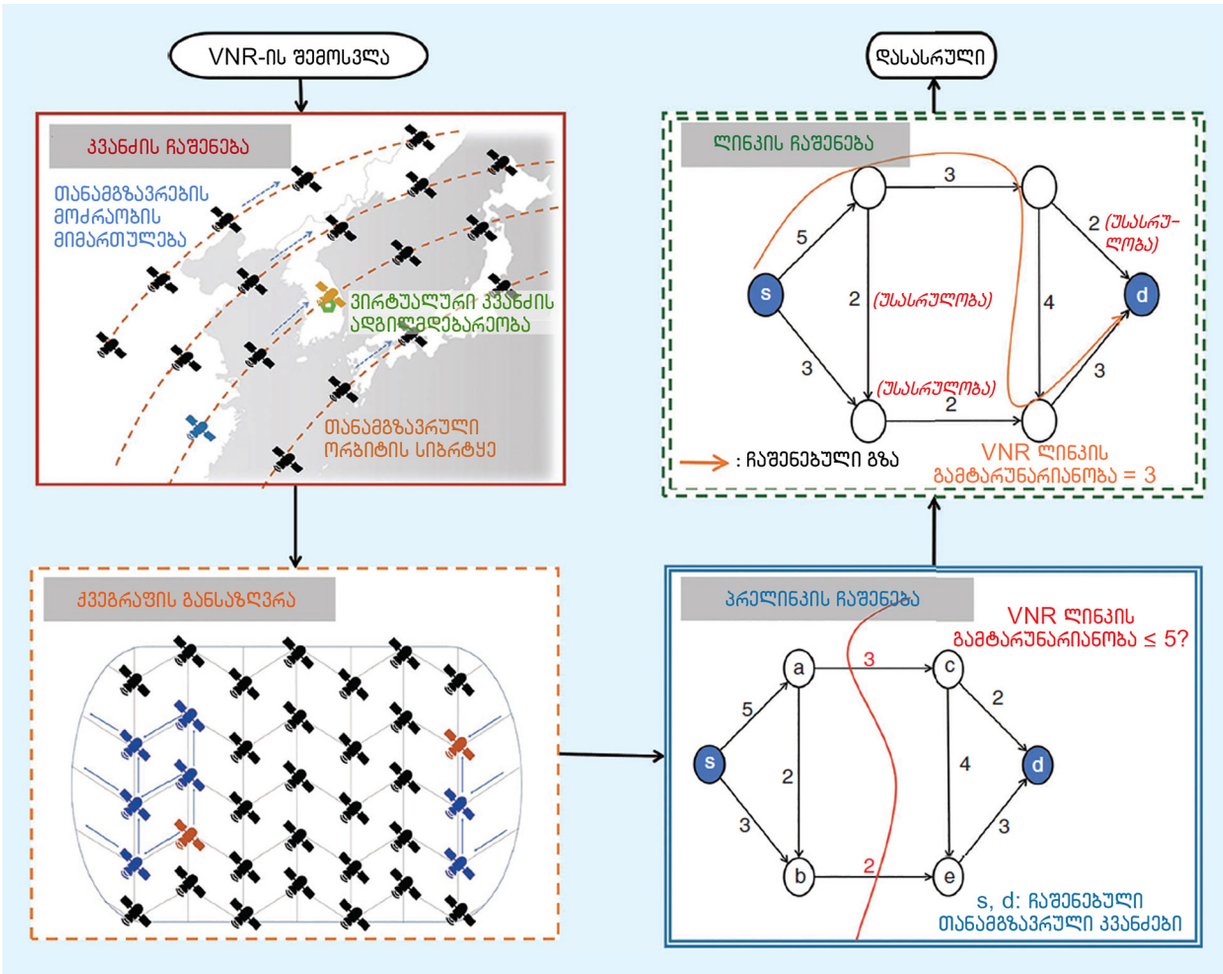
მეორე მეთოდი (ვუწოდებთ უგრძესს) არის ყველაზე დაშორებული მომსახურებისთვის ხელმისაწვდომი SN–ის არჩევა; კერძოდ, ეს არის ლურჯი თანამგზავრი კვანძის ჩაშენების მაგალითში, რაც ამცირებს ჰენდოვერების რაოდენობას და, საბოლოო ჯამში, VN–ის ხელახალი ჩაშენების რაოდენობას. ამრიგად, ამ მეთოდს შეუძლია გაუმჯობესოს ფენის სერვისის სტაბილურობა მცირე რაოდენობის გამოთვლებით.

შეიძლება არსებობდეს კვანძების ჩაშენების მრავალი სხვა მეთოდიც, მაგალითად, როგორიცაა SN–ის არჩევა შემთხვევითი წესით ხელმისაწვდომი თანამგზავრების ფარგლებში და SN–ის არჩევა კვანძის მაქსიმალური ნარჩენი გამტარუნარიანობით. თუმცა, მხოლოდ ორი ზემოთ შემოთავაზებული მეთოდი იქნება გაანალიზებული, რადგან თითოეულს შეუძლია მიაღწიოს დაბალ შეყოვნებას და მომსახურების სტაბილურობას, რაც ორი ფუნდამენტური მოთხოვნაა 6G თანამგზავრული ქსელისთვის.

ვირტუალური ლინკის ჩაშენება:

VNR–ების ვირტუალური კვანძების ჩაშენების შემდეგ, შემოტანილი უნდა იქნეს თანამგზავრული ქსელის ქვეგრაფები. იმის გამო, რომ თანამგზავრული მეგათანავარსკვლავედები გლობალურად განლაგებულია ცირკულაციის სტრუქტურაში, უნდა განისაზღვროს ქვეგრაფი, რათა შემცირდეს საძიებო სივრცე დარჩენილი VNE პროცესისთვის. ქვეგრაფს აქვს ჩაშენებული თანამგზავრების წყვილი, რომელთა ვირტუალური კვანძები დაკავშირებულია ვირტუალურ ლინკთან ნახტომების მინიმალური რაოდენობის მიმართულებებით. მაგალითად, ნახ. 9.3–ზე, ნარინჯისფერი წყვეტილი ჩარჩოთი შემოსაზღვრულ სურათზე, ნარინჯისფერი თანამგზავრები წარმოადგენენ ჩაშენებული თანამგზავრების წყვილს, რომლებიც გამოიყენება ქვეგრაფის განსაზღვრისთვის, ხოლო ლურჯი თანამგზავრები და ლურჯი ბმულები ქმნიან განსაზღვრულ ქვეგრაფს ჩაშენებული თანამგზავრული წყვილისთვის.

პრელინკის ჩაშენება ამცირებს თანამგზავრული ქსელის გამოთვლით დატვირთვას, რადგან, როდესაც აღნიშნული განხორციელდება, VNR–ებისთვის გზების ძიებაზე დაფუძნებული ლინკის ჩაშენების ალგორითმი არ იქნება გამოყენებული იქ, სადაც ჩაშენება შეუძლებელია. პრელინკის ჩაშენების საფეხური აღმოაჩენს ვიწრო ადგილს ამ ქვეგრაფში ლიტერატურიდან ცნობილი მაქსიმალური ნაკადის მინიმალური დაყოფის თეორემის გამოყენებით. ქსელის ვიწრო ადგილის და ლინკის საჭირო გამტარუნარიანობის შედარებით, პრელინკის ჩაშენების ნაბიჯზე მიიღება გადაწყვეტილება არ მოხდეს გადასვლა შემდეგ VNE საფეხურზე; ამის ნაცვლად, იგი აცხადებს VNR–ის ჩაშენებისთვის უარს, თუ VNR ლინკის გამტარუნარიანობა აღემატება ქსელის ვიწრო ადგილის გამტარუნარიანობას. ნახ. 9.3–ზე, ლურჯი ორმაგი ჩარჩოთი შემოსაზღვრულ სურათზე ნაჩვენებია პრელინკის ჩაშენების საფეხურის მარტივი მაგალითი. ქსელის ვიწრო ადგილი მითითებულია წითელი კლაკნილი ხაზით ნაკადის ღირებულებით ხუთი; თუ VNR ლინკის გამტარუნარიანობა ამ მნიშვნელობაზე ნაკლებია, პროცესი შეიძლება გადავიდეს ჩაშენების შემდეგ ეტაპზე. ეს ნაბიჯი შეიძლება განხორციელდეს მარტივი, შერწყმაზე დაფუძნებული ალგორითმის გამოყენებით, რომელსაც აქვს გაცილებით დაბალი გამოთვლითი დატვირთვა, ვიდრე ლინკის ჩაშენებისთვის არსებულ გზის მონახვაზე დაფუძნებულ ალგორითმებს.



ნახ. 9.3. VNE პროცესი და ჩაშენების მეთოდების მარტივი მაგალითები

ლინკის ჩაშენების შეზღუდვისას, ლინკების ყველა ნარჩენი გამტარუნარიანობა ჩაშენებულ მარშრუტიზაციის გზაზე უნდა იყოს VNR ლინკის გამტარუნარიანობაზე მეტი. ისევე როგორც კვანძის ჩაშენების მეთოდებით სარგებლობისას, შეყოვნებისა და სტაბილურობისთვის შემოტანილია არხის ჩაშენების ორი მეთოდი, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 9.3-ზე მწვანე ორმაგი წყვეტილი ჩარჩოთი შემოსაზღვრულ სურათზე.

გავრცელების შეყოვნების შესამცირებლად, პირველი მეთოდი პოულობს უმოკლეს გზას ქვეგრაფში იმ შეზღუდვის დაკმაყოფილებით, რომ ლინკების ყველა ნარჩენი გამტარუნარიანობა საკმარისი იყოს ჩაშენებული გზისთვის. ეს მეთოდი შეიძლება განხორციელდეს უმოკლესი გზის პოვნის ალგორითმებით ლინკების წონების დაყენებით უსასრულო მნიშვნელობებზე, თუ ისინი ნაკლებია VNR ლინკის გამტარუნარიანობაზე, და ფიზიკურ მანძილებზე, წინააღმდეგ შემთხვევაში. ნახ. 9.3-ზე, თუ ვივარაუდებთ, რომ გვაქვს პრელინკის ჩაშენების მაგალითის იგივე ქვეგრაფი და VNR ლინკის გამტარუნარიანობა ტოლია 3-ის, ლინკის მანძილის გრაფი შეიძლება მოცემული იყოს უსასრულო მნიშვნელობებით — წითელი ფერით.

სტაბილურობის უზრუნველყოფის მეორე მეთოდით ხდება ვირტუალური ლინკის მოთხოვნის ჩაშენება მაქსიმალური ნაკადის გზაზე. იმის გამო, რომ ჩაშენებული გზა შეიძლება მოთავსებული იყოს ქვეგრაფში, ლინკში გავრცელების შეყოვნების პრობლემა გარკვეულწილად მოგვარებულია. ამ მეთოდის მიზანია მაქსიმალური ნაკადის გზის განსაზღვრა. მაქსიმალური ნაკადის მეთოდი გამოიყენება ნახ. 9.3-ზე მოცემული პრელინკის ჩაშენების იმავე მაგალითზე. ჩვეულებრივი მაქსიმალური ნაკადის პრობლემისგან განსხვავებით, აქ მიზანი არის მაქსიმალური ნაკადის მქონე გზის პოვნა და არა ქსელში ნაკადის მაქსიმალური მნიშვნელობის პოვნა. ეს მეთოდი შეიძლება განხორციელდეს უმოკლესი გზის ალგორითმების გამოყენებით განსხვავებული ალგორითმული მიზნებით, ნაცვლად ტიპური მაქსიმალური ნაკადის ალგორითმების გამოყენებისა. მაგალითად,

როგორც ნაჩვენებია ნახ. 9.3-ზე, დიიქსტრას (Dijkstra) ალგორითმს შეუძლია ააგოს მაქსიმალური ნაკადის გზა მიმდებარე გარემოში მაქსიმალური ნაკადის ლინკის პოვნის და გზის წონის განახლებით მიღებულ გზაზე ლინკის მინიმალურ გამტარუნარიანობამდე.

განხილული ორი მეთოდი ასევე შეიძლება განხორციელდეს გაყოფადი გზის ჩაშენების სცენარისთვის ლინკის ჩაშენების მეთოდების იტერაციით ვირტუალური ლინკის მოთხოვნის შესრულებამდე. თუმცა, ეს თავი ყურადღებას ამახვილებს ერთი გზის შემცველ სცენარზე, რათა შევადაროთ თანამგზავრული ქსელის გარემოში გაყოფადი გზის ჩაშენების სარგებლიანობა რეალისტური კომპიუტერული სიმულაციის გამოყენებით.

9.4. ჰენდოვერის სტრატეგიები

თანამგზავრულ-სახმელეთო ჰენდოვერის სტრატეგიებისთვის, LEO თანამგზავრები ISL-ებით და სამართავი ანტენებით განიხილება ისეთი შემთხვევისთვის, როდესაც ფიქსირებული სხივები მიიღება დედამიწაზე, რაც არის 3GPP NTN საცნობარო სცენარი. მას შემდეგ, რაც VNR ჩაშენებულია თანამგზავრულ ქსელში, VN შეიძლება მომსახურებული იყოს მაქსიმუმ რამდენიმე წუთის განმავლობაში, ჩაშენებული LEO SN-ების მობილურობის გამო. ეს შეიძლება იყოს პრობლემური, თუ VNR-ის ჩვეულებრივი მომსახურების დრო საათებს იკავებს, მაგალითად, რეგიონალური საჰაერო მობილურობის (RAM) მართვისთვის, ფრენის უფრო ხანგრძლივი დიაპაზონით, განსხვავებით ურბანული საჰაერო მობილურობის (UAM) მართვისგან; ასევე პრობლემები ექმნება გლობალური სტრიმინგის სერვისებს და ინტერნეტსერვისებს შორეულ ადგილებში. ამრიგად, SNSP უნდა მოიცავდეს ჰენდოვერის პროცედურის შესრულებას. იმის გამო, რომ MSN ლინკის პროტოკოლი გამოიყენება ფენებად დაყოფილი სერვისებისთვის, ჰენდოვერი საჭიროა მხოლოდ დედამიწასა და თანამგზავრებს შორის.

ჰენდოვერის სტრატეგია განსაზღვრავს, არა მხოლოდ იმას, თუ როდის მოხდეს გადასვლა ლინკებს შორის, არამედ იმასაც, თუ როგორ მოხდეს გადასვლა VN-ებს შორის. ამ უკანასკნელისთვის არსებობს ორი წარმომადგენლობითი მეთოდი: VN-ში ახალი ლინკების დამატება და ხელახალი ჩაშენება ჰენდოვერის შემცველ SN-ში. პირველ მიდგომას შეუძლია შეამციროს გადაცემის გამოთვლითი დატვირთვა, მაგრამ ჰენდოვერისას გამჭოლი (ბოლოებს შორის კავშირის) მახასიათებელი უარესდება, რადგან ბოლოების დამაკავშირებელი ნახტომების რაოდენობა იზრდება და ჩაშენებული VN-ის თანამგზავრული ლინკების მანძილები შეიძლება შეიცვალოს დროთა განმავლობაში. გარდა ამისა, ჰენდოვერის ამ საფეხურისთვის ახალი სქემაა საჭირო, რათა დაემატოს ახალი ლინკები ადრე და ახლად ჩაშენებულ SN-ებს შორის. მეორე მიდგომა იძლევა საპირისპირო შედეგებს, რადგან გამჭოლი მახასიათებელი შეიძლება გარანტირებული იყოს, მაგრამ გამოთვლითი დატვირთვა იზრდება. განმეორებითი ჩაშენების სტრატეგია შეიძლება იყოს ეფექტიანი ვარიანტი 6G ქსელისთვის, რათა დააკმაყოფილოს სერვისის მოთხოვნები, მიუხედავად იმისა, რომ SNSP-ის გამოთვლითი დატვირთვა იზრდება.

თანამგზავრული ჰენდოვერი უნდა განხორციელდეს მაშინ, როდესაც თანამგზავრი აღარ არის ხელმისაწვდომი ან როდესაც დარღვეულია მომსახურების მოთხოვნები. იმის გამო, რომ VNR ითხოვს მონაცემთა გადაცემის სიჩქარეს ვირტუალური კვანძებისთვის და ლინკებისთვის, შეიძლება არსებობდეს დამატებითი მოთხოვნები გამჭოლი დაყოვნების, QoS-ის, გამოცდილების ხარისხის (QoE) და ა. შ. კუთხით, რომელთა დაკმაყოფილება რთულია თანამგზავრების მობილურობის და არხის პირობები გამო. ამრიგად, თანამგზავრული ჰენდოვერი შეიძლება საჭირო გახდეს მოთხოვნების დასაკმაყოფილებლად, თუმცა ლინკები ჯერ კიდევ ხელმისაწვდომია. არსებობს სხვადასხვა ღია საკითხები ჰენდოვერის სტრატეგიებისთვის, როგორიცაა ლინკის დაკავშირებების განახლების სიხშირე და ჰენდოვერის შესრულების დროის კრიტერიუმები QoS-ის, QoE-ის და შეყოვნების თვალსაზრისით.

9.5. მახასიათებლების ანალიზი

ამ პარაგრაფში SNSP-ის მახასიათებლები გაანალიზებულია შეფასების სხვადასხვა მეტრიკის მიხედვით შემოთავაზებული მეთოდების გამოყენებით. VNR-ის ჩაშენების პროცესისთვის ოთხი განსხვავებული მეთოდი იყო კომპიუტერზე სიმულირებული: „უახლოესი, მაქსიმალური ნაკადის“ მეთოდი (ნახ. 9.4) უახლოესი კვანძისათვის და გამტარუნარიანობისთვის მაქსიმალური ნაკადის არხით; “უახლოესი, დაბალი შეყოვნების” მეთოდი უახლოესი კვანძისა და დაბალი შეყოვნების ბმულისთვის; „უგრძესი, მაქსიმალური ნაკადის“ მეთოდი

ყველაზე გრძელი მომსახურების კვანძისა და მაქსიმალური ნაკადის ლინკის გამტარუნარიანობით; და „უგრძესი, დაბალი შეყოვნების“ მეთოდი ყველაზე გრძელი მომსახურების კვანძისთვის და დაბალი შეყოვნების ლინკისთვის. ჰენდოვერი ჩაითვლება შესრულებულად, როდესაც VN-ის ერთ-ერთი წვდომის ლინკი მიუწვდომელია VN-ის ხელახალი ჩაშენების შემდეგ ჩაშენების იმავე მეთოდის გამოყენებით.

სიმულაციური სპეციფიკაციები ჩამოთვლილია ცხრილში 9.1. გამოყენებულია Walker Delta მოდელი ჯამურად 1000 კმ სიმაღლეზე განლაგებული 1600 თანამგზავრისთვის და Starlink-ის უახლესი ანგარიშიდან აღებულია მონაცემთა გადაცემის სიჩქარე. თანამგზავრების მინიმალური სიმაღლის კუთხე დაყენებულია 10°-ზე, რაც შეესაბამება 3GPP ტექნიკურ ანგარიშში მითითებულ მნიშვნელობას. VNR-ები ფენოვანი სერვისებისთვის გათვალისწინებულია ორ დონეზე. დაბალი დონის VNR მოთხოვნები საჭიროებს მონაცემთა გადაცემის შედარებით მცირე სიჩქარეს, მათ შორის საგნების მასობრივ ინტერნეტს ან დისტანციურ ზონაში დახმარების გადაუდებელ სერვისებს. მეორე მხრივ, მაღალი დონის VNR-ები ითხოვენ მონაცემთა გადაცემის უფრო მაღალ სიჩქარეს, როგორიცაა მონაცემთა/ვიდეო ნაკადი ან რეალურ დროში UAM/RAM მართვა. მიღებულია, რომ დაბალი და მაღალი დონის მოთხოვნების სტატისტიკური რიცხვები იყოს ერთნაირი. ივარაუდება, რომ სიმულირებული VNR-ების მომსახურების საჭირო დრო 1-დან 3 საათამდეა. თანამგზავრის ადგილმდებარეობის მონაცემები აღებულია 12 საათის განმავლობაში და გამოიყენება SNSP-ის სიმულაციისთვის სტაბილურ მდგომარეობაში, ხოლო დროის ერთეული დაყენებულია ერთ წუთზე.

თანამგზავრების ადგილმდებარეობის მონაცემები მიღებული იქნა MATLAB-ზე დაფუძნებული სიმულაციური კოდის გამოყენებით და ყველა სიმულაცია ჩატარდა Python-ის პროგრამირების ენაზე NetworkX ბიბლიოთეკაში ამ თავში შემოთავაზებული მეთოდების გამოყენებით თანამგზავრული ნაკადის გრაფზე. VNR-ები მოდელირებულია ისე, რომ მათი შემოსვლა ხდებოდეს პუასონის პროცესის მიხედვით, სადაც მოთხოვნების რაოდენობაა 10 VNR/წთ და გადაცემის სიჩქარე კი 1.2 გბიტი/წთ. ივარაუდება, რომ VNR-ები მდებარეობენ აშშ-ის კონტინენტურ ნაწილში. კომერციული თანამგზავრული ქსელების პრაქტიკული მოდელის გათვალისწინებით, ივარაუდება, რომ მიწისპირა სადგურები საკმარისადაა განლაგებული მომსახურების ზონაში საჭირო სერვისების მხარდასაჭერად, მაგალითად, აშშ-ის კონტინენტურ ნაწილში. ყველა სიმულაცია მეორდება ხუთჯერ და მიიღება საშუალო მნიშვნელობები. შემოთავაზებული მეთოდების ოპტიმალური ალგორითმები სწრაფად კონვერგირდებოდა (ანუ აღწევდა ზღვრულ მნიშვნელობას) ქსელის განახლების ინტერვალის ფარგლებში დინამიური ჩაშენებისთვის. ზოგადად, სისტემა იქნება მდგრად მდგომარეობაში, გარდა იმ იშვიათი შემთხვევებისა, როდესაც ხორციელდება პირველადი განლაგება ან ხდება ქსელის ფართომასშტაბიანი აღდგენა.

შემოთავაზებული SNSP მეთოდები შეფასებულია შემდეგი პარამეტრების მიხედვით: VNR-ის მიღების კოეფიციენტი; ჰენდოვერების რაოდენობა VN-ზე; გამჭოლი შეყოვნება; მონაცემთა გამტარუნარიანობა; და თანაფარდობა მონაცემთა გამტარუნარიანობასა და SNSP-ის ღირებულებას შორის. მიღების კოეფიციენტი წარმოადგენს წარმატებით მიღებული VNR-ების სტატისტიკურ თანაფარდობას შემოსულ VNR-ებთან

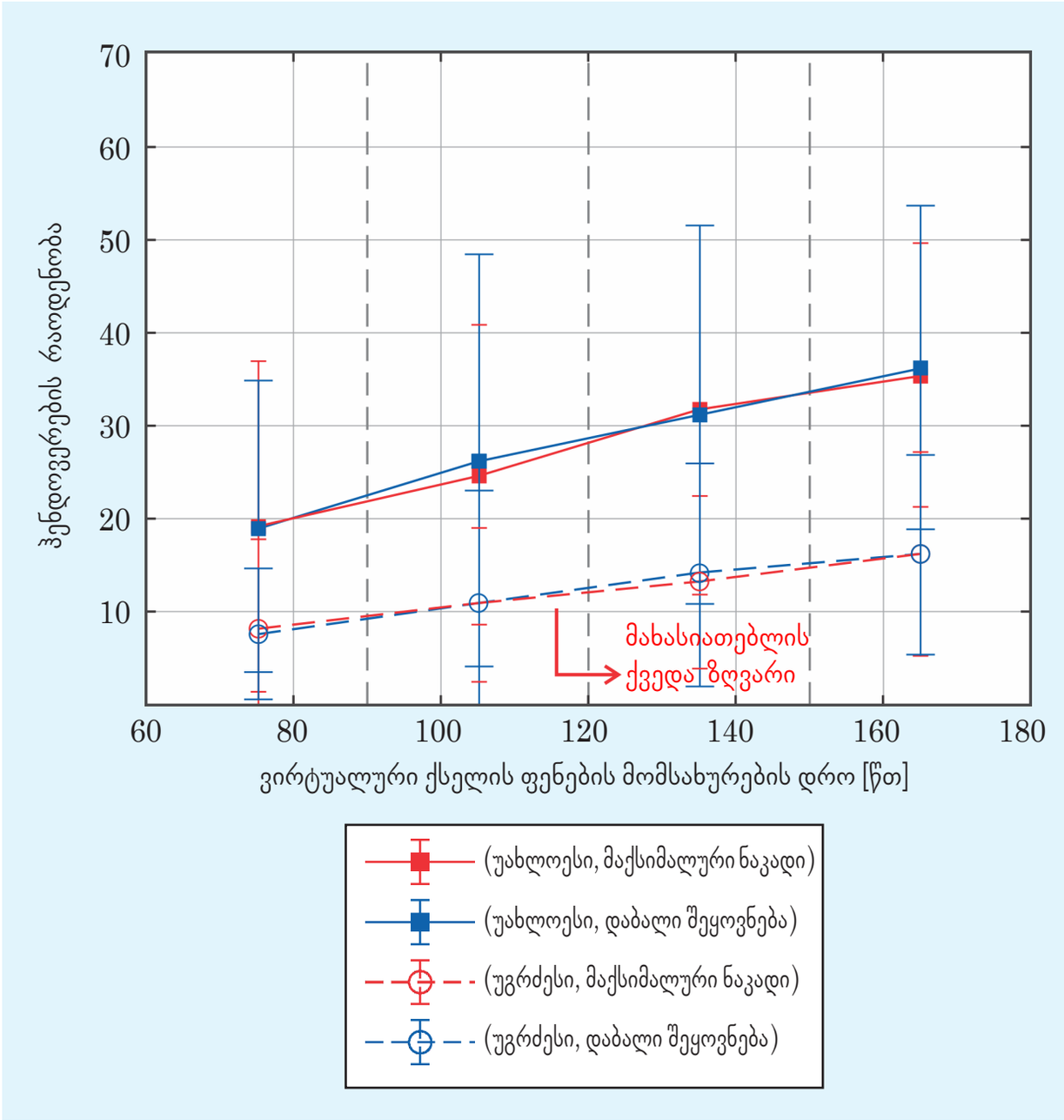
	მოდელი (სიმაღლე)	თანამგზავრების საერთო რაოდენობა	ორბიტული სიბრტყეების რაოდენობა	დახრილობის კუთხე
თანავარსკვლავედის სპეციფიკაციები	Walker Delta (1,000 კმ)	1,600	32	53.8°
თანამგზავრის სპეციფიკაციები	SN-ის გამტარუნარიანობა		ISL-ის გამტარუნარიანობა	
	17–23 გბიტი/წმ		20 გბიტი/წმ	
VNR-ის სპეციფიკაციები	VNR-ის კვანძის გამტარუნარიანობა		VNR-ის ლინკის გამტარუნარიანობა	
	დაბალი დონე	მაღალი დონე	დაბალი დონე	მაღალი დონე
	30–50 მბიტი/წმ	100–300 მბიტი/წმ	30–50 მბიტი/წმ	100–300 მბიტი/წმ
VNR-ის შემოსვლის სიხშირე	**მოთხოვნების რაოდენობა**		**მონაცემთა გადაცემის სიჩქარე**	
	10/წთ		1.2 გბიტი/წთ	

ცხრილი 9.1. კომპიუტერული სიმულაციის სპეციფიკაციები

შედარებით. იმის გამო, რომ გამჭოლი შეფერხება შეიძლება იყოს დროში ცვალებადი, VN–ის საწყისი, მაქსიმალური, მინიმალური და საშუალო შეყოვნება გაანალიზებულია მომსახურებისთვის საჭირო დროის განმავლობაში. მონაცემთა გამტარუნარიანობა მოცემულია როგორც ყველა ჩაშენებული VN–ის შესაბამისი კვანძისა და ლინკის გამტარუნარიანობების ჯამი. SNSP–ის ღირებულება განისაზღვრება, როგორც ქსელის ჯარიმა ფენოვანი სერვისისთვის; ამრიგად, კვანძების რაოდენობისა და ISL–ების მიხედვით ნახტომების წონები ემატება მონაცემთა გამტარუნარიანობას.

კომპიუტერული სიმულაციის შედეგები:

ნახ. 9.4 გვიჩვენებს ჰენდოვერების რაოდენობის კომპიუტერული სიმულაციის შედეგებს VN–ების მომ–სახურების დროის მიხედვით. მიღებული შედეგები წარმოდგენილია მონაცემების გასაშუალოებით თანაბარი ხანგრძლივობის მომსახურების დროის მიხედვით და ცდომილების მნიშვნელობები წარმოადგენს სტანდარტულ გადახრებს. ნაჩვენებია, რომ უახლოეს კვანძზე დაფუძნებული მეთოდები, რომლებიც წარმოდგენილია უწყვეტი



ნახ. 9.4. VN–ებისთვის ჰენდოვერების რაოდენობა

ხაზების სახით, ახორციელებენ ჰენდოვერს დაახლოებით ორჯერ უფრო მეტი ხანგრძლივობით, ვიდრე კვანძზე დაფუძნებული მეთოდები, უგრძესი მომსახურებისთვის. გარდა ამისა, წყვეტილი ხაზები, რომლებიც წარმოადგენს უგრძეს მომსახურების კვანძზე დაფუძნებული მეთოდებით მიღებულ შედეგებს, გვიჩვენებენ თანამგზავრული ქსელის ფენის მომსახურებისთვის საჭირო ჰენდოვერების რაოდენობის ქვედა ზღვარს.

ცხრილში 9.2 წარმოდგენილია კომპიუტერული სიმულაციის შედეგები მიღების კოეფიციენტისა და გამჭოლი შეყოვნებისთვის. ვადაგასული VN-ები მოიცავს მხოლოდ მათ, რომელთა წარმატებით მომსახურებაც განხორციელდა მომსახურებისთვის საჭირო დროის განმავლობაში. მიღების კოეფიციენტი ლინკის ჩაშენების შემდეგ გამოთვლილია ჩაშენებული VN-ების და ვადაგასული VN-ების რიცხვების ჯამის გაყოფით შემოსული VNR-ების საერთო რაოდენობაზე. მომსახურებაზე ხელმისაწვდომი უგრძეს კვანძებზე დაფუძნებული მეთოდები აღემატება სხვებს, რადგან ჰენდოვერების რიცხვი კვანძებზე დაფუძნებული უგრძესი ხელმისაწვდომი მეთოდებით, არის დაახლოებით ნახევარი იმ რაოდენობისა, რომლებიც მიიღება უახლოეს კვანძებზე დაფუძნებული მეთოდებით, როგორც ნაჩვენებია ნახ. 9.4-ზე, და ხელახალი ჩაშენების ცდები მნიშვნელოვნად შემცირებულია. პრელინკის ჩაშენების საფეხური განსაზღვრავს ნაკადის ვიწრო ადგილს და ითვალისწინებს გაყოფადი ნაკადების არსებობასაც, მაშინ როცა ლინკის ჩაშენების საფეხური ითვალისწინებს მხოლოდ ერთი გზის ლინკის ჩაშენებას.

ვინაიდან მიღების კოეფიციენტები პრელინკის ჩაშენებისა და ლინკის შემდგომი ჩაშენების შემდეგ ზუსტად იდენტურია ყველა შემოთავაზებული მეთოდისთვის, ჩვენ ვხედავთ, რომ გამჭოლი გზის გაყოფა გავლენას არ ახდენს ჩვენს სცენარზე. შემდგომი ანალიზისთვის ჩატარდა დამატებითი ევრისტიკული სიმულაციები თანამგზავრის და VNR პარამეტრების შეცვლით, რათა დადგინდეს, როდის აქვს აზრი ნაკადის გაყოფას. მრავალი გზის ჩაშენება ეფექტიანია მაშინ, როდესაც მოთხოვნილი ლინკის საშუალო გამტარუნარიანობა VNR-ისთვის მიაღწევს თანამგზავრული ქსელის რესურსის დაახლოებით მეათედს, რადგან მიღების კოეფიციენტის მნიშველობები პრელინკის და ლინკის ჩაშენების შემდეგ განსხვავებულია. ამრიგად, მომავალში, თუ ახლად მიწოდებული სერვისები მოითხოვს მონაცემთა უკიდურესად მაღალ გადაცემის სიჩქარეს, გაყოფილი გზის ჩაშენების პროცედურის გამოყენებამ შეიძლება გააუმჯობესოს ქსელის მუშაობის მახასიათებლები.

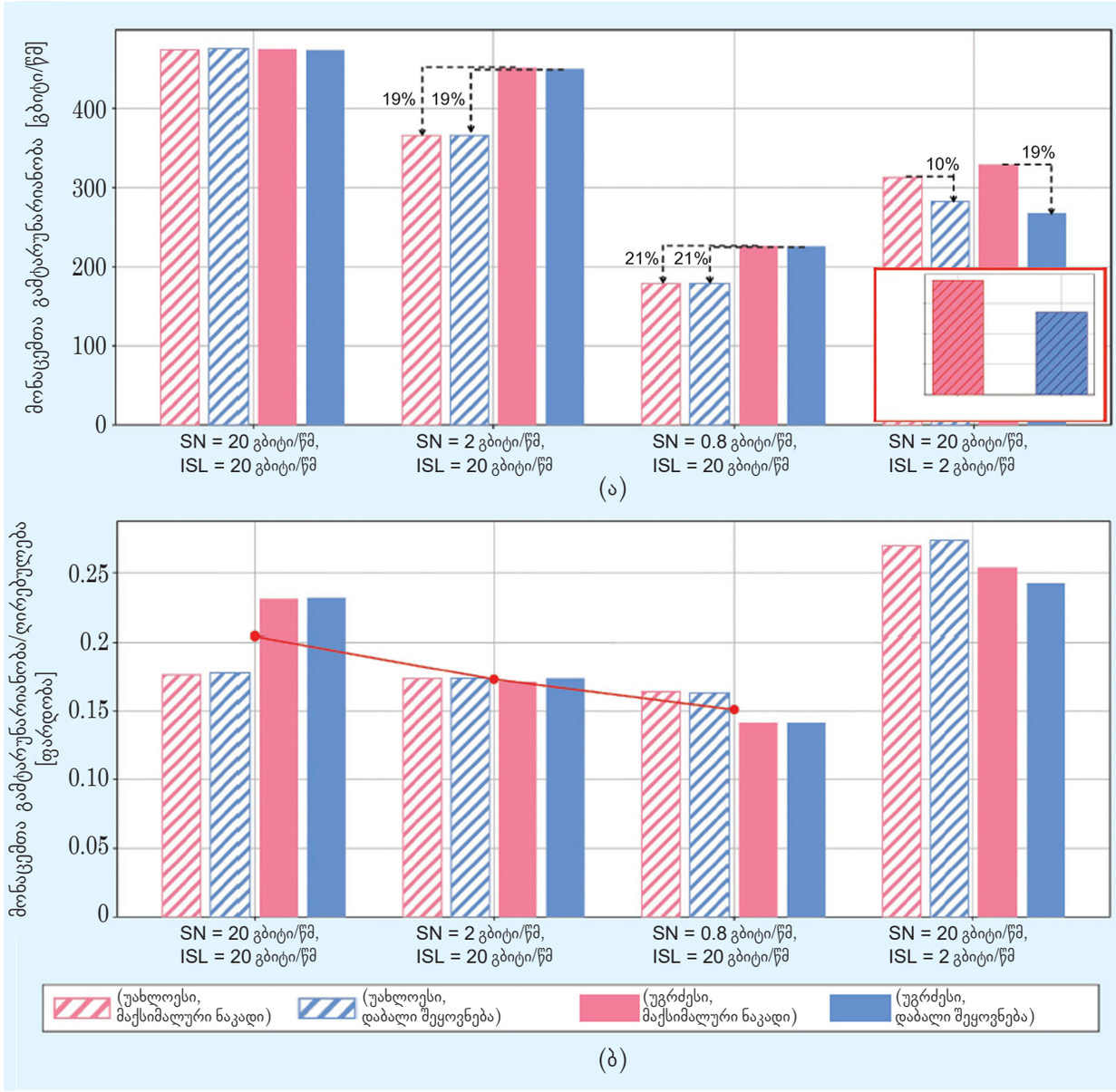
საწყისი გამჭოლი დაყოვნების შედეგები ცხრილში 9.2 აჩვენებს, რომ საუკეთესო მახასიათებლები მიღწეული იყო „უახლოესი, დაბალი შეყოვნების“ მეთოდის გამოყენებით, ხოლო ყველაზე ცუდი მახასიათებელი

		უახლოესი, მაქსიმალური ნაკადი	უახლოესი, დაბალი შეყოვნება	უგრძესი, მაქსიმალური ნაკადი	უგრძესი, დაბალი შეყოვნება
ჩაშენებული VN-ების რაოდენობა		1,193.8	1,195.6	1,190.2	1,214.8
ვადაგასული VN-ების რაოდენობა		5,715.2	5,615.2	5,812.2	5,854.6
მიღების კოეფიციენტი	პრელინკის ჩაშენების შემდეგ	0.9507	0.9508	0.9740	0.9788
	ლინკის ჩაშენების შემდეგ	0.9507	0.9508	0.9740	0.9788
გამჭოლი შეყოვნება (წმ)	საწყისი	0.06192	0.05823	0.06231	0.05960
	მინიმალური	0.02220	0.02144	0.02622	0.02587
	მაქსიმალური	0.1151	0.1044	0.1280	0.1232
	საშუალო	0.06483	0.06002	0.06133	0.05910

ცხრილი 9.2. კომპიუტერული სიმულაციის შედეგები მიღების კოეფიციენტებისთვის და გამჭოლი შეყოვნებებისთვის

მიღწეული იქნა „უგრძესი, მაქსიმალური ნაკადის“ მეთოდის გამოყენებით. მინიმალურ და მაქსიმალურ გამჭოლ შეყოვნებებზე უფრო მეტ გავლენას ახდენს კვანძის არჩევის მეთოდი; უფრო ზუსტად, მათზე გავლენას ახდენს ჰენდოვერების სიხშირე. როდესაც ჰენდოვერები უფრო ხშირად ხდება, ISL ლინკის მარშრუტები უფრო ხშირად განახლდება და, შესაბამისად, ნაკლებია მახასიათებლის დეგრადაცია. აქ შეიძლება გაკეთდეს შემდეგი დასკვნა: ჰენდოვერების ნაკლები რაოდენობა უზრუნველყოფს უფრო საიმედო კავშირებს მიღების უფრო მაღალი კოეფიციენტებით, მაგრამ შედარებით ხანგრძლივი შეყოვნებით უარეს/საუკეთესო შემთხვევებში. საშუალოდ, უმჯობესია გამოიყენოთ „უგრძესი, დაბალი შეყოვნების“ მეთოდი, მაგრამ თუ ფენა მოითხოვს შეყოვნების მკაცრ შეზღუდვას, მაგალითად, უარეს შემთხვევაში 0.11 წმ–ზე ნაკლებს, „უახლოესი, დაბალი შეყოვნების“ მეთოდი უფრო მეტად გონივრული ვარიანტია.

ნახ. 9.5 გვიჩვენებს კომპიუტერული სიმულაციის შედეგებს მონაცემთა გამტარუნარიანობისთვის და მის თანაფარდობას ქსელის ფენის მახასიათებლის შეფასების ღირებულებასთან. მონაცემთა გამტარუნარიანობის შედეგებში, ოთხივე მეთოდმა მიაღწია მსგავს მახასიათებლებს ორიგინალური სიმულაციური პარამეტრების



ნახ. 9.5. (ა) მონაცემთა გამტარუნარიანობის კომპიუტერული სიმულაციის შედეგები და (ბ) მისი თანაფარდობა ღირებულებასთან

დაყენებით, SN = 20 გბიტი/წმ და ISL = 20 გბიტი/წმ. SNSP-ის სისტემური ვიწრო ადგილის დასადგენად, სიმულაციის დამატებითი შედეგები შედარებულია SN-ის და ISL-ის გამტარუნარიანობის შეცვლით, შესაბამისად 2 გბიტი/წმ-მდე. ნახ. 9.5ა-დან ჩანს, რომ მახასიათებლის დეგრადაცია ISL-ის გამტარუნარიანობის ცვლილებით უფრო დიდია, ვიდრე სხვა შემთხვევებში, რაც აჩენს ვარაუდს, რომ ISL-ები შეიძლება იყოს სისტემის ვიწრო ადგილი. როგორც წესი, ISL-ები დაკავშირებულია მხოლოდ ოთხ ლინკთან თითო თანამგზავრზე, მაგრამ დაახლოებით 50 ხელმისაწვდომი თანამგზავრი შეიძლება აღმოჩნდეს ფიქსირებულ ადგილზე LEO მეგათანავარსკვლავედებისთვის. როდესაც ISL გამტარუნარიანობა ხდება გაცილებით ნაკლები ვიდრე SN გამტარუნარიანობა, ნახ. 9.5ა-ზე წითელი ფერით ნაჩვენები მაქსიმალური ნაკადის ლინკზე დაფუძნებული მეთოდები უზრუნველყოფს მონაცემთა უფრო მაღალ გამტარუნარიანობას, ვიდრე დაბალი შეყოვნების გზების მეთოდები.

ვინაიდან ISL-ების გამოყენების კოეფიციენტი (მოცემულია პატარა მართკუთხედში ნახ. 9.5ა-ის ქვედა მარჯვენა კუთხეში) გვიჩვენებს, რომ მაქსიმალურ ნაკადზე დაფუძნებული მეთოდები უფრო მეტ ISL-ებს იყენებს, ვიდრე დაბალი შეყოვნების შემცველი მეთოდები, მაქსიმალური ნაკადის გზების მეთოდებს აქვთ უპირატესობა სისტემის სამართლიანობის თვალსაზრისით, დაბალი შეყოვნების გზების მეთოდებთან შედარებით. როდესაც SN-ის გამტარუნარიანობა ბევრად უფრო მცირეა, ვიდრე ISL-ის, როგორც ნაჩვენებია ჰისტოგრამული დიაგრამების მეორე და მესამე ჯგუფში, მახასიათებლები აჩვენებენ მნიშვნელოვან განსხვავებებს კვანძის ჩაშენების მეთოდების მიხედვით. უგრძესი მომსახურების კვანძის მეთოდებს აქვთ მონაცემთა უფრო მაღალი გამტარუნარიანობა, ვიდრე უახლოესი კვანძის მეთოდებს, როგორც ეს ნაჩვენებია დაშტრიხული ზოლებით, უკეთესი სტაბილურობის გამო ნაკლები რაოდენობის ჰენდოვერებით.

ნახ. 9.5ბ-ზე, მონაცემთა გამტარუნარიანობასა და ღირებულებას შორის თანაფარდობისთვის, მახასიათებლებში განსხვავება შეინიშნება ორიგინალური სიმულაციის პარამეტრების დაყენებაში, შესაბამისი მეთოდის მიხედვით. კვანძზე დაფუძნებული უგრძეს მომსახურებაზე ხელმისაწვდომი მეთოდები აღემატება სხვებს. ეს შედეგი გულისხმობს, რომ თანამგზავრული ქსელის ფენოვანი სისტემის ღირებულება უფრო მაღალია უახლოეს კვანძებზე დაფუძნებული მეთოდებისთვის (რომლებიც მიდრეკილნი არიან ქსელის ფენების ჩასმისკენ ISL-ების დიდ რაოდენობაზე), ვიდრე უგრძეს კვანძზე დაფუძნებული მეთოდებისთვის. ეს იმიტომ ხდება, რომ ადგილი აქვს უფრო მეტ ჰენდოვერს, რაც საბოლოოდ უფრო მეტი VN-ის ჩაშენების ანალოგიურ ეფექტს იძლევა.

ნახ. 9.5ბ-ზე წითელი ხაზი წერტილებით გვიჩვენებს საშუალო თანაფარდობის ცვლილებას თითოეული სიმულაციური პარამეტრისთვის, იმავე სავარაუდო ISL-ის გამტარუნარიანობით. საშუალო მნიშვნელობა მცირდება SN-ის გამტარუნარიანობასთან ერთად, ხოლო თავად SN-ის გამტარუნარიანობა გავლენას ახდენს კოეფიციენტზე, რომელიც წარმოადგენს სისტემის ეფექტიანობას. ამრიგად, შეიძლება ითქვას, რომ კვანძების შერჩევის მეთოდები, ჰენდოვერის სტრატეგიები და თუნდაც SN-ის გამტარუნარიანობის სპეციფიკაციები უფრო მნიშვნელოვანია, ვიდრე ლინკის შერჩევის მეთოდები ფენებად დაყოფილი თანამგზავრული ქსელის სისტემის ეფექტიანობის გასაუმჯობესებლად.

9.6. მეცხრე თავის დასკვნა

ამ თავში გაანალიზებულია SNSP ინტეგრირებული 6G ქსელებისთვის და განხილულია ღია პრობლემები თანამგზავრული ქსელების ფენებად დაყოფის პროცესში. თანამგზავრული ქსელების უნიკალური მახასიათებლების გათვალისწინებით, რაც მოიცავს უსადენო ლინკების დომინირებას და დროთა განმავლობაში SN-ების ფარდობითი ადგილმდებარეობის ცვლილებას, SNSP უკიდურესად მნიშვნელოვანი საკითხია თანამგზავრული ქსელებისთვის. SNSP მოდელირებულია, როგორც VNE და თანამგზავრიდან მიწაზე ჰენდოვერის გადაწყვეტის პრობლემა. VNE პრობლემა დაყოფილია კვანძის, ლინკის და პრელინკის ჩაშენებად და შემდეგ კი შემოთავაზებულია კანდიდატი მეთოდები. წარმოდგენილია ჰენდოვერის შესაძლო სტრატეგიები და მათთან დაკავშირებული ღია საკითხები.

სიმულაციის შედეგებზე დაყრდნობით, შეიძლება დავასკვნათ, რომ შეფასების მეტრიკების უმეტესობაზე გავლენას ახდენს კვანძების შერჩევის მეთოდები და ჰენდოვერის სტრატეგიები; ამგვარად, საჭირო იყო ოპტიმიზებული დიზაინი, მომხმარებლის მოთხოვნების დასაკმაყოფილებლად და სისტემის ეფექტიანობის გასაზრდელად. ISL-ის საკმაოდ მნიშვნელოვანი გამტარუნარიანობა არის საჭირო ქსელის მთლიანი

გამტარუნარიანობის გასაზრდელად, რადგან სისტემის ვიწრო ადგილი განპირობებულია ISL–ით, ხოლო SN–ის საკმარისი გამტარუნარიანობები სასარგებლოა სისტემის ეფექტიანობისთვის, რაც წარმოდგენილია ქსელის გამტარუნარიანობის და ღირებულების (დანახარჯების) თანაფარდობით.

დასასრულ აღვნიშნავთ, რომ თანამგზავრულ ქსელში ფენების სერვისებისთვის მნიშვნელოვანია ISL–ის გამტარუნარიანობის უზრუნველყოფა და ვირტუალური SN–ის ეფექტიანად შერჩევა ფენისთვის განკუთვნილი მიზნის მიხედვით. ამ თავში მოცემულია პირველი ქვაკუთხედი SNSP–ისთვის; ამასთან აუცილებელია ჩატარდეს ტექნოლოგიების შემდგომი კვლევა და მოხდეს მათი განვითარება მომავლის ახალი ქსელური აპლიკაციების გამრავლებით. შემოთავაზებული მეთოდების განსახორციელებლად, უპირველეს ყოვლისა, აუცილებელია თანამგზავრულ ქსელში ცენტრალიზებული კონტროლერის განთავსება, რომელიც დაფუძნებულია პროგრამული უზრუნველყოფით განსაზღვრულ თანამგზავრულ ქსელზე. იმის გამო, რომ ლოგიკურად ცენტრალიზებულმა კონტროლერმა უნდა უზრუნველყოს ულტრა დაბალი შეყოვნება SNSP–ის მართვისათვის, მომავალი კვლევითი სამუშაო შეიძლება მოიცავდეს დეტალურ სტრატეგიას, თუ როგორ და როდის უნდა შესრულდეს ჰენდოვერი, შესაძლოა პროაქტიული გზითაც, და მოძრავი მომხმარებლის ფენის დიზაინს, ინტელექტუალური სქემების კომბინაციით, როგორიცაა განმტკიცებული ან ფედერირებული სწავლება შემოთავაზებული SNSP მეთოდების გამოყენებით განაწილებული გზით.

ბოლოთქმა

ბოლო წლებში შეინიშნება LEO თანამგზავრების კოსმოსში განლაგების მზარდი ტენდენცია თავისუფალი სივრცეში მათი სიგნალების გავრცელებისას შემცირებული მილევისა და დაბალი შეყოვნების, დაბალი პროფილის მქონე ანტენების გამოყენების შესაძლებლობის და თითო თანამგზავრზე გაშვების შემცირებული ღირებულების გამო. LEO თანამგზავრული საკომუნიკაციო სისტემების წარმატებული დანერგვა მიიღწევა ახალი ტექნოლოგიების უწყვეტი განვითარებისა და მზარდი ინტერესისა და ინვესტიციების გზით, რამაც ჭეშმარიტად მიიყვანა თანამგზავრული კომუნიკაციების პოტენციალი უფრო მაღალ საზღვრებამდე, რაც უნდა იქნეს შესწავლილი სხვადასხვა კოსმოსური სისტემების აპლიკაციებისა და სერვისების სწრაფი გავრცელების მხარდასაჭერად. გარდა ამისა, LEO თანამგზავრული საკომუნიკაციო სისტემები შეიძლება გამოყენებულ იქნეს ტერესტრიალური ქსელების მხარდასაჭერადაც, რათა გადაილახოს არსებული შეზღუდვები B5G/6G ეკოსისტემის სწრაფი ევოლუციის დასაკმაყოფილებლად და შესაბამისად, ქსელის შემოთავაზებული დაფარვისა და გამტარუნარიანობის გაზრდისთვის.

ეს წიგნი წარმოგვიდგენს ახალ ტექნოლოგიებსა და კვლევის პერსპექტივებს LEO თანამგზავრულ საკომუნიკაციო სისტემებში, ასევე ძირითად ტექნიკურ გამოწვევებს, დაკავშირებულს LEO თანამგზავრების გლობალურ უსადენო საკომუნიკაციო პლატფორმაში ინტეგრირებასთან, რომელიც გაკეთებულია უახლეს პუბლიკაციებზე და სამეცნიერო მიღწევებზე დაყრდნობით. კერძოდ, განხილულია მომდევნო თაობის მეგათანამგზავრული ქსელების ეფექტიანი გამოყენების შესაძლებლობები თანასწორი წვდომისთვის და ამ კუთხით არსებული გამოწვევები; შესწავლილია მოდელირების ახალი ტექნიკა LEO თანამგზავრებზე დაფუძნებული ულტრა მკვრივი საკომუნიკაციო სისტემებისთვის; განხილულია ორბიტული პერიფერიის განტვირთვის შესაძლებლობა LEO თანამგზავრების მეგათანავარსკვლავედებზე გამოთვლითი კუთხით თანასწორი წვდომისთვის; წარმოდგენილია წრიულგზიანი ქსელები, რომლებიც ახორციელებენ წვდომას ყველასათვის და რომელთა დანერგვაც შესაძლებელია შეყოვნებისადმი ტოლერანტული ქსელური პროტოკოლებითა და იაფფასიანი ნანო–თანამგზავრებით; განხილულია LEO თანამგზავრული წვდომის ქსელებთან დაკავშირებული LEO–SAN პერსპექტიული ტექნოლოგია, რომელიც შეავსებს ტერესტრიალურ ფიჭურ ქსელებს მომავალი 6G უსადენო ქსელებისთვის, გამტარუნარიანობის და დაფარვის მნიშვნელოვნად გაზრდით; წარმოდგენილია მიწისქვეშა–თანამგზავრული კავშირის სისტემის არქიტექტურა და შეფასებულია მისი ტექნიკური შესაძლებლობები რეალური მეურნეობის სცენარის ვრცელი კომპიუტერული სიმულაციის მეშვეობით; წარმოდგენილია LEO თანამგზავრებზე დაფუძნებული პოზიციონირება მომავალი თანასწორი წვდომის ლოკალიზაციისთვის და ამ საკითხის ტექნიკურ–ეკონომიკური შესწავლა; შესწავლილია კოსმოსურ–საჰაერო–სახმელეთო FSO ქსელები მაღალი გამტარუნარიანობის მქონე თანამგზავრული კომუნიკაციებისთვის; წარმოდგენილია თანამგზავრული ქსელების ფენებად დაყოფა, რომელიც არის ერთ–ერთი მთავარი მეთოდი ტერესტრიალურ 5G/B5G ქსელებში და პრაქტიკულად არ არის შესწავლილი თანამგზავრულ სისტემებში.

ვფიქრობთ, რომ მასალა სასარგებლო იქნება და დახმარებას გაუწევს საინფორმაციო ტექნოლოგიებისა და კომუნიკაციების დარგში მომუშავე სპეციალისტებს და აკადემიურ პერსონალს, ბაკალავრიატის მაღალი კურსის სტუდენტებს, მაგისტრანტებსა და დოქტორანტებს, და უდავოდ დაახლოვებს მათ საერთაშორისო სამეცნიერო ორბიტასთან.

სერგო შავგულიძე, ნოდარ უღრელიძე, მამუკა ჩხაიძე

თბილისი, ივნისი, 2023 წელი

ლიტერატურა

პირველი თავში გამოყენებული ლიტერატურა:

A. Al-Hourani, “A Tractable Approach for Predicting Pass Duration in Dense Satellite Networks,” IEEE Commun. Letters, vol. 25, no. 8, 2021, pp. 2698–2702.

A. Al-Hourani and I. Guvenc, “On Modeling Satellite-to-Ground Pathloss in Urban Environments,” IEEE Commun. Letters, vol. 25, no. 3, 2021, pp. 696–700.

A. Al-Hourani, “An Analytic Approach for Modeling the Coverage Performance of Dense Satellite Networks,” IEEE Wirelless Commun. Letters, vol. 10, no. 4, 2021, pp. 897–901

A. Al-Hourani, “Optimal Satellite Constellation Altitude for Maximal Coverage,” IEEE Wireless Commun. Letters, vol. 10, no. 7, 2021, pp. 1444-48.

M. De Sanctis et al., “Satellite Communications Supporting Internet of Remote Things,” IEEE IoT J., vol. 3, no. 1, 2015, pp. 113-23.

B. Evans et al., “Integration of Satellite and Terrestrial Systems in Future Multimedia Communications,” IEEE Wireless Commun., vol. 12, no. 5, Oct. 2005, pp. 72-80.

M. Giordani and M. Zorzi, “Non-Terrestrial Networks in the 6G Era: Challenges and Opportunities,” IEEE Network, vol. 35, no. 2, Mar./Apr. 2021, pp. 244-51.

B. A. Homssi et al. “Next Generation Mega Satellite Networks for Access Equality: Opportunities, Challenges, and Performance,” IEEE Commun. Mag., vol. 60, no. 7, April 2022, pp. 18-24.

B. A. Homssi and A. Al-Hourani, “Modeling Uplink Coverage Performance in Hybrid Satellite-Terrestrial Networks,” IEEE Commun. Letters, vol. 25, no. 10, 2021, pp. 3239-43.

S. Liu et al., “LEO Satellite Constellations for 5G and Beyond: How Will They Reshape Vertical Domains?,” IEEE Commun. Mag., vol. 59, no. 7, July 2021, pp. 30-36.

X. Lin et al., “5G From Space: An Overview of 3GPP Non-Terrestrial Networks,” IEEE Commun. Stds. Mag., vol. 5, no. 4, Dec. 2021, pp. 147–53.

R. T. Schwarz et al., “MIMO Applications for Multibeam Satellites,” IEEE Trans. Broadcasting, vol. 65, no. 4, 2019, pp. 664–81.

Z. Sodnik, B. Furch, and H. Lutz, “Optical Intersatellite Communication,” IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 16, no. 5, 2010, pp. 1051–57.

A. Talgat, M. A. Kishk, and M.-S. Alouini, “Nearest Neighbor and Contact Distance Distribution for Binomial Point Process on Spherical Surfaces,” IEEE Commun. Letters, vol. 24, no. 12, 2020, pp. 2659-63.

A. Talgat, M. A. Kishk, and M.-S. Alouini, “Stochastic Geometry-Based Analysis of LEO Satellite Communication Systems,” IEEE Commun. Letters, vol. 25, no. 8, 2021, pp. 2458–62.

მეორე თავში გამოყენებული ლიტერატურა:

G. Alfano and A. De Maio, “Sum of Squared Shadowed-Rice Random Variables and Its Application to Communication Systems Performance Prediction,” IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 6, no. 10, 2007, pp. 3540-45.

A. Al-Hourani, “An Analytic Approach for Modeling the Coverage Performance of Dense Satellite Networks,” IEEE Wireless Commun. Letters, vol. 10, no. 4, 2021, pp. 897-901.

J. G. Andrews, F. Baccelli, and R. K. Ganti, “A Tractable Approach to Coverage and Rate in Cellular Networks,” IEEE Trans. Commun., vol. 59, no. 11, 2011, pp. 3122-34.

O. M. Bushnaq et al., “Optimal Deployment of Tethered Drones for Maximum Cellular Coverage in User Clusters,” IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 20, no. 3, 2020, pp. 2092-2108.

I. Del Portillo, B. G. Cameron, and E. F. Crawley, “A Technical Comparison of Three Low Earth Orbit Satellite Constellation Systems to Provide Global Broadband,” Acta Astronautica, vol. 159, 2019, pp. 123-35.

M. Haenggi, Stochastic Geometry for Wireless Networks, Cambridge Univ. Press, 2012.

B. A. Homssi and A. Al-Hourani, “Modeling Uplink Coverage Performance in Hybrid Satellite-Terrestrial Networks,” 2021; https://arxiv.org/abs/2106.04293.

S. Liu et al., “LEO Satellite Constellations for 5G and Beyond: How Will They Reshape Vertical Domains?,” 2021; https:// arxiv.org/abs/2106.0989.

H. M. Mourad et al., “Generalized Performance Evaluation of Low Earth Orbit Satellite Systems,” IEEE Commun. Letters, vol. 5, no. 10, 2001, pp. 405-07.

N. Okati and T. Riihonen, “Modeling and Analysis of LEO Megaconstellations as Nonhomogeneous Poisson Point Processes,” IEEE VTC-Spring 2021, 2021.

N. Okati et al., “Downlink Coverage and Rate Analysis of Low Earth Orbit Satellite Constellations Using Stochastic Geometry,” IEEE Trans. Commun., vol. 68, no. 8, 2020, pp. 5120-34.

N. Okati and T. Riihonen, “Stochastic Analysis of Satellite Broadband by Mega-Constellations with Inclined LEOs,” 31st Annual Int’l. Symp. Personal, Indoor and Mobile Radio Commun., 2020.

A. Talgat, M. A. Kishk, and M.-S. Alouini, “Stochastic Geometry-Based Analysis of LEO Satellite Communication Systems,” IEEE Commun. Letters, vol. 25, no. 8, 2021, pp. 2458–62.

A. Talgat, M. A. Kishk, and M.-S. Alouini, “Nearest Neighbor and Contact Distance Distribution for Binomial Point Process on Spherical Surfaces,” IEEE Commun. Letters, vol. 24, no. 12, 2020, pp. 2659-63.

R. Wang, M. A. Kishk, and M.-S. Alouini, “Ultra-Dense LEO Satellite-Based Communication Systems: A Novel Modeling Technique,” IEEE Commun. Mag., vol. 60, no. 7, April 2022, pp. 25–31.

მესამე თავში გამოყენებული ლიტერატურა:

G. F. Anastasi et al., “A Hybrid Cross-Entropy Cognitive-Based Algorithm for Resource Allocation in Cloud Environments,” IEEE 8th Int’l. Conf. Self-Adaptive and Self-Organizing Systems, 2014, pp. 11-20.

M. Bacco et al., “Networking Challenges for Non-Terrestrial Networks Exploitation in 5G,” IEEE 2nd 5G World Forum, 2019, pp. 623–28.

M. Bacco et al., “UAVs and UAV Swarms for Civilian Applications: Communications and Image Processing in the SCIADRO Project,” Int’l. Conf. Wireless and Satellite Systems, Springer, 2017, pp. 115–24.

L. Baresi et al., “A Unified Model for the Mobile-EdgeCloud Continuum,” ACM Trans. Internet Technology, vol. 19, no. 2, 2019, pp. 1-21.

D. Bhattacherjee et al., “In-Orbit Computing: An Outlandish Thought Experiment?,” ACM 19th Wksp. Hot Topics in Networks, 2020, pp. 197-204.

L. Bittencourt et al., “The Internet of Things, Fog and Cloud Continuum: Integration and Challenges,” Internet of Things, vol. 3, 2018, pp. 134-55.

P. Cassara, A. Gotta, M. Marchese, and F. Patrone, “Orbital Edge Offloading on Mega-LEO Satellite Constellations for Equal Access to Computing,” IEEE Commun. Mag., vol. 60, no. 7, April 2022, pp. 32-36.

B. Denby and B. Lucia, “Orbital Edge Computing: Machine Inference in Space,” IEEE Computer Architecture Letters, vol. 18, no. 1, 2019, pp. 59-62.

I. del Portillo et al., “Connecting the Other Half: Exploring Options for the 50% of the Population Unconnected to the Internet,” Telecommun. Policy, vol. 45, no. 3, 2021, p. 102,092.

T. Qiu et al., “Edge Computing in Industrial Internet of Things: Architecture, Advances and Challenges,” IEEE Commun. Surveys & Tutorials, vol. 22, no. 4, 2020, pp. 2462-88.

P. Saxena et al., “Resilient Hybrid SatCom and Terrestrial Networking for Unmanned Aerial Vehicles,” IEEE INFOCOM Wksps., 2020, pp. 418-23.

C. Sonmez, A. Ozgovde, and C. Ersoy, “Fuzzy Workload Orchestration for Edge Computing,” IEEE Trans. Network and Service Management, vol. 16, no. 2, 2019, pp. 769-82.

M. A. Vázquez et al., “Machine Learning for Satellite Communications Operations,” IEEE Commun. Mag., vol. 59, no. 2, Feb. 2021, pp. 22–27.

Y. Wang et al., “Satellite Edge Computing for the Internet of Things in Aerospace,” Sensors, vol. 19, no. 20, 2019, p. 4375.

J. Wei et al., “SatEdgeSim: A Toolkit for Modeling and Simulation of Performance Evaluation in Satellite Edge Computing Environments,” IEEE 12th Int’l. Conf. Commun. Software and Networks, 2020, pp. 307-13.

მეოთხე თავში გამოყენებული ლიტერატურა:

S. C. Burleigh and E. J. Birrane, “Toward a Communications Satellite Network for Humanitarian Relief,” 1st Int’l. Conf. Wireless Technologies for Humanitarian Relief, 2011, pp. 219-24.

S. Burleigh, “Interplanetary Overlay Network: An Implementation of the DTN Bundle Protocol,” IEEE Consumer Commun. and Networking Conf., 2007.

M. Cello, M. Marchese, and F. Patrone, “Hot Spot Selection in Rural Access Nanosatellite Networks,” Proc. 9th ACM MobiCom Wkhp. Challenged Networks, 2014, pp. 69-72.

J. Day, Patterns in Network Architecture, Pearson Education India, 2007.

M. Feldmann and F. Walter, “Refining the Ring Road-Delays and Path Lengths in a LEO Satellite Message-Ferry Network,” 2017 IEEE ICC, 2017.

M. Feldmann, J. A. Fraire, and F. Walter, “Tracking Lunar Ring Road Communication,” IEEE ICC 2018, 2018.

M. Feldmann et al., “Ring Road Networks: Access for Anyone,” IEEE Commun. Mag., vol. 60, no. 7, April 2022, pp. 38-44.

J. A. Fraire, O. De Jonckere, and S. C. Burleigh, “Routing in the Space Internet: A Contact Graph Routing Tutorial,” J. Network and Computer Applications, vol. 174, 2021, p. 102,884.

J. A. Fraire, M. Feldmann, and S. C. Burleigh, “Benefits and Challenges of Cross-Linked Ring Road Satellite Networks: A Case Study,” 2017 IEEE ICC, 2017.

C. Krupiarz et al., “Using Smallsats and DTN for Communication in Developing Countries,” Proc. Int’l. Astronautical Congress, 2008.

M. Marchese and F. Patrone, “E-CGR: Energy-Aware Contact Graph Routing Over Nanosatellite Networks,” IEEE Trans. Green Commun. and Net., vol. 4, no. 3, 2020, pp. 890-902.

C.-A. Sarros, V. Demiroglou, and V. Tsaoussidis, “Intermittently-Connected IoT Devices: Experiments with an NDN-DTN Architecture,” IEEE CCNC 2021, 2021, pp. 1-9.

T. Spyropoulos, K. Psounis, and C. S. Raghavendra, “Spray and Wait: An Efficient Routing Scheme for Intermittently Connected Mobile Networks,” Proc. 2005 ACM SIGCOMM Wksp. Delay-Tolerant Networking, 2005, pp. 252-59.

F. Walter, Prediction-Enhanced Routing in Disruption-Tolerant Satellite Networks, doctoral dissertation, Technische Universität Dresden, 2020.

მეხუთე თავში გამოყენებული ლიტერატურა:

H. Cui et all., “Space-air-ground integrated network (SAGIN) for 6G: Requirements, architecture and challenges,” China Commun., vol. 19, no. 2, pp. 90–108, Feb. 2022.

B. Di, L. Song, Y. Li, and H. V. Poor, “Ultra-dense LEO: Integration of satellite access networks into 5G and beyond,” IEEE Wireless Commun., vol. 26, no. 2, Apr. 2019, pp. 62-69.

S. Foucart and H. Rauhut, A Mathematical Introduction to Compressive Sensing, Jan. 2013.

Z. Gao, et all., “Grant-free random access in massive MIMO based LEO satellite internet of things,” in IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC), Xiamen, China, Jul. 2021, pp. 700–705.

R. Hadani, S. Rakib, M. Tsatsanis, A. Monk, A. J. Goldsmith, A. F. Molisch, and R. Calderbank, “Orthogonal time frequency space modulation,” in IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), San Francisco, CA, Mar. 2017.

O. Kodheli et all., “Satellite communications in the new space era: A survey and future challenges,” IEEE Commun. Surveys & Tutorials, vol. 23, no. 1, First quarter 2021, pp. 70-109.

A. Lalbakhsh et all., “Darkening low-earth orbit satellite constellations: A review,” IEEE Access, vol. 10, Feb. 2022, pp. 24 383-24 394.

Y. Li, I. Ngebani, X.-G. Xia, and A. Host-Madsen, “On performance of vector OFDM with linear receivers,” IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 60, no. 10, Oct. 2012, pp. 5268–5280.

X. Lin et all., “On the path to 6G: Embracing the next wave of low earth orbit satellite access,” IEEE Commun. Mag., vol. 59, no. 12, Dec. 2021, pp. 36-42.

S. Liu et all., “LEO satellite constellations for 5G and beyond: How will they reshape vertical domains?” IEEE Commun. Mag., vol. 59, no. 7, Jul. 2021, pp. 30-36.

J. C. McDowell, “The low earth orbit satellite population and impacts of the Spacex Starlink constellation,” The Astrophysical Journal Letters, vol. 892, no. 2, May 2020, pp. 36-45.

P. Noschese, S. Porfili, and S. Di Girolamo, “ADS-B via Iridium NEXT satellites,” in Tyrrhenian International Workshop on Digital Communications - Enhanced Surveillance of Aircraft and Vehicles, Capri, Italy, Sep. 2011, pp. 213-218.

X.-G. Xia, “Precoded and vector OFDM robust to channel spectral nulls and with reduced cyclic prefix length in single transmit antenna systems,” IEEE Trans. on Commun., vol. 49, no. 8, Aug. 2001, pp. 1363-1374.

Z. Xiao et all., “LEO Satellite Access Network (LEO-SAN) Towards 6G: Challenges and Approaches,” IEEE Wireless Commun. (To be published).

B. Zheng, S. Lin, and R. Zhang, “Intelligent reflecting surface-aided LEO satellite communication: Cooperative passive beamforming and distributed channel estimation,” IEEE Journal on Select. Areas in Commun., vol. 40, no. 10, October 2022, pp. 3057-3070.

მეექვსე თავში გამოყენებული ლიტერატურა:

I. F. Akyildiz et al., “Wireless underground sensor networks: Research challenges,” Ad Hoc Networks, vol. 4, no. 6, 2006, pp. 669–686.

A. Al-Hourani et al., “On Modeling Satellite-to-Ground Path-Loss in Urban Environments,” IEEE Commun. Lett., vol. 25, no. 3, 2021, pp. 696-700.

Y. A. Al-Rumikhani, “Effect of crop sequence, soil sample location and depth on soil water holding capacity under center pivot irrigation,” Agricultural Water Management, vol. 55, no. 2, 2002, pp. 93-104.

M. Asad Ullah et al., “Massive Machine-Type Communication and Satellite Integration for Remote Areas,” IEEE Wireless Communications, vol. 28, no. 4, 2021, pp. 74-80.

M. Asad Ullah et al., “Enabling mMTC in Remote Areas: LoRaWAN and LEO Satellite Integration for Offshore Wind Farm Monitoring,” IEEE Trans. Ind. Informat., vol. 18, no. 6, 2022, pp. 3744-3753.

M. Asad Ullah et al., “AnSAGalysis and Simulation of LoRaWAN LR-FHSS for Direct-to-Satellite Scenario,” IEEE Wireless Commun. Lett, vol. 11, no. 3, 2022, pp. 548-552.

G. Boquet et al., “LR-FHSS: Overview and Performance Analysis,” IEEE Commun. Mag., vol. 59, no. 3, 2021, pp. 30-36.

X. Dong et al., “Autonomous precision agriculture through integration of wireless underground sensor networks with center pivot irrigation systems,” Ad Hoc Networks, vol. 11, no. 7, 2013, pp. 1975-1987.

K. Lin et al., “Experimental Link Quality Analysis for LoRa-Based Wireless Underground Sensor Networks,” IEEE Internet of Things J., vol. 8, no. 8, 2021, pp. 6565-6577.

K. Lin at al., “Subterranean mMTC in Remote Areas: Underground-to-Satellite Connectivity Approach,” IEEE Commun. Mag., vol. 61, no. 5, 2023, pp. 136-142.

R. M. Sandoval et al., “Deriving and Updating Optimal Transmission Configurations for Lora Networks,” IEEE Access, vol. 8, 2020, pp. 38586-38595.

M. C. Vuran et al., “Internet of underground things in precision agriculture: Architecture and technology aspects,” Ad Hoc Networks, vol. 81, 2018, pp. 160-173.

D. Wohwe Sambo et al., “Wireless Underground Sensor Networks Path Loss Model for Precision Agriculture (WUSN-PLM),” IEEE Sensors J., vol. 20, no. 10, 2020, pp. 5298-5313.

მეშვიდე თავში გამოყენებული ლიტერატურა:

M. Y. Abdelsadek, H. Yanikomeroglu, and G. K. Kurt, “Future Ultra-Dense LEO Satellite Networks: A Cell-Free Massive MIMO Approach,” 2021 IEEE ICC Wksps., 2021.

S. Balakrishnan et al., “Physical Layer Identification Based on Spatial-Temporal Beam Features for Millimeter-Wave Wireless Networks,” IEEE Trans. Info. Forensics and Security, vol. 15, 2020, pp. 1831–45.

R. M. Ferre and E. S. Lohan, “Comparison of MEO, LEO, and Terrestrial IoT Configurations in Terms of GDOP and Achievable Positioning Accuracies,” IEEE J. Radio Frequency Identification, 2021.

R. M. Ferre et al., “Is LEO-Based Positioning with Mega-Constellations the Answer for Future Equal Access Localization?” IEEE Commun. Mag., vol. 60, 6, 2022, pp. 40-46.

P. V. R. Ferreira et al., “Reinforcement Learning for Satellite Communications: From LEO to Deep Space Operations,” IEEE Commun. Mag., vol. 57, no. 5, May 2019, pp. 70-75.

S. Jaeckel et al., “Quadriga: A 3-D Multi-Cell Channel Model with Time Evolution for Enabling Virtual Field Trials,” IEEE Trans. Antennas and Propagation, vol. 62, no. 6, 2014, pp. 3242-56.

B. Jang and H. Kim, “Indoor Positioning Technologies without Offline Fingerprinting Map: A Survey,” IEEE Commun. Surveys & Tutorials, vol. 21, no. 1, 2019, pp. 508–25.

J. J. Khalife and Z. M. Kassas, “Receiver Design for Doppler Positioning with LEO Satellites,” ICASSP 2019, 2019, pp. 5506–10.

T. G. Reid et al., “Broadband LEO Constellations for Navigation,” Navigation, vol. 65, no. 2, 2018, pp. 205-20.

L. You et al., “LEO Satellite Communications with Massive MIMO,” IEEE ICC 2020, June 2020.

S. H. Yueh et al., “A Satellite Synthetic Aperture Radar Concept Using P-Band Signals of Opportunity,” IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, vol. 14, 2021, pp. 2796-2816.

A. Vázquez-Castro and M. Hayashi, “Physical Layer Security for RF Satellite Channels In the Finite-Length Regime,” IEEE Trans. Info. Forensics and Security, vol. 14, no. 4, 2019, pp. 981-93.

Y. Zhang et al., “Deep Learning-Based Channel Prediction for LEO Satellite Massive MIMO Communication System,” IEEE Wireless Commun. Letters, vol. 10, Aug. 2021.

J. Zhang et al., “Radio Frequency Fingerprint Identification for Narrowband Systems, Modelling and Classification,” IEEE Trans. Info. Forensics and Security, vol. 16, 2021, pp. 3974-87.

მერვე თავში გამოყენებული ლიტერატურა:

S. C. Arum, D. Grace, and P. D. Mitchell, “A Review of Wireless Communication Using High-Altitude Platforms for Extended Coverage and Capacity,” Computer Commun., vol. 157, 2020, pp. 232-56.

D. M. Boroson and B. S. Robinson, “The Lunar Laser Communication Demonstration: NASA’s First Step toward Very High Data Rate Support of Science and Exploration Missions,” The Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer Mission (LADEE), Springer, 2015, pp. 115–28.

M. Z. Chowdhury et al., “Optical Wireless Hybrid Networks: Trends, Opportunities, Challenges, and Research Directions,” IEEE Commun. Surveys & Tutorials, vol. 22, no. 2, 2020, pp. 930-66.

B. L. Edwards and D. J. Israel, “Update on NASA’s Laser Communications Relay Demonstration Project,” 2018 SpaceOps Conf., 2018, p. 2395.

H. Kaushal, V. Jain, and S. Kar, “Ground-to-Satellite Optical Communication Link Performance with Spatial Diversity in Weak Atmospheric Turbulence,” Fiber and Integrated Optics, vol. 29, no. 4, 2010, pp. 315-40.

F. Rinaldi et al., “Non-terrestrial Networks in 5G & Beyond: A Survey,” IEEE Access, vol. 8, 2020, pp. 165,178-200.

R. Samy et al., “Performance Analysis of Hybrid SAG-FSO/RF Satellite Communication System,” TechRxiv, Preprint; https://doi.org/10.36227/techrxiv.19623849.v1, 2022.

R. Samy et. al., “Space-Air-Ground FSO Networks for High-Throughput Satellite Communications,” IEEE Commun. Mag., vol. 60, no. 12, 2022, pp. 82-87.

C. M. Schieler et al., “200 Gbps TBIRD CubeSat Downlink: Pre-Flight Test Results,” Free-Space Laser Commun. XXXIV, vol. 11993, SPIE, 2022, pp. 200–06.

S. Sharma, A. Madhukumar, and R. Swaminathan, “Capacity Analysis for Hybrid FSO/RF Networks,” Proc. IEEE Int’l. Symp. Info. Theory Appl., vol. 55, no. 11, 2018, p. 501.

S. Shah et al., “Adaptive-Combining-Based Hybrid FSO/ RF Satellite Communication with and without HAPS,” IEEE Access, 2021.

R. Swaminathan et al., “HAPS-Based Relaying for Integrated Space-Air-Ground Networks with Hybrid FSO/RF Communication: A Performance Analysis,” IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems, 2021.

A. Trichili et al., “Roadmap to Free Space Optics,” JOSA B, vol. 37, no. 11, 2020, pp. A184-A201.

T. V. Nguyen et al., “On the Design of Rate Adaptation for Relay-Assisted Satellite Hybrid FSO/RF Systems,” IEEE Photonics J., vol. 14, no. 1, 2021, pp. 1-11.

E. Zedini, A. Kammoun, and M.-S. Alouini, “Performance of Multibeam Very High Throughput Satellite Systems Based on FSO Feeder Links with HPA Nonlinearity,” IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 19, no. 9, 2020, pp. 5908-23.

მეცხრე თავში გამოყენებული ლიტერატურა:

I. Ali et al., “Doppler Applications in LEO Satellite Communication Systems,” in The Springer International Series in Engineering and Computer Science, vol. 656. New York, NY, USA: Springer Science & Business Media, 2006, p. 116.

A. U. Chaudhry and H. Yanikomeroglu, “Laser Intersatellite Links in a Starlink Constellation: A Classification and Analysis,” IEEE Veh. Technol. Mag., vol. 16, no. 2, 2021, pp. 48-56.

J. P. Choi and C. Joo, “Challenges for Efficient and Seamless Space-terrestrial Heterogeneous Networks,” IEEE Commun. Mag., vol. 53, no. 5, 2015, pp. 156–62.

M. Chowdhury, M. R. Rahman, and R. Boutaba, “ViNEYard: Virtual Network Embedding Algorithms with Coordinated Node and Link Mapping,” IEEE/ACM Trans. Netw., vol. 20, no. 1, 2011, pp. 206-19.

I. Del Portillo, B. G. Cameron, and E. F. Crawley, “A Technical Comparison of Three Low Earth Orbit Satellite Constellation Systems to Provide Global Broadband,” Acta Astronaut. (U.K.), vol. 159, , 2019, pp. 123-35.

A. Fischer et al., “Virtual Network Embedding: A Survey,” IEEE Commun. Surveys Tuts., vol. 15, no. 4, 2013, pp. 1888–906.

A. E. Gamal and Y. H. Kim, Network Information Theory. Cambridge, MA, USA: Cambridge Univ. Press, 2011, pp. 364-81.

J. Kim et al., “Space Mobile Networks: Satellite as Core and Access Networks for B5G,” IEEE Commun. Mag., vol. 60, no. 4, Apr. 2022, pp. 58-64.

T. Kim, J. Kwak, and J. P. Choi, “Satellite Edge Computing Architecture and Network Slice Scheduling for IoT Support,” IEEE Internet Things J., vol. 9, no. 16, 2022, pp. 14938-51.

T. Kim, J. Kwak, and J. P. Choi, “Satellite Network Slice Planning, Architecture, Performance Analysis, and Open Issues,” IEEE Veh. Technol. Mag., vol.18, no. 2, 2023, pp. 29-38.

Y. Lee and J. P. Choi, “Connectivity Analysis of Mega-constellation Satellite Networks with Optical Intersatellite Links,” IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 57, no. 6, 2021, pp. 4213-26.

O. Sallent et al., “On Radio Access Network Slicing from a Radio Resource Management Perspective,” IEEE Wireless Commun., vol. 24, no. 5, 2017, pp. 166-74.

“Solutions for NR to Support Non-terrestrial Networks (NTN),” 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Sophia Antipolis, France, Tech. Rep. (TR) 38.821, version 16.1.0, 2021.

R. Suzuki and Y. Yasuda, “Study on ISL Network Structure in LEO Satellite Communication Systems,” Acta Astronaut. (U.K.), vol. 61, nos. 7-8, Oct. 2007, pp. 648-58.

D. Yang, J. Liu, R. Zhang, and T. Huang, “Multi-constraint Virtual Network Embedding Algorithm for Satellite Networks,” in Proc. IEEE Global Commun. Conf. (Globecom), 2020, pp. 1-6.

აბრევიატურები და აკრონიმები

3GPP — Third Generation Partnership Project — მე-3 თაობის პარტნიორობის პროექტი
5GC — 5G Core — 5G ძირითადი (ქსელი)
AAP — Application Agent Protocol — აპლიკაციის აგენტის პროტოკოლი
ABR — Available Bit Rate — ბიტის გადაცემის ხელმისაწვდომი სიჩქარე
ADR — Adaptive DR — ადაპტიური DR
AI — Artificial Intelligence — ხელოვნური ინტელექტი
AMF — Access and Mobility Management Function — წვდომისა და მობილურობის მართვის ფუნქცია
API — Application Programming Interface — აპლიკაციის პროგრამირების ინტერფეისი
APP — Application — გამოყენება
AV — Autonomous Vehicle — ავტონომიური სატრანსპორტო საშუალება
B5G — Beyond 5G — 5G-ის შემდგომი
BER — Bit Error Rate — ბიტზე შეცდომის ალბათობა
BLE — Bluetooth Low Energy — დაბალი ენერგიის Bluetooth
BP — Bundle Protocol — პაკეტის (შეკვრის) პროტოკოლი
BPP — Binomial Point Process — ბინომიალური წერტილოვანი პროცესი
BPSK — Binary Phase Shift Keying — ორობითი ფაზური მოდულაცია
BPv7 — BP version 7 — BP ვერსია 7
BS — Base Station — საბაზო სადგური
CAPEX — Capital Expenditure — კაპიტალური დანახარჯები
CCSDS — Consultative Committee for Space Data Systems — კოსმოსურ მონაცემთა სისტემების საკონსულტაციო კომიტეტი
CDMA — Code Division Multiple Aceess — მრავალჯერადი წვდომა კოდური დაყოფით
CGR — Contact Graph Routing — კონტაქტების გრაფის მარშრუტიზაცია
CLA — Convergence Layer Adapter — კონვერგენციის ფენის ადაპტერი
CN — Core Network — ძირითადი ქსელი
CPU — Central Processing Unit — ცენტრალური მმართველი ბლოკი
CR — Code Rate — კოდური სიჩქარე
CSI — Channel State Information — არხის მდგომარეობის შესახებ ინფორმაცია
CU — Centralized Unit — ცენტრალიზებული ბლოკი
D — Dimension — განზომილება
DFT — Discrete Fourier Transform — ფურიეს დისკრეტული გარდაქმნა
DN — Data Network — მონაცემთა ქსელი
DR — Data Rate — მონაცემთა გადაცემის სიჩქარე
DTN — Delay-Tolerant Network — შეყოვნებისადმი ტოლერანტული ქსელი
DU — Distributed Unit — განაწილებული ბლოკი
EIRP — Effective Isotropic Radiated Power — ეფექტიანი იზოტროპულად გასხივებული სიმძლავრე
EPP — Energy Per Packet — ენერგია თითო პაკეტზე
ESA — European Space Agency — ევროპის კოსმოსური სააგენტო
ETSI — European Telecommunications Standards Institute — ევროპის სატელეკომუნიკაციო სტანდარტების ინსტიტუტი
FCC — Federal Communications Commission — კომუნიკაციების ფედერალური კომისია
FDMA — Frequency Division Multiple Aceess — მრავალჯერადი წვდომა სიხშირული დაყოფით
FE — Far Edge — შორეული პერიფერია
FFT — Fast Fourier Transform — ფურიეს სწრაფი გარდაქმნა
FO — Full Offloading — სრული განტვირთვა
FSO — Free-Space Optical — თავისუფალი სივრცის ოპტიკური (ქსელი)

G — Generation — თაობა
GCV — Google Cloud Vision — Google-ის ღრუბლოვანი ხედვა
GDOP — Geometric Dilution of Precision — სიზუსტის გეომეტრიული შემცირება
GEO — Geostationary Orbit — გეოსტაციონარული ორბიტა
gNB — Next Generation Node B — შემდგომი თაობის კვანძი B
GNSS — Global Navigation Satellite System — გლობალური სანავიგაციო თანამგზავრული სისტემა
GW — Gateway — კარიბჭე
HAP — High Altitude Platform — მაღალი სიმაღლის პლატფორმა
HEO — Highly Elliptical Orbit — მაღალი ელიფსური ორბიტა
HTTP — Hypertext Transfer Protocol — ჰიპერტექსტის გადაცემის პროტოკოლი
ICT — Information and Communication Technology — საინფორმაციო და საკომუნიკაციო ტექნოლოგიები
IDFT — Inverse Discrete Fourier Transform — ფურიეს დისკრეტული უკუგარდაქმნა
IETF — Internet Engineering Task Force — ინტერნეტის საინჟინრო სამუშაო ჯგუფი
IIoT — Industrial IoT — ინდუსტრიული IoT
IMU — Inertial Measurement Unit — ინერციული საზომი ერთეული
ION — Interplanetary Overlay Network — პლანეტათაშორისი გადაფარვის ქსელი
IoT — Internet of Things — საგნების ინტერნეტი
IRS — Intelligent Reflecting Surface — ინტელექტუალური ამრეკლავი ზედაპირი
iSat — Intelectual Sattelite — ინტელექტუალური თანამგზავრი
ISL — Intersatellite Link — თანამგზავრთაშორისი ლინკი
ITSN — Integrated Terrestrial and Sattelite Network — ინტეგრირებული ტერესტრიალური და თანამგზავრული ქსელი
ITU — International Telecommunication Union — ტელეკომუნიკაციის საერთაშორისო კავშირი
LEO — Low Earth Orbit — დედამიწის დაბალი ორბიტა
LEO-SAN — LEO Satellite Access Network — LEO თანამგზავრული წვდომის ქსელი
LoRa — Long Range — მოქმედების დიდი რადიუსის (ტექნოლოგია)
LoS — Line of Sight — პირდაპირი ხედვის ხაზი
LPWAN — Low-Power WAN — დაბალი სიმძლავრის WAN
LR-FHSS — Long Range Frequency Hopping Spread Spectrum — მოქმედების დიდი რადიუსისთვის სპექტრის განვრცობა გადამტან სიხშირეებზე გადახტომებით
MAC — Medium Access Control — გარემოსთან წვდომის მართვა
MCS — Modulation-Coding Scheme — მოდულაცია-კოდირების სქემა
MEO — Medium Earth Orbit — დედამიწის საშუალო ორბიტა
MIMO — Multiple Input Multiple Output — მრავალშესასვლელიანი და მრავალგამოსასვლელიანი (სისტემა)
ML — Machine Learning — მანქანური სწავლება
mMIMO — massive MIMO — მასიური MIMO
mMTC — massive Machine-Type Communication — მასობრივი მანქანური ტიპის კომუნიკაცია
Msg A (B) — Message A (B) — შეტყობინება A (B)
MSN — Manhattan Street Network — მანჰეტენის ქუჩების ქსელი
NASA — National Aeronautics and Space Administration — აერონავტიკისა და კოსმოსური სივრცის (კვლევის) ეროვნული სამმართველო
NB-Iot — Narrowband IoT — ვიწროზოლოვანი IoT
NE — Near Edge — ახლო პერიფერია
NFV — Network Function Virtualization — ქსელის ფუნქციის ვირტუალიზაცია
NLoS — Non-Line of Sight — არაპირდაპირი ხედვის ხაზი
NPPP — Non-homogeneous Poisson Point Process — პუასონის წერტილოვანი არაერთგვაროვანი პროცესი
NTN — Non-Terrestrial Network — არატერესტრიალური ქსელი

OBW — Occupied Bandwidth — დაკავებული სიხშირული ზოლი
OE — Orbital Edge — ორბიტული პერიფერია
OEC — OE Computing — OE გამოთვლები
OFDM — Orthogonal Frequency Division Multiplexing — მულტიპლექსირება ორთოგონალური სიხშირული დაყოფით
OTFS — Orthogonal Time Frequency Space — ორთოგონალური დროითი-სიხშირული სივრცე
OTx — Optical Transmitter — ოპტიკური გადამცემი
PNT — Position, Navigation, and Timing — პოზიციონირება, ნავიგაცია და თაიმინგი
PPP — Poisson Point Process — პუასონის წერტილოვანი პროცესი
QAM — Quadrature Amplitude Modulation — კვადრატული ამპლიტუდური მოდულაცია
QoE — Quality of Experience — გამოცდილების ხარისხი
QoS — Quality of Service — მომსახურების ხარისხი
QPSK — Quadrature Phase Shift Keying — კვადრატული ფაზური მოდულაცია
RACH — Random Access Channel — შემთხვევითი წვდომის არხი
RAM — Regional Air Mobility — რეგიონალური საჰაერო მობილურობა
RAN — Radio Access Network — რადიოწვდომის ქსელი
RF — Radio Frequency — რადიოსიხშირე
RFF — Radio Frequency Fingerprinting — რადიოსიხშირული თითის ანაბეჭდი
RR — Round Robin — მრგვალი რობინი
RRN — Ring Road Network — წრიულგზიანი ქსელი
RSS — Receiving Signal Strength — მიღებული სიგნალის სიმძლავრე
RTT — Round-Trip Time — გადაცემის ორმხრივი დრო
RU — Radio Unit — რადიობლოკი
S — Server — სერვერი
SAG — Space-Air-Ground — კოსმოსურ-საჰაერო-სახმელეთო
SAN — Satellite Access Network — თანამგზავრული წვდომის ქსელი
SAT — Satellite — თანამგზავრი
SDN — Software Defined Networking — პროგრამული უზრუნველყოფით განსაზღვრული ქსელი
SDR — Software Defined Radio — პროგრამული უზრუნველყოფით განსაზღვრული რადიო
SEP — Symbol Error Probability — სიმბოლოზე შეცდომის ალბათობა
SF — Spread Factor — განვრცობის კოეფიციენტი
S-G — Satellite-Gateway (link) — თანამგზავრი-კარიბჭე (ლინკი)
SG — Stochastic Geometry — სტოქასტური გეომეტრია
SGP — Simplified General Perturbation — გამარტივებული ზოგადი პერტურბაცია
SH — Single-Hop — ერთნახტომიანი
SINR — Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio — სიგნალის ინტერფერენცია-პლუს-ხმაურთან თანაფარდობა
SIR — Signal-to-Interference Ratio — სიგნალის და ინტერფერენციის თანაფარდობა
SMF — Session Management Function — სესიის მართვის ფუნქცია
SN — Satellite Node — თანამგზავრული კვანძი
SNR — Signal-to-Noise Ratio — სიგნალისა და ხმაურის თანაფარდობა
SNSP — Satellite Network Slice Planning — თანამგზავრული ქსელის ფენების დაგეგმვა
SoO — Signal of Opportunities — ოპორტუნისტული (შესაძლებლობების) სიგნალი
SPP — Space Packet Protocol — კოსმოსური საპაკეტო პროტოკოლი
SR — Shadowed-Rician (fading) — რაისის დაჩრდილული (ფედინგი)
S-S — Satellite-Satellite (link) — თანამგზავრი-თანამგზავრი (ლინკი)
SSH — Secure Shell — უსაფრთხო გარსი
TCP — Transmission Control Protocol — გადაცემის მართვის პროტოკოლი
TDMA — Time Division Multiple Access — მრავალჯერადი წვდომა დროითი დაყოფით
U — Unit — ბლოკი

UAM — Urban Air Mobility — ურბანული საჰაერო მობილურობა
UAV — Unmanned Aerial Vehicle — უპილოტო საფრენი აპარატი
UDM — Unified Data Management — მონაცემთა ერთიანი მართვა
U-DtS — Underground Direct-to-Satellite — მიწისქვეშა პოზიციიდან თანამგზავრთან პირდაპირი კავშირი
UE — User Equipment — მომხმარებლის მოწყობილობა
U-ItS — Underground Indirect-to-Satellite — მიწისქვეშა პოზიციიდან თანამგზავრთან არაპირდაპირი კავშირი
UPF — User Plane Function — მომხმარებლის სიბრტყის ფუნქცია
URL — Uniform Resource Locator — რესურსების ერთიანი ლოკატორი
UT — User Terminal — მომხმარებლის ტერმინალი
UTC — Universal Time Coordinated — კოორდინირებული უნივერსალური დრო
UtS — Underground-to-Satellite — მიწისქვეშა-თანამგზავრული (ქსელი)
UWB — Ultra-Wideband — ულტრა ფართოზოლოვანი
VLEO — Very Low Earth Orbit — დედამიწის ძალიან დაბალი ორბიტა
VN — Virtual Network — ვირტუალური ქსელი
VNE — VN-Embedding — VN-ჩაშენება
VNF — Virtual Network Function — ვირტუალური ქსელის ფუნქცია
VNR — VN Request — VN მოთხოვნა
VOFDM — Vector OFDM — ვექტორული OFDM
VoIP — Voice over Internet Protocol — ხმის გადაცემა ინტერნეტპროტოკოლით
VWC — Volumetric Water Content — წყლის მოცულობითი შემცველობა
WAN — Wide Area Network — გლობალური (ფართო რეალის) ქსელი
WGS — World Geodetic System — მსოფლიო გეოდეზიური სისტემა
WUSN — Wireless Underground Sensor Network — უსადენო მიწისქვეშა სენსორული ქსელი