

გზა 6G-მდე: გამოწვევები კომუნიკაციების ინჟინრებისთვის

სერგო შავგულიძე

ტექნიკურ მეცნიერებათა დოქტორი, პროფესორი,
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ნოდარ უღრელიძე

ტექნიკურ მეცნიერებათა დოქტორი, პროფესორი,
კავკასიის უნივერსიტეტი

სერგო შავგულიძე, ნოდარ უღრელიძე

გზა 6G-მდე: გამოწვევები კომუნიკაციების ინჟინრებისთვის

Sergo Shavgulidze, Nodar Ugrelidze

The Road to 6G: Challenges for Communications Engineers

წინამდებარე წიგნში მოცემულია 6G-ის მიმოხილვა, რომელიც გაკეთებულია უახლეს პუბლიკაციებზე და სამეცნიერო მიღწევებზე დაყრდნობით. მისი მთავარი მიზანია შეისწავლოს ევოლუცია არსებული 5G ქსელებიდან მომავალი 6G ქსელებისკენ მომსახურების, რადიოინტერფეისის და ქსელის პერსპექტივებიდან გამომდინარე, რითაც, ჩვენი აზრით, უნდა ჩამოყალიბდეს ხედვა 6G ქსელების მიმართულებით. განხილულია არა მხოლოდ 6G-ის გამოყენების პოტენციური შემთხვევები, მოთხოვნები და მახასიათებლები, არამედ ასევე შესწავლილია ისეთი განვითარებადი ტექნოლოგიები და თემები, როგორცაა: ხელოვნური ინტელექტი, ტერაჰერცული და მოლეკულური კომუნიკაციები, რეკონფიგურირებადი ინტელექტუალური ზედაპირები, პარალელური არაწრფივი დამუშავება, უპილოტო საფრენი აპარატები, ფართომასშტაბიანი თანამგზავრული თანავარსკვლავედები. წიგნი წარმოგვიდგენს ამ ახალ სფეროებში ბოლოდროინდელი მიღწევების სისტემურ განხილვას, შესაძლო გამოწვევებს და კვლევით მიმართულებებს, რომლებიც ხელს შეუწყობს 6G მობილური უსადენო ქსელების სამომავლო განვითარებას. 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 – ლიკა ქაჯაია

კორექტორი – რუსუდან გელაშვილი

დამკაბადონებელი – დათო მოსიაშვილი

© სერგო შავგულიძე, ნოდარ უღრელიძე 2022.

წიგნის გამოცემა დაფინანსებულია კომუნიკაციების კომისიის მიერ.

გამომცემლის თანხმობის გარეშე ამ წიგნის არც ერთი ნაწილი არ შეიძლება გადაბეჭდილი ან რაიმე ფორმით კვლავ გამოცემული და გავრცელებული იქნას.

ISBN 978-9941-8-4543-7

სარჩევი

წინასიტყვაობა 7

თავი 1. ფიზიკური ფენის ათი გამოწვევა კომუნიკაციების ინჟინრებისთვის

1.1. შესავალი..... 14
1.2. ინტელექტუალური ამრეკლავი ზედაპირები..... 15
1.3. უფიჭო mMIMO..... 22
1.4. უფრო მაღალ სიხშირულ დიაპაზონებზე გადასვლა..... 27
1.5. SP-ის როლი 6G ეპოქაში 30
1.6. პირველი თავის დასკვნა 33

თავი 2. რეკონფიგურირებადი ინტელექტუალური ზედაპირები 6G სისტემებისთვის

2.1. შესავალი..... 34
2.2. RIS-ის დანიშნულება და გამოყენებები..... 35
2.3. RIS-თან დაკავშირებული გამოწვევები და კვლევის მიმართულებები 47
2.4. მეორე თავის დასკვნა..... 53

თავი 3. ტერაჰერცული უსადენო კომუნიკაციები 2030 წლისთვის და შემდგომ პერიოდში

3.1. შესავალი..... 54
3.2. ტერაჰერცული ინტეგრირებული ზონდირება და კომუნიკაცია 58
3.3. ტერაჰერცული ულტრამასიური MIMO და სხივის დინამიკური ჰიბრიდული ფორმირება 63
3.4. ტერაჰერცული ინტელექტუალური ზედაპირები 65

3.5. მანქანურ/ღრმა სწავლებაზე დაფუძნებული ტერაპევტული კომუნიკაციები	69
3.6. ეფექტიანობის შეფასება	73
3.7. მესამე თავის დასკვნა.....	78
თავი 4. მასობრივად პარალელური, არაწრფივი დამუშავება 6G-სთვის	
4.1. შესავალი.....	79
4.2. ტრადიციული და მასობრივად პარალელური არაწრფივი დამუშავება	83
4.3. მასობრივად პარალელური, არაწრფივი დამუშავება, როგორც 6G-ის რეალიზაციის საშუალება.....	88
4.4. მეოთხე თავის დასკვნა და შემდგომი კვლევითი გამოწვევები	99
თავი 5. ხელოვნურ ინტელექტზე დაფუძნებული ახალი 6G რადიონტერფეისი	
5.1. შესავალი.....	101
5.2. AI-ზე დაფუძნებული რადიონტერფეისი.....	102
5.3. AI-AI-ზე გადასვლის ეტაპებთან დაკავშირებული თემატური კვლევა.....	108
5.4. პროტოკოლის სწავლება MAC-სთვის.....	113
5.5. მეხუთე თავის დასკვნა.....	118
თავი 6. უპილოტო საფრენი აპარატების გამოყენება 6G-ში	
6.1. შესავალი.....	119
6.2. ძირითადი ბარიერები UAV-ების ფართო კომერციული გამოყენებისთვის და შესაბამისი გადაწყვეტილებები	122
6.3. ფიჭური ქსელის გაფართოებული შესაძლებლობები UAV-ებისთვის	127

6.4. ფიჭურთან დაკავშირებული UAV ქსელების გამოყენება 6G-ში	131
6.5. დაბალ სიმაღლეზე ფუნქციონირებადი UAV-ების მიღმა	136
6.6. მეექვსე თავის დასკვნა.....	140

თავი 7. დედამიწის დაბალი ორბიტის თანამგზავრების

გამოყენება 6G-ში

7.1. შესავალი.....	141
7.2. LEO თანამგზავრული თანავარსკვლავედის ევოლუცია და შესაძლებლობები.....	145
7.3. LEO თანამგზავრული წვდომის ძირითადი ტექნიკური გამოწვევები და გადაწყვეტილებები	149
7.4. სტანდარტიზაციის ასპექტები	156
7.5. თანამგზავრული მომსახურება და ბიზნესასპექტები	158
7.6. მეშვიდე თავის დასკვნა და 6G-ის პერსპექტივები.....	161

თავი 8. მოლეკულური ფიზიკური ფენა 6G-სთვის

არატალღოვან გარემოში

8.1. შესავალი.....	164
8.2. არსებული მიღწევები მაკრომასშტაბიანი მოლეკულური კავშირის მიმართულებით	166
8.3. თავდაცვისა და უსაფრთხოების გამოყენებები	176
8.4. კიბერ-ფიზიკური სისტემის გამოყენებები.....	179
8.5. მერვე თავის დასკვნა და 6G-ის მომავლის განხილვა.....	183

ბოლოთქმა	186
-----------------------	------------

ლიტერატურა.....	188
------------------------	------------

აბრევიატურები და აკრონიმები.....	200
---	------------

წინასიტყვაობა

მიუხედავად იმისა, რომ მეხუთე თაობის (5G) ფიჭური სისტემების განთავსება მიმდინარე ათწლეულშიც გაგრძელდება, უკვე ძალიან დიდი ინტერესი ჩნდება ისეთი ტექნოლოგიების მიმართ, რომლებიც საფუძვლად დაედება მის მემკვიდრეს, მეექვსე თაობას, ანუ 6G-ის. აკადემიური წრეების, სამრეწველო განვითარების ჯგუფებისა და სხვადასხვა ქვეყნის მთავრობების მიერ დაწყებულია მნიშვნელოვანი კვლევითი აქტივობები, რათა 6G-ის კუთხით განისაზღვროს ხედვა, მოთხოვნები და მხარდამჭერი ტექნოლოგიები. მათ განეკუთვნება: Hexa-X – ევროპული ფლაგმანი პროექტი ადამიანთა, ფიზიკური და ციფრული სამყაროების დამაკავშირებელი თამამი ხედვით; RINGS – ამერიკის შეერთებული შტატების პროექტი, რომელიც ფოკუსირებულია ქსელის მდგრადობაზე უსაფრთხოების, ადაპტაციის და/ან ავტონომიური ფუნქციონირების მეშვეობით; და ტელეკომუნიკაციის საერთაშორისო კავშირის (ITU) ძალისხმევა 2030 წლისთვის უსადენო ქსელური მოთხოვნების განსასაზღვრად.

ჩვენი წინა, 2021 წელს გამოცემული ნაშრომი (იხ. ლიტერატურა) განსაზღვრავს 6G-ის პოზიციიდან თანამედროვე ხედვას და განიხილავს მასთან დაკავშირებულ ისეთ საკვანძო კვლევით მიმართულებებს, როგორებიცაა: გამოყენების შემთხვევები და ტექნოლოგიები, საკომუნიკაციო ლინკის ბიუჯეტის ანალიზი, სტანდარტიზაციის პირველი ცდები სუბტერაპერცული სიხშირული დიაპაზონისათვის, გამჭოლი სრული სტეკის ქსელების დანერგვის პერსპექტივები, არხის შესახებ ინფორმაციით შეზღუდული ულტრადაბალი შეყვანების, მცირე ენერჯის და მასიური სისტემების კონსტრუირება, ბლოკჩეინით მხარდაჭერილი პლატფორმის გამოყენება, საკომუნიკაციო ქსელის დეცენტრალიზებული მართვისა და ხელოვნურ ინტელექტზე დაფუძნებული ქსელებისა და სისტემების მართვის მეთოდები. წინამდებარე წიგნი, რომელიც ასევე მიმოხილვითი ხასიათისაა, აგრძელებს 6G-ის თემატიკასთან დაკავში-

რებული კვლევის შედეგების წარმოდგენას, რაც გაკეთებულია უახლეს პუბლიკაციებსა და სამეცნიერო მიღწევებზე დაყრდნობით. ამასთან, ეს წიგნი განსხვავდება 6G-სადმი მიძღვნილი ჩვენი წინა წიგნისგან და ავსებს მას. საქმე ისაა, რომ ბოლო პერიოდში ძალიან ბევრი საინტერესო და სერიოზული საჭურნალო პუბლიკაცია გახდა ხელმისაწვდომი. გადავწყვიტეთ, შეგვეკრიბა ჩვენი აზრით საუკეთესო ნაშრომები, გაგვეერთიანებინა ისინი, მოგვეხდინა ამ ნაშრომების სისტემატიზაცია, ქართულ ენაზე წარმოგვედგინა მათში მოყვანილი ძირითადი შედეგები და დაგვეწერა ეს წიგნი.

რაც შეეხება წიგნის შინაარსსა და მასში განხილულ თემებს, უპირველეს ყოვლისა, აღვნიშნავთ, რომ უდავოდ, 5G-ის ექნება გარდამქმნელი გავლენა ჩვენს ცხოვრებასა და ურთიერთკავშირზე, მაგრამ ის ჯერ კიდევ შორს არის ყველაფრის ინტერნეტის (IoE) მხარდაჭერისგან, სადაც 1 მილიონზე მეტ მოწყობილობას, განთავსებულს კუბურ კილომეტრზე (როგორც ხმელეთზე, ასევე საჰაერო სივრცეში), დასჭირდება ყველაფრის ერთმანეთთან კომუნიკაცია, ამასთან საიმედო და დაბალი შეყოვნების კავშირით. შესაბამისად, წიგნის პირველი თავი განიხილავს ზოგიერთ ფუნდამენტურ პრობლემას, რომელიც ეხება ფიზიკური ფენის უზრუნველყოფის ძირითად საშუალებებს 6G-სთვის. ეს მოიცავს ისეთ გამოწვევებს, რომლებიც დაკავშირებულია ინტელექტუალურ ამრეკლავ ზედაპირებთან, უფიჭო (ანუ ფიჭების გარეშე ფუნქციონირებად) მასიურ მრავალშესასვლელიან და მრავალგამოსასვლელიან (MIMO) სისტემებთან და ტერაჰერცულ (ტჰც) კომუნიკაციებთან. წარმოდგენილი ანალიზი, სხვა საკითხებთან ერთად, მოიცავს თეორიული მოდელირების გამოწვევებს, ტექნოლოგიების დანერგვასთან და მასშტაბურობასთან დაკავშირებულ საკითხებს. პირველი თავი უსადენო კომუნიკაციების ახალ ეპოქაში სიგნალის დამუშავების კრიტიკული როლის აღწერით მთავრდება.

რეკონფიგურირებადი ინტელექტუალური ზედაპირები (RIS) ან სხვა სახელწოდებით, ინტელექტუალური ამრეკლავი ზედაპირები (IRS) გა-

ნიხილება, როგორც ერთ-ერთი ყველაზე პერსპექტიული და რეგულაციური ტექნიკა უსადენო საკომუნიკაციო სისტემების სპექტრული და/ან ენერგოეფექტიანობის გასაუმჯობესებლად. ამ მოწყობილობებს შეუძლიათ უსადენო გავრცელების გარემოს რეკონფიგურაცია დიდი რაოდენობით იაფფასიანი პასიური ამრეკლავი ელემენტების ფაზური წანაცვლების ფრთხილად რეგულირებით. შესაბამისად მეორე თავის მიზანია ვუპასუხოთ ოთხ ფუნდამენტურ კითხვას: 1) რატომ გვჭირდება RIS? 2) რა არის RIS? 3) რა არის RIS-ის აპლიკაციები? 4) რა არის შესაბამისი გამოწვევები და მომავალი კვლევის მიმართულებები? საპასუხოდ, მეორე თავში დეტალურადაა განხილული რვა პერსპექტიული კვლევითი მიმართულება და მათი კავშირი 6G-სთან.

2030 წლისთვის და შემდგომ პერიოდში, 6G-ის მახასიათებლების ძირითადი მაჩვენებლები იქნება ტერაბიტი წაშში გადაცემის სიჩქარე, მილიწამის ერთი მეათედი შეყოვნება ნულოვანი ჯიტერით, მილიმეტრიანი სიზუსტით ზონდირება და პოზიციონირება და უწყვეტი კავშირი. ამ მოთხოვნების დასაკმაყოფილებლად, ჰორიზონტზე ჩნდება ტერაჰერცული (0.1 – 10 ტჰც) სიხშირული დიაპაზონი ულტრაფართო სიხშირის გატარების ზოლით და სუბმილიმეტრიანი ტალღის სიგრძით, რაც, თავის მხრივ, განიცდის შეზღუდვებს კომუნიკაციის მანძილის და ენერჯის მოხმარების კუთხით. მესამე თავში წარმოდგენილია ოთხი ინტერდისციპლინური მიმართულება ზემოთ ჩამოთვლილი გამოწვევების გადასაჭრელად და ტერაჰერცული კომუნიკაციების სრული პოტენციალის გამოსავლენად. კერძოდ, ინტეგრირებული ზონდირება და კომუნიკაცია, ულტრამასიური MIMO (UM-MIMO) და სხვივანი დინამიკური ჰიბრიდული ფორმირება, ინტელექტუალური ზედაპირები და მანქანური/ღრმა სწავლება. გარდა ამისა, მესამე თავში განხილულია ღია პრობლემები და შესაბამისი გადაწყვეტილებების ინტეგრაცია. ხარისხობრივი და რაოდენობრივი კვლევები აჩვენებს შემოთავაზებული გადაწყვეტილებების სარგებელსა და ეფექტიანობას.

ახალი, მომლოდინე, ტრანსფორმაციული გამოყენების შემთხვევების სიმრავლის მხარდასაჭერად, 6G სისტემებს უნდა შეეძლოს უზრუნველყონ არა მხოლოდ მაღალი გამტარუნარიანობის, არამედ ძალიან ბევრი მოწყობილობის მასობრივი დაკავშირება. ამ მიმართულებით, 6G სისტემებს დასჭირდებათ უსადენო არხის არსებული სივრცითი, სიხშირული და დროითი რესურსების სრულად გამოყენება. წრფივიდან არაწრფივ დამუშავებაზე გადასვლას აქვს პოტენციური არსებითად გააუმჯობესოს ასეთი 6G სისტემების შესაძლებლობები. თუმცა, ტრადიციული არაწრფივი დამუშავების სირთულე და შეყოვნების მოთხოვნები საგრძნობლად იზრდება, როდესაც დასამუშავებელია ერთდროულად გადაცემული ინფორმაციის დიდი რაოდენობა. მეოთხე თავი განიხილავს იმას, თუ როგორ შეგვიძლია არაწრფივი დამუშავების ეფექტიანი მასობრივი პარალელიზებით, შევქმნათ პრაქტიკული 6G სისტემები, რომლებსაც უკვე არსებულ სისტემებთან შედარებით, მნიშვნელოვნად გაუმჯობესებული შესაძლებლობები ექნებათ; ნაჩვენებია ამის მაგალითები და განიხილება შემდგომი კვლევითი გამოწვევები მომავალი მასობრივად პარალელური, არაწრფივი დამუშავების სრული პოტენციალის გასახსნელად. გარდა ამისა, ასევე განიხილება, თუ რამდენად შეუძლია მასობრივად პარალელურ, არაწრფივ დამუშავებას განსაზღვროს, თუ როგორ უნდა შემუშავდეს სამომავლო ფიზიკური ფენების არქიტექტურა.

ფიჭური საკომუნიკაციო სისტემების ყოველი თაობა გამოირჩევა თავისი დროის განმსაზღვრელი ტექნოლოგიით, როგორცაა ორთოგონალური სიხშირული დაყოფა მულტიპლიქსირებით (OFDM) 4G-სთვის ან მასიური MIMO (mMIMO) 5G-სთვის. ვინაიდან ხელოვნური ინტელექტი ჩვენი დროის განმსაზღვრელი ტექნოლოგიაა, ბუნებრივად ჩნდება კითხვა: რა როლი შეიძლება შეასრულოს მან 6G-სთვის? მიუხედავად იმისა, რომ ცხადია, 6G უნდა აკმაყოფილებდეს ხელოვნური ინტელექტის (AI), ანუ განაწილებული სწავლების დიდი სისტემების საჭიროებებს, ჯერ კიდევ არაა გარკვეული, ითამაშებს თუ არა AI განმსაზღვრელ როლს თავის

ვად 6G-ის დიზაინში. მეხუთე თავის მიზანია ხელოვნურ ინტელექტზე დაფუძნებული ახალი 6G რადიოინტერფეისის წარმოდგენა, რომელიც გარკვეულწილად შექმნილია ხელოვნური ინტელექტის გამოყენებით და ეს საშუალებას იძლევა უზრუნველყოფილ იქნას საკომუნიკაციო სექტორის ოპტიმიზება ნებისმიერი აპარატურის, რადიოგარემოსა და გამოყენებისთვის.

უპილოტო საფრენი აპარატების (UAV) ფართომასშტაბიანი და მუდმივად მზარდი გამოყენება აპლიკაციების ფართო სპექტრში გახდება 6G უსადენო ქსელების ძირითადი ნაწილი მომდევნო ათწლეულში. UAV-ების ასეთი მასობრივი განთავსების ეფექტიანი მხარდაჭერა მოითხოვს საიმედო, უსაფრთხო და ეკონომიური უსადენო კავშირის შემოთავაზებას. ფიჭური ქსელები მნიშვნელოვან როლს ასრულებენ UAV-ების მომსახურებაში, რომლებიც მოქმედებენ როგორც მფრინავი სამომხმარებლო მოწყობილობები. მიუხედავად იმისა, რომ ფიჭური ქსელები უზრუნველყოფენ UAV-ების დაკავშირების პერსპექტიულ გადაწყვეტილებებს, მათი საიმედო მუშაობა რამდენიმე გამოწვევის წინაშე დგას. შესაბამისად, მეექვსე თავში წარმოდგენილია ძირითადი ბარიერების მიმოხილვა და კონსტრუირებასთან დაკავშირებული მოსაზრებები უპილოტო საფრენი აპარატების ფართო კომერციული გამოყენების შესახებ, მათ პოტენციურ გადაწყვეტებთან ერთად. გარდა ამისა, ამ თავში ჩვენ განვიხილავთ თუ როგორ შეუძლიათ ფიჭურ ქსელებს UAV-ების მხარდაჭერა მათი მოწინავე ფუნქციების, ქსელური ინტელექტის, 6G-ის გაუმჯობესებული ტექნოლოგიების და მანქანური სწავლების ახალი ინსტრუმენტების გამოყენებით. დაბოლოს, ჩვენ განვიხილავთ უსადენო სერვისების შეთავაზებას მაღალ სიმაღლეებზე და ტერესტრიალური (სახმელეთო) ქსელების ინტეგრაციას არატერესტრიალურ ქსელებთან 6G-ში ულიმიტო კომუნიკაციების შექმნის მიზნით.

კოსმოსური ინტერნეტ-სერვისების შეთავაზება დედამიწის დაბალი ორბიტის (LEO) თანამგზავრების მეგათანავარსკვლავედებით, წარმოა-

დგენს პერსპექტიულ მიდგომას დღემდე დაუკავშირებელი ობიექტების დასაკავშირებლად. მას შეუძლია შეავსოს სახმელეთო ქსელების დაფარვა, რათა „ციფრული უთანასწორობის“ პრობლემის გადაჭრას შეუწყოს ხელი. თუმცა, არსებობს გამოწვევები საექსპლუატაციო დაბრკოლებებიდან ტექნიკურ დაბრკოლებებამდე, რომლებიც LEO თანამგზავრული წვდომის განვითარების გზაზე ხელის შემშლელი არიან. მეშვიდე თავი გვთავაზობს მიმოხილვას LEO თანამგზავრული წვდომის ტექნიკის დღევანდელი მდგომარეობის შესახებ, მათ შორის LEO თანამგზავრულ კვლავედების ევოლუციას და შესაძლებლობებს, კრიტიკულ ტექნიკურ გამოწვევებს და გადაწყვეტილებებს, LEO თანამგზავრული კავშირის სტანდარტიზაციის ასპექტებს 5G ევოლუციიდან 6G-მდე და ბიზნესმოსაზრებებს. ჩვენ ასევე წარმოვადგენთ რამდენიმე სფეროს სამომავლო კვლევებისთვის, რათა განვახორციელოთ LEO თანამგზავრული წვდომის მჭიდრო ინტეგრაცია ტერესტრიალურ ქსელებთან 6G-ში.

6G უსადენო სისტემები სავარაუდოდ იმუშავენ ისეთ მასშტაბებში და გარემოში, სადაც, სამწუხაროდ, უსადენო სერვისებმა სრულყოფილად დღემდე ვერ შეაღწია. ყველა ასეთი გარემო არ არის შესაფერისი მონაცემთა მატარებელი ტალღების ეფექტიანი გავრცელებისთვის. მოლეკულურ სიგნალებს აქვთ ინფორმაციის მიწოდების პოტენციალი, როგორც ახალი, ქიმიურ კოდირებაზე დაფუძნებული მოდულაცია-კოდირების მექანიზმების გამოყენებით, ასევე ახალი მრავალმასშტაბიანი გავრცელების ფიზიკის საშუალებით. მიუხედავად იმისა, რომ ბიოფიზიკური მოდელებისა და კომუნიკაციის თეორიის შერწყმამ სწრაფად დააწინაურა მოლეკულური კომუნიკაციის სფერო, რეალურ სამყაროში ჯერჯერობით მაკრომასშტაბიანი აპლიკაციების ნაკლებობაა. აქ ჩვენ წარმოვადგენთ გამოყენების სფეროებს თავდაცვისა და უსაფრთხოების მიმართულებით, დაწყებული წყალქვეშა სამაშველო ძეზნის ოპერაციებიდან, დამთავრებული ფარული კომუნიკაციებით. ასევე აღსანიშნავია კიბერ-ფიზიკური სისტემები, როგორცაა მოლეკულური სიგნალების გამოყენება ჯანმრ-

თელობის მონიტორინგისთვის და მიწისქვეშა ქსელებში. ეს საინჟინრო გამოყენებები არა მხოლოდ ითხოვს უსადენო კომუნიკაციის ახალ ტექნოლოგიებს, დაწყებული დნმ-ის კოდირებიდან დამთავრებული მოლეკულურ გრაფზე სიგნალის დამუშავებამდე, არამედ აჩვენებს მოლეკულური კომუნიკაციის პოტენციალს, რათა წვლილი შეიტანოს ტრადიციულ, მაგრამ რთულ საინჟინრო სფეროებში. აღნიშნულიდან გამომდინარე, როგორც მერვე თავშია ნაჩვენები, მოლეკულური კომუნიკაცია შეიძლება იყოს ახალი ფიზიკური ფენა 6G-სთვის, რომელიც უზრუნველყოფს წვდომას და მონაცემების ამოღებას ექსტრემალური, არატალღოვანი (ანუ ტალღების არშემცველი) გარემოდან.

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

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.

თავი 1. ფიზიკური ფენის ათი გამოწვევა კომუნიკაციების ინჟინრებისთვის

1.1. შესავალი

თითქმის ათწლიანი ინტენსიური აკადემიური კვლევისა და 5G-ის მრავალმხრივი სამრეწველო ტესტირების შემდეგ, გაკეთდა შემდეგი დასკვნები: (ა) 5G-ის ნამდვილად შეუძლია მონაცემთა უზარმაზარი რაოდენობის შემცველი აპლიკაციების მხარდაჭერა (მაგალითად, ულტრა-სწრაფი ფართოზოლოვანი, მაღალი გარჩევადობის ვიდეონაკადის გადაცემა), ძირითადად ისეთ ტექნიკურ სფეროში მიღებული მიღწევების მეშვეობით, როგორცაა mMIMO სისტემები; (ბ) 5G-ის ჯერ კიდევ არ აქვს შესაძლებლობა განახორციელოს IoE-ს მხარდაჭერა, სადაც უამრავი მოწყობილობა გეოგრაფიულ კუბში საჭიროებს დაბალი შეყოვნების ულტრასაიმედო კავშირს ან უსადენო გიგაბიტი წამში სიჩქარიან ინტერნეტწვდომას მილიმეტრული ტალღების (მმტ) და ტკვ სიხშირული სპექტრის მეშვეობით. ახალ ათწლეულში, 6G-ის იდეამ უკვე დაიწყო გავრცელება უსადენო კომუნიკაციების საზოგადოებაში და ყველა თანხმდება, რომ 6G შეეცდება აღმოფხვრას 5G-ის ხარვეზები შემდეგი სამი სამეცნიერო საყრდენი მიმართულების მეშვეობით:

1. კომუნიკაციების გადაყვანა უფრო მაღალ სიხშირულ დიაპაზონებზე (ზედა მმტ და ტკვ);
2. ჭკვიანი რადიოგარემოს შექმნა რეკონფიგურირებადი ზედაპირებით;
3. ჩვეულებრივი ფიქური სტრუქტურების მოცილება, ე.ი. ფიჭები-საგან თავისუფალი (უფიჭო) mMIMO-ს გამოყენება.

თუმცა, ამ თეორიული აკადემიური ცნებების კომერციულად სიცოცხლისუნარიან გადაწყვეტილებებად გარდაქმნა ძალიან რთული ამოცანაა. შესაბამისად, ეს თავი განიხილავს შემდეგ საკითხებს:

- შესწავლილია ზემოაღნიშნული სამი სამეცნიერო საყრდენი მიმართულების რეალიზებადი პოტენციალი;

- წარმოდგენილია ათი უმუშალო საინჟინრო გამოწვევა, რომელიც უნდა გადაიჭრას ფიზიკურ ფენაში და რამაც უნდა მოახდინოს შემდგომი კვლევების აქტივაცია 6G ეკოსისტემაში;
- დაბოლოს, გამოხატულია სიგნალების დამუშავების (SP) ფუნდამენტური და კრიტიკული როლი 6G ეპოქაში დაკავშირებულ გამოწვევებთან ერთად. ამ თავის ძირითადი ამოცანაა შესაძლებლობების გახსნა ელექტრომაგნიტური თეორიის, კომუნიკაციის თეორიისა და ტრანსივერების (გადამცემ-მიმღებების) კონსტრუირების კუთხით.

1.2. ინტელექტუალური ამრეკლავი ზედაპირები

საანტენო არქიტექტურა უსადენო საკომუნიკაციო სისტემაში შეიძლება ჩაითვალოს, როგორც მთავარი გარე ინტერფეისის კომპონენტი და ის გახდება 6G ქსელების უმთავრესი ფიზიკური ტექნოლოგია. ფიზიკური ფენის რეალიზაციისას 6G ტექნოლოგიის მხარდაჭერის გასაადვილებლად, ანტენის სტრუქტურის პროექტირების პროცესში გამოწვევების შესწავლა გადამწყვეტია მომავალი თაობის საკომუნიკაციო ქსელების ჭეშმარიტი პოტენციალის შესაფასებლად. აღნიშნულის გათვალისწინებით, ეს პარაგრაფი მიზნად ისახავს ავხსნათ IRS-ების პროექტირების ზოგიერთი ძირითადი გამოწვევა და ვაჩვენოთ, რომ ასეთი აპერტურების გამოსხივების მახასიათებლები არსებითად იცვლება ამ გამოწვევების მხედველობაში მიღების შედეგად.

ამრეკლავი ზედაპირი ეს არის ბრტყელი აპერტურა, რომელიც სინთეზირებულია ტალღის ქვესიგრძის ელემენტების (ანუ ერთეულოვანი უჯრედების) მესრის გამოყენებით. ტალღის ქვესიგრძის შესაბამისი ერთეულოვანი უჯრედის დისკრეტიზაციის გამო, ამრეკლავი ზედაპირები შეიძლება ჩაითვალოს მეტაზედაპირების ცალკეულ ფორმად. დიდი რაოდენობით კვლევა ჩატარდა ელექტრომაგნიტური ტალღის მართვის კუთხით და მეტაზედაპირული აპერტურების გამოყენებით,

სხვადასხვა აპლიკაციებისთვის, ხილული ელექტრომაგნიტური ტალღიდან (ხილული სინათლის სპექტრი) უხილავამდე. იმისდა მიუხედავად, რომ ეს სტრუქტურები კარგად არის შესწავლილი ელექტრომაგნიტური ტალღების გამოყენებების საზოგადოებაში, მათი მისადაგება უსადენო საკომუნიკაციო ქსელებისადმი დღემდე არ არის საკმარისად გამოკვლეული.

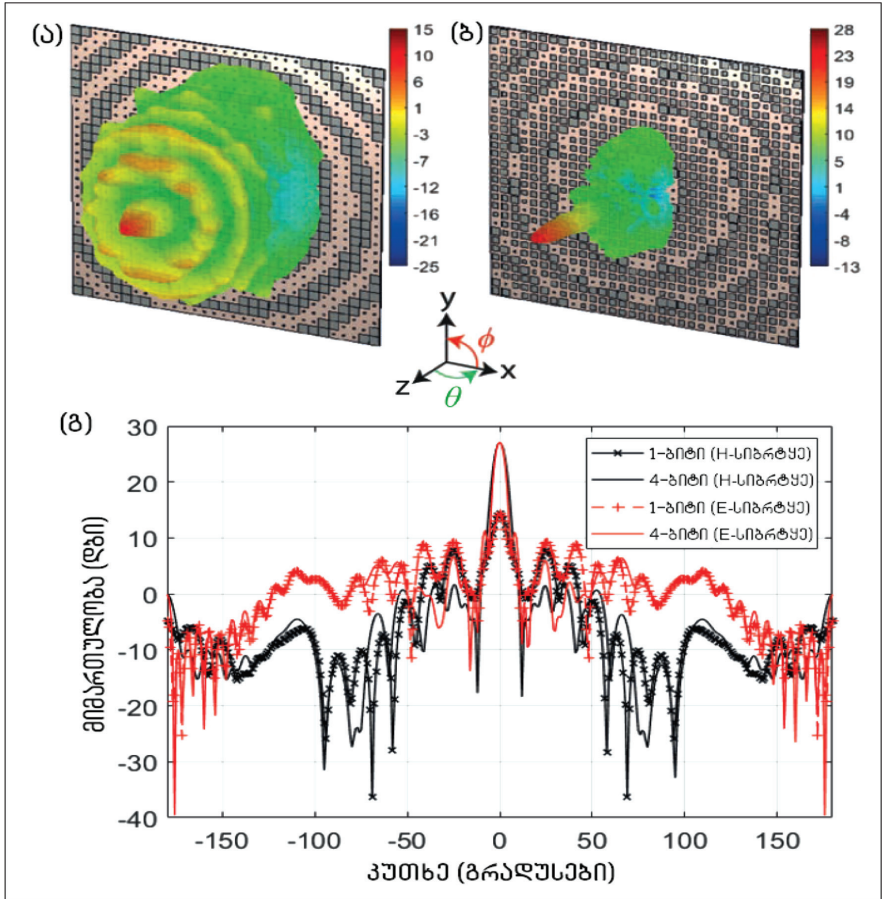
უსადენო სისტემები საკომუნიკაციო კავშირის დასამყარებლად, ჩვეულებრივ ეყრდნობა კარგად შესწავლილ საანტენო ტექნოლოგიას, რომელიც ცნობილია როგორც ფაზირებული მესრები. ფაზირებული მესერი შედგება ინდივიდუალური ანტენებისგან, გამოყოფილი ფაზამაბრუნის სქემებით და სიმძლავრის გამაძლიერებლებით, სასურველი აპერტურის ტალღის ფრონტის სინთეზირებისთვის. ფაზური მესრები შეიძლება იყოს ენერგოტევადი და ჰქონდეს საკმაოდ რთული ტექნოლოგიური არქიტექტურა. ფაზირებული მესრის ტექნოლოგიისგან განსხვავებით, მეტაზედაპირები იყენებს ჰოლოგრაფიულ პრინციპს სასურველი ფაზური მოდულაციის მისაღწევად. შემომავალი ტალღა, რომელიც ანათებს აპერტურის ზედაპირს, მოქმედებს როგორც საყრდენი ტალღა, რომელიც გარდაიქმნება სასურველ ტალღად ამრეკლავი მეტაზედაპირის აპერტურიდან ასახვისას. ჰოლოგრამული მეტაზედაპირების მთავარი უპირატესობა ის არის, რომ მათ შეუძლიათ ნებისმიერი ფორმის ტალღის სინთეზირება ამ მარტივი, მაგრამ მძლავრი ჰოლოგრაფიული პრინციპის გამოყენებით, ძვირად ღირებული და ენერგოტევადი ფაზამაბრუნებლების საჭიროების გარეშე. უსადენო სისტემებისთვის IRS-ის დაპროექტება მოიცავს ორ მთავარ გამოწვევას. გამოწვევა 1-ში, რომელიც სცილდება აპერტურის დონის ჩვეულებრივ განხილვას, ჩვენ განვიხილავთ IRS-ის პროექტირების გამოწვევებს მათი სამშენებლო ბლოკების (ანუ ერთეულოვანი უჯრედების) შესწავლით და ერთეულოვანი უჯრედის დონეზე აბერაციის ეფექტის ზემოქმედებას IRS-ის მთლიან მუშაობაზე. გამოწვევა 1-ის პირობების დაკმაყოფილებით, გამოწვევა 2-ში, ჩვენ განვიხილავთ

დინამიკური რეკონფიგურაციის ასპექტს, «ინტელექტუალური» ოპერაციის აუცილებლობას და შევისწავლით შესაძლო მეთოდებს ერთეულოვანი უჯრედების ფაზური მახასიათებლის დინამიკურად რეკონფიგურაციისთვის.

გამოწვევა 1: ერთეულოვანი უჯრედის ფაზის დიაპაზონი და ფაზის დაქვანტვის დონეები

ამრეკლავი ზედაპირის კონსტრუირების პროცესში მნიშვნელოვანი შეზღუდვაა იმ ერთეულოვანი უჯრედების ფაზების მიღწევადი დიაპაზონი, რომლებიც ახდენენ აპერტურის სინთეზირებას. იდეალურ შემთხვევაში, თითოეული ერთეულოვანი უჯრედი, რომლებიც განლაგებულია ამრეკლავ ზედაპირზე, უნდა უზრუნველყოფდეს ფაზის სრულ კონტროლს $0-2\pi$ რადიანის ფაზის დიაპაზონში. ამრეკლავი ზედაპირის პროექტირების პროცესში კიდევ ერთი მნიშვნელოვანი შეზღუდვაა ერთეულოვანი უჯრედების ფაზური დიაპაზონის დაქვანტვა. მაშინაც კი, თუ მიიღწევა სრული ფაზური $0-2\pi$ რადიანის ტოლი დიაპაზონი, ამ ფაზური დიაპაზონის დისკრეტიზაციისთვის გამოყენებული დაქვანტვის დონეების რაოდენობა პირდაპირ გავლენას ახდენს სინთეზირებული ტალღის ფრონტის სიზუსტეზე ამრეკლავი ზედაპირიდან არეკვლისას. ამ კონსტრუქციული შეზღუდვების ეფექტის გამოსაკვლევად, ჩვენ განვიხილავთ ამრეკლავ მეტაზედაპირს და ინდივიდუალურად შევისწავლით ამ შემთხვევებს. ჩვენ ვვარაუდობთ, რომ ერთეულოვანი უჯრედებს შეუძლიათ შეცვალონ შემომავალი საყრდენი ტალღის ფაზური მახასიათებელი სრულ ფაზურ დიაპაზონში, რაც შეადგენს $0-2\pi$ რადიანს. თანამედროვე ლიტერატურაში, მოიძებნება მრავალი მაგალითი ერთეულოვანი უჯრედების ტოპოლოგიებისთვის, რომლებსაც შეუძლიათ მიაღწიონ ფაზურ წანაცვლებებს 2π რადიანამდე და გამოყენებული მიდგომები ახლა უკვე შედარებით კარგადაა შესწავლილი. ამ სცენარისთვის, ნახ. 1.1-ზე, ჩვენ ვიკვლევთ დაქვანტვის ორ განსხვავებულ დონეს, 1-ბიტანს და 4-ბიტანს. ჩვენ ვთვლით, რომ ამრეკლავი მეტაზედაპირი განათებულია ნებისმიერად შერჩეული

ბრტყელი ტალღით, რომელიც ეცემა ზედაპირის ოპტიკური ღერძის (z-ღერძის) გასწვრივ. მიზნობრივი ფუნქცია განისაზღვრება, როგორც ტალღის ფრონტი, რომელიც გამოსხივდება საანტენო სიბრტყის პერპენდიკულარული მიმართულებით ($\theta = 0^\circ$, $\psi = 0^\circ$) ზედაპირიდან არეკვლის პროცესში.



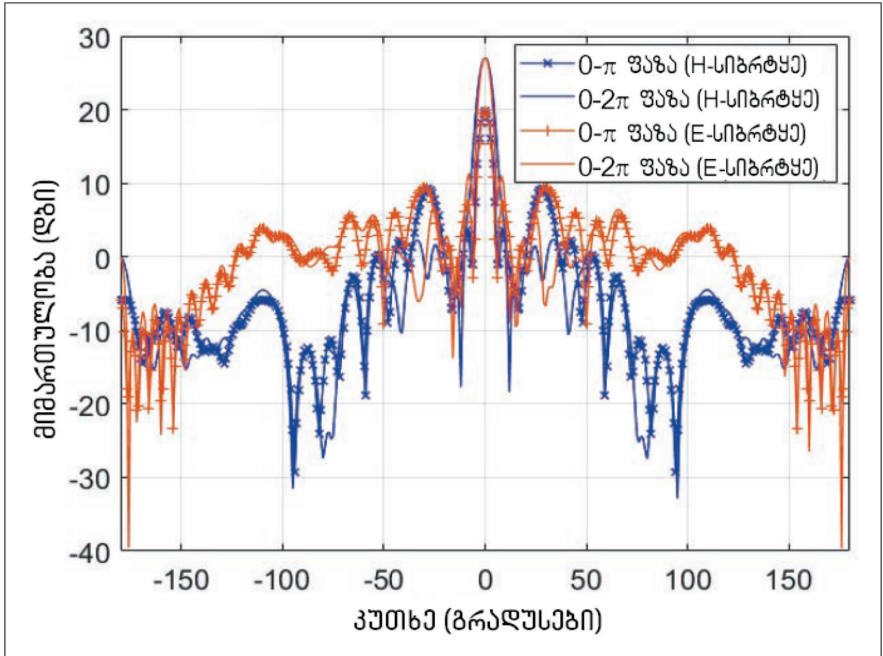
ნახ. 1.1. ამრეკლავი ზედაპირის სამგანზომილებიანი (3D) გამოსხივების მიმართულობის დიაგრამის დამოკიდებულება ფაზის დაქვანტვის დონეზე: (ა) ერთეულოვანი უჯრედის 1-ბიტიანი ფაზური დაქვანტვა; (ბ) ერთეულოვანი უჯრედის 4-ბიტიანი ფაზური დაქვანტვა; (გ) მიმართულობის დიაგრამების შედარება აზიმუტის სიბრტყის (H-სიბრტყე) და ამაღლების სიბრტყის (E-სიბრტყის) გასწვრივ. ვერის მასშტაბი მოცემულია დეციბელებში

ნახ. 1.1-ზე H-სიბრტყე არის აზიმუტის სიბრტყე (ან xz -სიბრტყე), სადაც $\psi = 0^\circ$. ანალოგიურად, E-სიბრტყე არის ამადლეების სიბრტყე (ან yz -სიბრტყე), სადაც $\psi = 90^\circ$. მიუხედავად იმისა, რომ კონსტრუირების თვალსაზრისით, 1-ბიტანი დაქვანტვის დონის გამოყენება საკმაოდ მარტივია 4-ბიტანი დაქვანტვის შემთხვევასთან შედარებით, გამოსხივების მიმართულობის დიაგრამას აქვს არსებითად უფრო მაღალი გვერდითი წილები (8 დეციბელით (დბ) უფრო მაღალი) და ნაკლები მიმართულობა (13 დბ-ით უფრო დაბალი პერპენდიკულარული მიმართულებით).

გვერდითი წილების გაზრდა მნიშვნელოვანი პრობლემაა უსადენო საკომუნიკაციო ქსელებისთვის, სხვა არხებზე ძლიერი ინტერფერენციების წარმოქმნის შესაძლებლობის გამო. ანალოგიურად, შემცირებული მიმართულობა უარყოფითად მოქმედებს ლინკის ბიუჯეტზე. შედეგად, ნახ. 1.1-დან აშკარაა, რომ არსებობს პირდაპირი კავშირი ფაზის დაქვანტვის დონესა და ამრეკლავი ზედაპირის მიმართულობის დიაგრამის სიზუსტეს შორის. ეს მნიშვნელოვანი შედეგია, რადგან თუ 1-ბიტანი დაქვანტვის დონის მიღწევა შესაძლებელია მარტივი ჩართვის/გამორთვის ტიპის ორობითი მოდულაციის მექანიზმის გამოყენებით, ფაზის დაქვანტვის მასზე მეტი დონეები, როგორცაა 4-ბიტანი სცენარი, მოითხოვს უფრო დახვეწილ ტექნიკას, რათა მოახდინოს ერთეულოვანი უჯრედების ფაზური მახასიათებლის მოდულაცია, როგორცაა ფაზური მოდულაცია ნაცრისფერი ჩრდილებით. ამან შეიძლება არსებითად გაზარდოს ერთეულოვანი უჯრედის კონსტრუირების სირთულე; აქედან გამომდინარე, საჭიროა შესაბამისი კომპრომისის საგულდაგულო შესწავლა რათა 6G ქსელებისთვის მიღწეული იქნას სასურველი აპარატურული სირთულე და ასეთი აპერტურებიდან გასხივების მისაღები მაჩვენებელი. ჩვენ ახლა განვიხილავთ ერთეულოვანი უჯრედის ფაზის მიღწევადი დიაპაზონის ეფექტს ამრეკლავი ზედაპირის გამოსხივების დიაგრამაზე. ჩვენ ვირჩევთ დაქვანტვის მაქსიმალურ დონეს (4-ბიტანს) და ვიკვლევთ ერთეულოვანი უჯრედის ფაზის ორ დიაპაზონს, $0-\pi$ რადიანს

და $0-2\pi$ რადიანს. ამრეკლავი მესრის ზედაპირის მიმართულობის დიაგრამის დამოკიდებულება ერთეულოვანი უჯრედის მიღწევად ფაზურ დიაპაზონზე, ნაჩვენებია ნახ. 1.2-ზე.

როგორც ნახ. 1.2-დან ჩანს, ერთეულოვანი უჯრედის ფაზის დიაპაზონის $0-\pi$ რადიანამდე შეზღუდვა ამცირებს ზედაპირის მიმართულობას 7.3 დბ-ით, ხოლო გვერდითი წილების დონეები იზრდება 7 დბ-ით. ეს მნიშვნელოვანი შედეგია, რადგან $0-\pi$ რადიანის ფაზური დიაპაზონი შეიძლება მიღწეული იყოს ერთი რეზონანსული ელემენტის გამოყენებით, ხოლო ამ ფაზური დიაპაზონის მიღმა ფუნქციონირება, როგორცაა განხილული $0-2\pi$ რადიანის სცენარი, მოითხოვს მრავალი დამოუკიდებელი რეზონანსული ელემენტის კომბინაციას. შედეგად, ფრთხილად უნდა იქნას განხილული ერთეულოვანი უჯრედებიდან მიღწევადი ფაზური დიაპაზონი, რათა 6G ქსელებისთვის ვიპოვოთ ოპტიმალური კომ-



ნახ. 1.2. ამრეკლავი ზედაპირის გამოსხივების მიმართულობის დიაგრამა, როგორც ერთეულოვანი უჯრედის ფაზის დიაპაზონის (რადიანი) ფუნქცია

პრომისი ერთეულოვანი უჯრედის სტრუქტურის სირთულესა და IRS აპერტურებისთვის სასურველ გასხივების მახასიათებლებს შორის. ნახაზებიდან 1.1 და 1.2, აშკარაა, რომ საკომუნიკაციო არხში ლინკის ბიუჯეტის რეალისტური შეფასების და ინტერფერენციების მახასიათებლების უკეთ გასაგებად, მნიშვნელოვანია, რომ გათვალისწინებული იყოს ამრეკლავი ზედაპირების კონსტრუირებასთან დაკავშირებული შეზღუდვები. თუმცა, ხშირად ვარაუდობენ, ამრეკლავი ზედაპირი იდეალურია, რაც გულისხმობს, რომ ლინკის ბიუჯეტის გამოთვლები არ ითვალისწინებს ამ ერთეულოვან უჯრედებზე დაფუძნებულ აბერაციებს.

გამოწვევა 2: დინამიკური რეკონფიგურებადობა და IRS

მიუხედავად იმისა, რომ ჩვეულებრივი ამრეკლავი ზედაპირები აღწევს უაღრესად სასურველ გასხივების მახასიათებლებს, ისინი სტატიკურია; შესაბამისად, კონსტრუირების პროცესში სხივის მახასიათებლები ხისტი ფორმით კოდირებულია ზედაპირზე. სტატიკური მეტაზედაპირებისგან განსხვავებით, IRS-ს აქვს შესაძლებლობა დინამიკურად დაარეგულიროს აპერტურის ამრეკლავი მახასიათებელი სრულიად ელექტრონული გზით. ეს განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია, რადგან საკომუნიკაციო გარემოს აქვს დინამიკური მახასიათებლები, კერძოდ, დაკავშირებული მომხმარებლების რაოდენობის ცვალებადობა და მდებარეობის არასტატიკური განაწილება დროის მიხედვით. ამრიგად, არეკლილი ტალღის ფრონტის მახასიათებლების ინტელექტუალურად შეცვლის შესაძლებლობა, მათი დინამიკური მეტრიკების დასაკმაყოფილებლად, გადამწყვეტ როლს თამაშობს მომავალ უსადენო საკომუნიკაციო სისტემებში. IRS-ის დინამიკური მოდულაცია შეიძლება მიღწეული იქნას რამდენიმე მეთოდის დახმარებით, როგორცაა ცვლადი ელექტრული თვისებების მქონე მასალების გამოყენება (მაგალითად, თხევადი კრისტალების) ან ერთეულოვანი უჯრედების დატვირთვა დაბალი სიმძლავრის ნახევარგამტარული ელემენტებით (მაგალითად, PIN დიოდებით და ვარაქტორებით). გამოწვევები 1 და 2 არის ელექტრომაგნიტური ინჟინერიის პრო-

ბლემის პირდაპირი შედეგი. მიუხედავად იმისა, რომ ორივე გამოწვევის მოგვარება შესაძლებელია საკმაოდ რთული, მრავალშრიანი, რეკონფიგურირებადი ერთეულოვანი უჯრედების არქიტექტურის გამოყენებით, ასეთი ერთეულოვანი უჯრედების ინჟინერია (რომელმაც უნდა უზრუნველყოს დაბალი ფორმა-ფაქტორი, დანაკარგი, ღირებულება, სისტემური სირთულე და ენერჯის მოხმარება), იმის წინაპირობაა, რომ ეს ტექნოლოგია იქნება შესაძლებელი ვარიანტი მომავალ 6G ქსელებში გამოსაყენებლად.

1.3. უფიჭო mMIMO

უფიჭო mMIMO შემოთავაზებული იყო ფიჭური ქსელების სასაზღვრო ეფექტის დასაძლევად. უფიჭო mMIMO-ში, გეოგრაფიულ დაფარვის ზონაში განაწილებული მრავალი წვდომის წერტილი (AP) კოჰერენტულად ემსახურება ბევრ მომხმარებელს ერთი და იმავე დროითი-სიხშირული რესურსების გამოყენებით. აქ არ არსებობს ფიჭები და შესაბამისად, არ არსებობს სასაზღვრო ეფექტები. უფიჭო mMIMO-ს ძირითადი თვისებებია:

- უფიჭო mMIMO ეყრდნობა ჩვეულებრივ mMIMO ტექნოლოგიას. უფრო ზუსტად, მრავალი AP-ის გამოყენებით, უფიჭო mMIMO გთავაზობს თავისუფლების უფრო მაღალ ხარისხს, მულტიპლექსირების მაღალ მოგებას და საანტენო მესრის გაძლიერების მაღალ კოეფიციენტს. შედეგად, მას შეუძლია უზრუნველყოს უზარმაზარი ენერგოეფექტიანობა და სპექტრული ეფექტიანობა შედარებით მარტივი SP-ის მეშვეობით;
- უფიჭო mMIMO-ში მომსახურე AP-ები ნაწილდება მთელ ქსელში და შესაბამისად, ჩვენ შეგვიძლია მივიღოთ მაკრო-მიმორიგების მოგება. ამრიგად, უფიჭო mMIMO-ს შეუძლია უზრუნველყოს ძალიან კარგი ქსელური კავშირი, სადაც არ არსებობს მკვდარი ზონა. ნახაზები 1.3ა და 1.3ბ გვიჩვენებს ქვემოთ მიმართული კავშირის ხაზის (დაუნლინკის) მიღწევად სიჩქარეებს, რომლებიც

ნაჩვენებია მასშტაბური ფერებით უფიჭო mMIMO-სთვის და ჩვეულებრივი (კოლოკაციური) mMIMO-სთვის, შესაბამისად. ცხადია, უფიჭო mMIMO-ს შეუძლია უზრუნველყოს ბევრად უფრო ერთგვაროვანი კავშირი ყველა მომხმარებლისთვის;

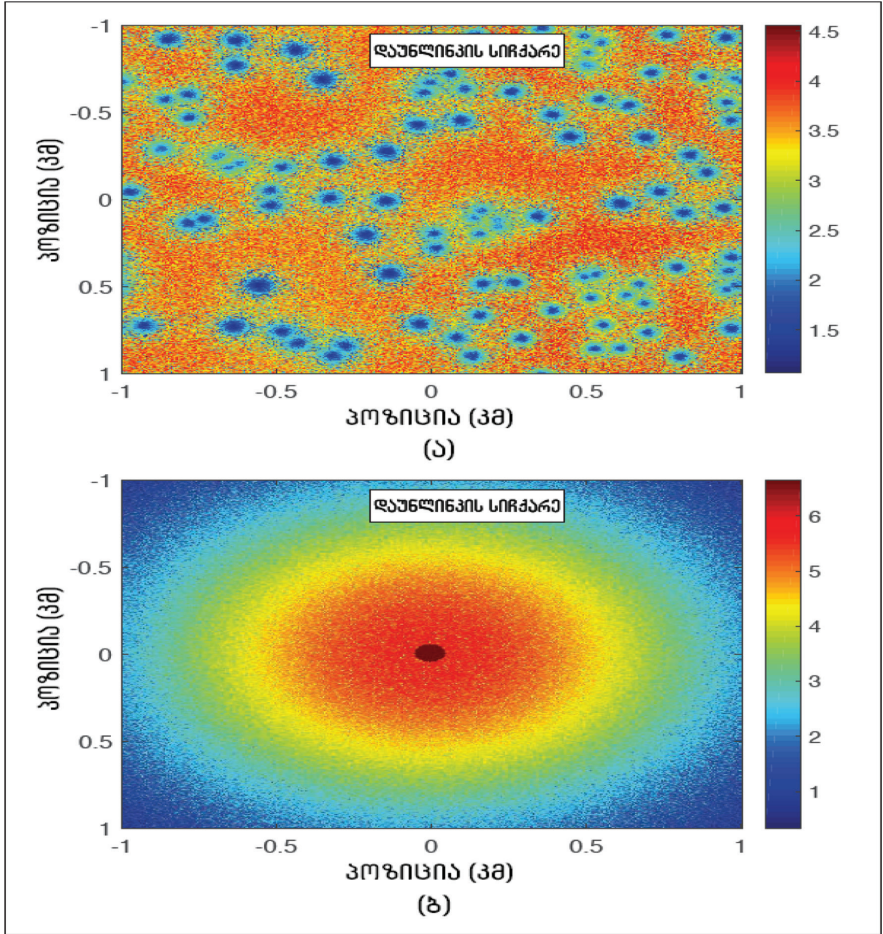
- განსხვავებულად კოლოკაციური mMIMO-სგან, სადაც საბაზო სადგური აღჭურვილია ძალიან დიდი ანტენებით, უფიჭო mMIMO-ში თითოეულ AP-ს აქვს რამდენიმე ანტენა. ამრიგად, უფიჭო mMIMO სავარაუდოდ რეალიზებული იქნება იაფი, ენერჯის შემცირებული მოხმარების მქონე კომპონენტებით და მარტივ SP-ზე დაფუძნებული AP-ებით.

ზემოაღნიშნული უპირატესობები (კერძოდ, ქსელთან დაკავშირების მაღალი სიჩქარე) აკმაყოფილებს მომავალი უსადენო ქსელების ძირითად მოთხოვნებს. მაშასადამე, უფიჭო mMIMO გახდა ერთ-ერთი პერსპექტიული ტექნოლოგია 5G-ის მიღმა და 6G უსადენო ქსელების შექმნის პროცესში და გამოიწვია დიდი კვლევითი ინტერესი. იაფფასიანი და მასშტაბირებადი სისტემის შექმნა არის უფიჭო mMIMO-სთან დაკავშირებული კვლევების საბოლოო მიზანი. ამისათვის ჩვენ გვჭირდება მასშტაბირებადი გადაცემის პროტოკოლები და სიმძლავრის მართვის მეთოდები, რომლებიც განხილულია მე-3 და მე-4 გამოწვევებში. გარდა ამისა, მნიშვნელოვანია გვეჩვენოს ახალი SP დიზაინები, რომლებიც შეიძლება შემუშავდეს განაწილებული გზით, რათა გაუმჯობესდეს სისტემის მუშაობა, მასშტაბურობა და საიმედოობა. ეს განხილულია მე-5 გამოწვევაში.

გამოწვევა 3: *მომხმარებელზე ორიენტირებული პრაქტიკული მიდგომები*

კანონიკურ უფიჭო mMIMO-ში, ყველა AP მონაწილეობს ყველა მომხმარებლის მომსახურებაში ბექჰოლის კავშირების მეშვეობით ერთ ან რამდენიმე ცენტრალურ მმართველ ბლოკთან (CPU). ეს არ არის მასშტაბირებადი იმ გაგებით, რომ არ არის განხორციელებადი, როდესაც ქსელის ზომა (AP-ების რაოდენობა და/ან მომხმარებელთა რაოდენობა)

იზრდება. მასშტაბირებადი სტრუქტურის დაპროექტება არის უფიჭო mMIMO-ს ერთ-ერთი მთავარი გამოწვევა. ლიტერატურაში ნაჩვენებია, რომ გზაში დანაკარგების გამო, AP-ების მთლიანი რაოდენობის მხოლოდ 10-დან 20 პროცენტამდე მონაწილეობს რეალურად მოცემული მომხმარებლის მომსახურებაში. ამრიგად, თითოეულ მომხმარებელს



ნახ. 1.3. კომპიუტერული სიმულაციის გამოყენებით მიღებული დაუნლინკის მაჩვენებლები, მომხმარებელთა სხვადასხვა ლოკაციებისთვის, რომლებიც ნაჩვენებია მასშტაბური ფერებით: (ა) ასი AP შემთხვევითი წესით და თანაბრად არის განლაგებული 2 კმ × 2 კმ ფართობზე; (ბ) ასივე მომსახურე ანტენა განლაგებულია თავდაპირველ ამოსავალ წერტილში (ანუ კვადრატული არეალის ცენტრში)

უნდა მოემსახუროს არა ყველა AP, არამედ AP-ების ქვეჯგუფი. აღნიშნულის განხორციელებისთვის არსებობს ორი გზა: ქსელზე ორიენტირებული და მომხმარებელზე ორიენტირებული მიდგომები. ქსელზე ორიენტირებული მიდგომისას, AP-ები იყოფა გადაუკვეთავ კლასტერებად. AP-ები კლასტერში კოპერენტულად ემსახურებიან მომხმარებლებს მათი ერთობლივი დაფარვის ზონაში. ქსელზე ორიენტირებულ სისტემებს ჯერ კიდევ აქვთ საზღვრები და შესაბამისად, ისინი არ არიან შესაფერისი უფიჭო mMIMO-სთვის. ამის საპირისპიროდ, მომხმარებელზე ორიენტირებული მიდგომით, თითოეულ მომხმარებელს ემსახურება AP-ების შერჩეული ქვეჯგუფი, არ არსებობს საზღვრები და შესაბამისად, მომხმარებელზე ორიენტირებული მიდგომა არის შესაფერისი გზა უფიჭო mMIMO-ს განსახორციელებლად. არსებობს რამდენიმე მარტივი მეთოდი მომხმარებელზე ორიენტირებული მიდგომის განსახორციელებლად. მაგალითად, თითოეული მომხმარებელი ირჩევს მის უახლოეს AP-ებს ან ირჩევს AP-ების ქვეჯგუფს, რომელიც უზრუნველყოფს სასარგებლო სიგნალის მთლიანი მიღებული სიმძლავრის უმეტეს ნაწილს. თუმცა, დღეისთვის არსებული მეთოდები არ არის ოპტიმალური: ისინი მაინც მოითხოვს უზარმაზარ კავშირებს ყველა AP-დან CPU-სთან და ჯერ კიდევ სრულად კონტროლდება ქსელით. გარდა ამისა, თითოეული მომხმარებლის მიერ ჩამოყალიბებული კლასტერი სწრაფად იცვლება მომხმარებლის ადგილმდებარეობის მიხედვით. ეს მოითხოვს უფრო მეტ მმართველ სიგნალს. აქედან გამომდინარე, მომხმარებელზე ორიენტირებული პრაქტიკული მიდგომის შემუშავება რთული სამეცნიერო-კვლევითი ამოცანაა.

გამოწვევა 4: სიმძლავრის მასშტაბირებადი მართვა

სიმძლავრის მართვა არის ცენტრალური ამოცანა უფიჭო mMIMO-ში, რადგან ის აკონტროლებს ახლო და შორეული მოქმედების ეფექტებს და მომხმარებლებს შორის ინტერფერენციებს, რათა მოახდინოს იმ მიზნების ოპტიმიზაცია (მაგალითად, მაქსიმალური-მინიმალური სამართლი-

ანობის ან მთლიანი ენერგოეფექტიანობის), რომლის მიღწევაც გვინდა. იდეალურ შემთხვევაში, სიმძლავრის მართვა ხორციელდება CPU-ზე იმ ვარაუდით, რომ CPU-მ ზუსტად იცის ფართომასშტაბიანი მიყუჩების (ფედინგის) ყველა კოეფიციენტი. შემდეგ სიმძლავრის მართვის ოპტიმალური კოეფიციენტები გაეგზავნება AP-ებს (დაუნლინკის გადაცემისთვის) და მომხმარებლებს (ზემოთ მიმართული კავშირის ხაზის (აპლინკის) გადაცემისთვის). ეს მოითხოვს უზარმაზარ ფრონტჰოლის/ბექჰოლის ოვერჰედს (ზედნადებ სასიგნალო დანახარჯებს). თუმცა, რთულია CPU-ს ჰქონდეს სრულყოფილი ცოდნა ფართომასშტაბიანი მიყუჩების კოეფიციენტების შესახებ, რომლებიც დაკავშირებულია AP-ების და მომხმარებლების პოტენციურად უპრეცედენტო რაოდენობასთან. ამგვარად, გარდა მიმდინარე კანონიკური გადაცემის პროტოკოლის არამასშტაბირებადობისა (განხილულია გამოწვევა 3-ში), ზემოაღნიშნული სიმძლავრის მართვის მეთოდი ასევე ქმნის სხვა პრობლემას, რაც სისტემას ასევე არამასშტაბირებადს ხდის. ამრიგად, სიმძლავრის მართვა უნდა განხორციელდეს განაწილებულ AP-ებზე არხის შესახებ მდგომარეობის ადგილობრივი ცოდნით. ეს ისევე პრობლემურია, რადგან ძნელია ახლო და შორეული მოქმედების ეფექტების და მომხმარებლებს შორის ინტერფერენციების კონტროლი ყველა AP-დან და მომხმარებლიდან, ყველა ლინკის შესაბამისი არხის მდგომარეობის შესახებ სრული ინფორმაციის ცოდნის გარეშე. შემოთავაზებულია სიმძლავრის მართვის რამდენიმე ევრისტიკული სქემა, რომლებიც ჯერჯერობით მხოლოდ გავრცელების გარემოს შესახებ სპეციფიკური დაშვების საფუძველზეა შემუშავებული; აქედან გამომდინარე, ძნელია იმის შეფასება, თუ რამდენად კარგად იმუშავებს ეს სქემები პრაქტიკაში. ახლახან იქნა შემოთავაზებული პერსპექტიული მიდგომები, რომლებიც დაფუძნებულია მანქანურ სწავლებაზე (ML) და ღრმა სწავლებაზე (DL). მთავარი კითხვაა, არის თუ არა ეს მიდგომები ყოვლისმომცველი, რათა დააკმაყოფილოს უფიჭო mMIMO-ს მოსალოდნელი დეცენტრალიზაცია?

გამოწვევა 5: გაუმჯობესებული განაწილებული SP

უფიჭო mMIMO-ს კვლევის ერთ-ერთი საბოლოო მიზანია ისეთი SP სქემის შემუშავება, რომელიც გვთავაზობს კარგ მახასიათებლებს და შეიძლება განხორციელდეს განაწილებული გზით. წინააღმდეგ შემთხვევაში, სისტემა არ იქნება მასშტაბირებადი. კანონიკურ უფიჭო mMIMO-ში, ჩვეულებრივ განიხილება სხივის შერწყმული ფორმირება, რადგან ის შეიძლება განხორციელდეს განაწილებული სახით და კარგად ფუქციონირებს. თუმცა, სხვა ისეთ წრფივ დამუშავების სქემებთან შედარებით, როგორცაა ნულოვანი იძულება (ZF) და მინიმალური საშუალო კვადრატული შეცდომა (MMSE), სხივის შერწყმული ფორმირების მახასიათებელი გაცილებით უარესია. სხივის შერწყმულ ფორმირებასა და ZF/MMSE-ს შორის არსებული უფსკრული რომ ამოვავსოთ, დამატებით გვჭირდება ძალიან დიდი რაოდენობის მომსახურე ანტენები. შემოთავაზებული იყო უფიჭო mMIMO ლოკალური ZF-ით; თუმცა, ეს სქემა მოითხოვს, თითოეულ AP-ს ჰქონდეს ანტენების დიდი რაოდენობა. ეს უფრო რთულია აპლინკის დიზაინისთვის. ამჟამად, არ არსებობს განაწილებული SP სქემები, რომლებიც ხელმისაწვდომია აპლინკისთვის. მარტივი შეთანხმებული გაფილტვრითაც კი, ჩვენ უნდა გავგზავნოთ (დამუშავებული) სიგნალები თითოეული AP-დან CPU-ებზე სიგნალის დეტექტირებისთვის.

1.4. უფრო მაღალ სიხშირულ დიაპაზონებზე გადასვლა

6G უსადენო სისტემები დაეყრდნობა:

- მილიმეტრული ტალღების ტექნოლოგიებს (30-დან 300 გიგაჰერცამდე (გჰც));
- ტჰც ტექნოლოგიებს (300 გჰც-დან 3 ტჰც-მდე);
- ოპტიკურ დიაპაზონს თავისუფალ სივრცეში.

ცნობილია, რომ გაძლიერებული ატმოსფერული მიღება და გზაში დანაკარგები მაღალ სიხშირეებზე შეიძლება კომპენსირებული იყოს მინიატიურული მასიური საანტენო მესრებით, რომლებსაც შეუძლიათ

ულტრამკვეთრი სხივის ფორმირების მხარდაჭერა. ასევე, არსებობს ბუნებრივი სინერგია IRS/უფიჭო mMIMO და ძალიან მაღალი სიხშირის სისტემებს შორის საოპერაციო დიაპაზონის გასაფართოებლად და მანძილთან დაკავშირებული ფუნდამენტური პრობლემის გადასაჭრელად. ჩვენ ახლა მიმოვიხილავთ ამ მიზნის მიღწევასთან დაკავშირებულ სამ გამოწვევას.

გამოწვევა 6: შეფუთვის/ურთიერთდაკავშირების ტექნიკა

გარდა იმისა, რომ ახორციელებს ფიზიკურ შემოფარგვლას, შეფუთვამ უნდა უზრუნველყოს საიმედო ურთიერთკავშირი შიდა და გარე სამუშაო გარემოს შორის. ზოგიერთი ძირითადი მამოძრავებელი ფაქტორი მოიცავს მაღალსიჩქარიანი ნახევარგამტარული მიკროსქემების ინტეგრაციას მოწინავე საანტენო სისტემებთან და ოპტოელექტრონიკასთან. მაღალ სიხშირეებზე შემაერთებული სადენები იწვევს სიგნალის მნიშვნელოვან დამახინჯებას. შემაერთებული სადენების ეფექტების შეფასება რთულია სიგნალის ისეთი გამოყენებისთვის, როგორცაა სიმძლავრის გამამძიერებლები, და ასევე, ფაზის მიმართ კრიტიკული აპლიკაციებისთვის, როგორცაა სხივების ფორმირება ფაზირებული მესრებისთვის, სადაც მათ შეუძლიათ გვერდითი წილების დონეების შემოტანა. ტრადიციული ლითონის კორპუსები დასაშლელი ბლოკებით უზრუნველყოფს შესანიშნავ მახასიათებლებს, მაგრამ ისინი მოცულობითი და მძიმეა. შესაძინევი პროგრესი მიღწეულია ურთიერთდაკავშირებისა და შეფუთვის ტექნოლოგიებში ტკც აპლიკაციებისთვის. მიკროდამუშავებისა და კერამიკის დაბალტემპერატურაიანი ერთობლივი გამოწვის თანამედროვე ტექნოლოგიები იძლევა კომპაქტურ და იაფფასიან გადაწყვეტილებებს. წარმოების ადიტიურ ტექნიკას, როგორცაა ლითონით დაფარული პლასტმასის მოწყობილობების 3D ბეჭდვა, შეუძლია შექმნას იაფი, მსუბუქი და კომპაქტური მოწყობილობები. კერამიკული კორპუსები როგორც დაბალი, ასევე მაღალი სიმძლავრის მოწყობილობებისთვის კომერციულად ხელმისაწვდომია 50 გჰც-მდე აპლიკაციებისთვის.

გამოწვევა 7: ტრანსივერის დიზაინი

კომპაქტური ფიზიკური ზომების და ენერგოეფექტიანობის მოთხოვნები უფრო რთულად დასაკმაყოფილებელი ხდება მაღალ სიხშირეებზე. სხივის ჰიბრიდული ფორმირება საუკეთესოდ მისადაგება დიდი რაოდენობით ანტენის ელემენტების დანერგვას მაღალი ეფექტიანობის გამაძლიერებლებთან ერთად. ისეთი მნიშვნელოვანი ტექნიკური პარამეტრები, როგორცაა ხმაურის კოეფიციენტი, გამომავალი სიმძლავრე და ენერგოეფექტიანობა, მნიშვნელოვნად დეგრადირდება მაღალ სიხშირეებზე. მაღალი რიგის მოდულირებული სიგნალების დემოდულაცია ასევე უფრო რთული ხდება, რადგან ფაზური ხმაური იზრდება მაღალ სიხშირეებზე. საანტენო მესრის მოწინავე SP ტექნოლოგიები უნდა ავსებდეს ტრანსივერის დიზაინს ამ გამოწვევების გადასაჭრელად. ახალი ტექნოლოგიები, როგორცაა ანტენების სივრცითი, ზედმეტი დონით დისკრეტიზაცია (ანუ სიგნალების დისკრეტიზაცია დისკრეტიზაციის სიხშირით, რომელიც აღემატება ნაიკვისტის სიჩქარეს) და ახალი ფაზირებული მესრების არქიტექტურა, შეიძლება გამოყენებულ იქნას მმტ/ტპც დიაპაზონში ფუნქციონირებადი ანტენების მესრების ზომის, წონისა და ენერჯის მოხმარების პრობლემების გადაწყვეტის უზრუნველსაყოფად. მართლაც, კომერციულად უკვე ხელმისაწვდომია მონოლითური მიკროტალღური ინტეგრირებული მიკროსქემის სხივების ფორმირებები და კომპაქტური მილიმეტრული ტალღების უსადენო საკომუნიკაციო მოდულები, რომლებიც შეიცავს გაძლიერების მაღალი კოეფიციენტის მქონე ფაზირებულ საანტენო მესრებს, რომლებსაც შეუძლია მონაცემთა გადაცემის მაღალი სიჩქარის მიღწევა 60 გპც-მდე სიხშირეზე.

გამოწვევა 8: გაზომვები და სტანდარტიზაცია

ტპც სიხშირეებზე ფაზის მიმართ მგრძნობიარე გაზომვისთვის ორი პოპულარული მიდგომა იყენებს ან ქსელების ვექტორულ ანალიზატორებს (VNA), ან დროის დომენის სპექტრომეტრებს. ორივე შემთხვევაში, დაკალიბრება, გადამოწმება და გაზომვის მიკვლევადობა ტპც სიხში-

რულ დიაპაზონში რჩება მთავარ გამოწვევად. დროის დომენის სისტემებისთვის მთავარი გამოწვევაა სტანდარტიზებული გაზომვისა და დაკალიბრების დაწესება, მაშინ როდესაც VNA სისტემებისთვის გადაწყვეტილებებს ეძებენ მაღალი სიზუსტის ტალღსატარებისა და ურთიერთდამაკავშირებლების შემუშავებაში. ელექტროოპტიკური ნიმუშის აღება პერსპექტიულია, როგორც ტვც გაზომვების დამატებითი მიდგომა, თუმცა სიხშირის გატარების ზოლი ჯერ კიდევ არ არის გაფართოებული 1.5 ტვც დიაპაზონამდე და გარჩევადობა უფრო მეტად გასაუმჯობესებელია.

1.5. SP-ის როლი 6G ეპოქაში

6G-სკენ წინსვლა აუცილებლად შეფერხდება მნიშვნელოვანი გამოწვევებით SP არენაზე. მასობრივად განთავსებული და დეცენტრალიზებული (უფიჭო) ქსელები, რომლებიც მხარს უჭერენ უპრეცედენტო რაოდენობის IoE კავშირებს, წარმოქმნიან მაღალგანზომილებიან და ძალიან რთულ სიგნალებს, რომლებზეც ზემოქმედებს გაზრდილი ინტერფერენციები და სხვა დარღვევები (დაკავშირებული სინქრონიზაციასთან, დროით კორელაციასთან და ა.შ.), რაც აქამდე დიდწილად შეუმჩნეველი იყო. ამჟამინდელი SP მეთოდები, რომლებიც ძირითადად დაფუძნებულია დაბალგანზომილებიან სიგნალებზე და კლასიკურ ვარაუდებზე სტაციონარულობის შესახებ, საჭიროებს გადახედვას. ჩვენ ახლა განვიხილავთ ამ მეთოდთაგან ორს: არხის შეფასებას და ადაპტიურ ფილტრაციას და მათთან დაკავშირებულ გამოწვევებს.

გამოწვევა 9: არხის შეფასება

ვრცელი კვლევა 5G-ის კონტექსტში ჩატარებული იყო იმის შესახებ, თუ როგორ უნდა შემცირდეს სწავლების (ტრენინგის) ოვერჰედები პილოტ-სიგნალზე დაფუძნებული არხის შეფასებისას. მიუხედავად იმისა, რომ ეს მოთხოვნილება ძალიან მნიშვნელოვანი იქნება 6G-ში, სიცოცხლისუნარიანი გადაწყვეტილებები მიიღება ძალიან დიდი მასშტაბურობის და დაკავშირების ურთულესი მოთხოვნების გამო, კერძოდ:

- ოპერატორების მთავარი საზრუნავი – მონაცემთა გადაცემის მაღალი სიჩქარის მხარდაჭერა (გიგაბიტი წამში) მაღალი მობილურობის სცენარებში მოითხოვს არხის კოჰერენტულობის გაცილებით მოკლე დროებს;
- ულტრადიდიანი შეყვანების მოთხოვნები გამოიწვევს გადაცემის ინტერვალების არსებითად შემცირებას;
- შესაფასებელი პარამეტრების რაოდენობა გაცილებით დიდი იქნება მასშტაბირების შედეგად (არა მხოლოდ ანტენების/AP-ების, არამედ ასევე მომხმარებლების/მოწყობილობების).

მაღალგანზომილებიანი არხები უნდა შეფასდეს სერიოზული შეზღუდვების გათვალისწინებით, რამაც შესაძლოა პილოტ-სიგნალებზე დაფუძნებული (კოჰერენტული) შეფასება შეუძლებელი გახადოს, განსაკუთრებით მაღალი მობილურობის ან დიდი შეყვანების მოთხოვნების პირობებში. ბრმა (არაკოჰერენტული) შეფასების მიდგომები, რომლებიც არ საჭიროებს სპეციალურ საპილოტე სიგნალებს, წარმოადგენს პერსპექტიულ ალტერნატივას. მიუხედავად იმისა, რომ მნიშვნელოვანი ძალისხმევა განხორციელდა ამ მიმართულებით, არსებული მიდგომები მოითხოვს ცოდნას (მაღალგანზომილებიანი) სიგნალის კოვარიანტობის მატრიცის შესახებ, რომელიც კვლავ უნდა იქნას მიღებული ამონარჩევების შეზღუდული რაოდენობით. ამ მიზნით, ფუნდამენტური კვლევის ჩატარება შემთხვევითი მატრიცების თეორიის (RMT) და მაღალგანზომილებიანი სტატისტიკის სფეროებში მნიშვნელოვანი იქნება, კერძოდ, შეზღუდული ამონარჩევების პირობებში დიდი კოვარიანტული მატრიცების (და მათი საკუთრივი მნიშვნელობების სპექტრის) ზუსტი შეფასების მეთოდების შემუშავებისთვის. ML-ზე დაფუძნებულმა უახლესმა მიდგომებმა შესაძლოა, ასევე მნიშვნელოვანი როლი შეასრულოს.

გამოწვევა 10: ადაპტიური ფილტრაცია

სხივის ფორმირებისას, გადაცემული სიგნალები ციფრული წინასწარ კოდირების საშუალებით დინამიკურად ადაპტირებულია გავრცელების პირობებთან, რაც ეფექტიანად ამცირებს ინტერფერენციებს და ხმაურს.

სხივის ადაპტიური ფორმირება შეიძლება განიხილებოდეს, როგორც კონკრეტული პროექტირების მიზნის მქონე წრფივი ფილტრი, მაგალითად, სიგნალისა და ხმაურის თანაფარდობის (SNR) მაქსიმალურად გაზრდისათვის. სხივის ფორმირების (და მასთან დაკავშირებული მიმღების ფილტრების) ოპტიმალური გადაწყვეტილებები მოითხოვს ინტერფერენციისა და ხმაურის აგრეგირებული კოვარიანტული მატრიცის განსაზღვრას, რაც პრაქტიკაში უცნობია და ეს უნდა შეფასდეს დაკვირვებული ამონარჩევებიდან. ამჟამინდელი გადაწყვეტილებები ეყრდნობა შეფასების კლასიკურ მეთოდებს, როგორცაა ამონარჩევების კოვარიანტობის მატრიცა (SCM), რომელიც მიგვიყვანს არასწორ შეფასებამდე მაღალგანზომილებიან 6G სცენარებში, შემდეგი მიზეზების გამო:

- ამონარჩევების სიმცირე: მიუხედავად იმისა, რომ ანტენების და მომხმარებლის მოწყობილობების რაოდენობა მნიშვნელოვნად გაიზარდება, მკაცრ დაბალი შეყოვნების და მაღალი მობილურობის მოთხოვნებს მიყვავართ ტრენინგის (დაკვირვების ქვეშ მყოფი) ამონარჩევების საკმაოდ შეზღუდულ რაოდენობამდე;
- დროითი კორელაცია: ულტრამკვირივი და უაღრესად დეცენტრალიზებული განლაგება (მაგალითად, ათასობით განაწილებული AP-ით უფიჭო ქსელებში) ექვემდებარება არასრულყოფილ სინქრონიზაციას (მაგალითად, ინტერფერენციებს და სასურველ სიგნალებს შორის) და არასტაციონარულ ეფექტებს;
- დაშორებული ამონარჩევები: მილიონობით ურთიერთდაკავშირებული მოწყობილობით (ელექტრული/ინტელექტუალური ტექნოლოგიებიდან დაწყებული, დაკავშირებულ მანქანებამდე), ჩვენ ველით როგორც იმპულსური ხმაურის მრავალ წყაროს, ასევე, უსაფრთხოების მიმართ მგრძობიარე აპლიკაციებში, განზრახ შექმნილი ინტერფერენციების შესაძლო წყაროებს.

ტრადიციული შემფასებელი (მაგალითად, SCM) ეყრდნობა ამონარჩევების საკმარის ხელმისაწვდომობას (ამონარჩევების რაოდენობა გაცი-

ლებით მეტი უნდა იყოს, ვიდრე სიგნალების რაოდენობა) და დაშვებას, რომ ეს ამონარჩევები დამოუკიდებლად და თანაბრად არის განაწილებული. თუმცა, ზემოთ მოცემულ პირობებში, შეუსაბამობას ჭეშმარიტ და სავარაუდო კოვარიაციას შორის, მივყავართ უაღრესად არაზუსტ ფილტრებამდე, მახასიათებლების მკვეთრი გაუარესებით დაკავშირების, საიმედოობისა და მონაცემთა გადაცემის სიჩქარის თვალსაზრისით. შესაბამისად, ფუნდამენტური გამოწვევაა ისეთი ფილტრაციის მეთოდების შემუშავება, რომლებიც მდგრადია ზემოხსენებული ეფექტების არსებობის დროს. მიუხედავად იმისა, რომ ამ კუთხით ჩატარებული კვლევები აქამდე ძალიან მწირია, პერსპექტიული ინსტრუმენტები და მიმართულებები შეიძლება გამოყენებულ იქნას რობასტული სტატისტიკის, RMT და მაღალგანზომილებიანი კოვარიანტული შეფასების სფეროებიდან.

1.6. პირველი თავის დასკვნა

მიუხედავად იმისა, რომ 6G-ის ეპოქას 8-10 წელი მაინც გვაშორებს, უკვე დროა ვიცოდეთ, რა არის კომუნიკაციების ინჟინრების მთავარი გამოწვევები. ჩვენ ამ თავში განვიხილეთ ათი, ჩვენი აზრით ძალიან მნიშვნელოვანი გამოწვევა, რომელთა გადაჭრის პროცესში გამოყენებული იქნება არსებული ცოდნა სხვადასხვა სამეცნიერო სფეროებიდან, როგორებიცაა, მაგალითად, სიგნალების დამუშავება, ინფორმაციის თეორია, ელექტრომაგნეტიზმი და ფიზიკური იმპლემენტაციის მეთოდები.

თავი 2. რეკონფიგურირებადი ინტელექტუალური ზედაპირები 6G სისტემებისთვის

2.1. შესავალი

მიუხედავად იმისა, რომ 5G უსადენო ქსელები თანდათანობით მთელ მსოფლიოში ვრცელდება, მასში ძირითადი ფიზიკური ფენის ტექნოლოგია არის mMIMO, ფუნქციონირებადი სუბ-6 გჰც სიხშირულ დიაპაზონში, ხოლო მმტ კომუნიკაცია, რომელიც თავდაპირველად ჩაფიქრებული იყო, როგორც 5G ქსელებისთვის ერთ-ერთი ძირითადი ტექნოლოგია, პრაქტიკულად ნაკლებად არის გამოყენებული. მმტ კომუნიკაციის ძირითადი პრობლემები მოიცავს მის მგრძობელობას ბლოკირების მიმართ, შეზღუდულ დაფარვას და გზაში მნიშვნელოვან დანაკარგებს. თუმცა, ზოგიერთი ინოვაციური აპლიკაცია, როგორიცაა: იმერსიული ვირტუალური რეალობა, მაღალი ხარისხის ჰოლოგრაფიული პროექციები, ციფრული „ტყუპი“, დაკავშირებული რობოტები და ავტონომიური სისტემები, საგნების სამრეწველო ინტერნეტი, ინტელექტუალური სატრანსპორტო სისტემა და ადამიანის თავის ტვინთან დაკავშირებული კომპიუტერული ინტერფეისები, სავარაუდოდ, 6G-ით და შემდგომი თაობის კომუნიკაციებით იქნება მხარდაჭერილი. ეს აპლიკაციები გულისხმობს მომსახურების ხარისხის (QoS) მაღალ მოთხოვნებს, როგორიცაა: მონაცემთა უკიდურესად მაღალი გადაცემის სიჩქარე, ულტრამაღალი საიმედოობა და ულტრადიდიანი შეყოვნება, რაც არ შეიძლება დღეს არსებული სისტემების მიერ იყოს მხარდაჭერილი. მაღალ სიხშირეებზე ხელმისაწვდომი სიხშირის გატარების ზოლის დიდი მოცულობის გათვალისწინებით, გარდაუვალი ტენდენცია იქნება კომუნიკაციები მმტ-ზე და თუნდაც, ტერაჰერცულ სიხშირულ ზოლებში. mMIMO ტექნიკის საანტენო მესრით საბაზო სადგურებზე (BS) უზრუნველყოფილი გამლიერება ამცირებს გზაში დანაკარგებს მაღალ სიხშირეებზე, მაგრამ ვერ წყვეტს ბლოკირების პრობლემას. უფრო მჭიდროდ განლაგებულ BS-ებს შეუძლია ხელი

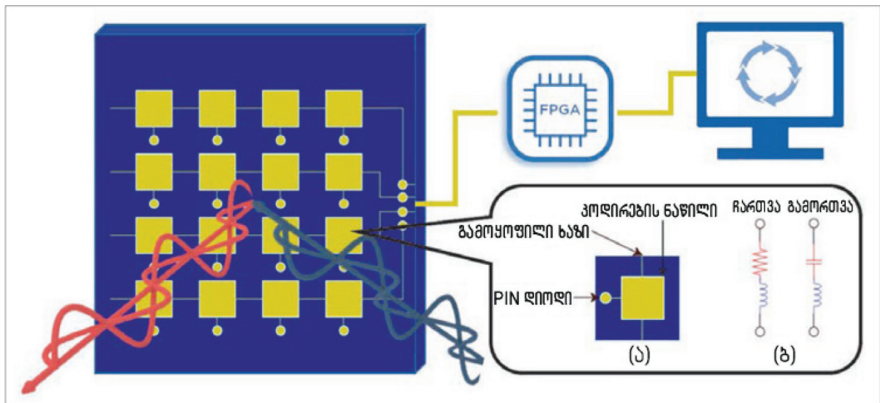
შეუწყოს ბლოკირების აღმოფხვრას და დაფარვის ხვრელების შევსებას, მაგრამ ეს არის ძვირად ღირებული გადაწყვეტა, როგორც მისი ინფრასტრუქტურის (და სარეზერვო მოთხოვნების), ასევე ენერჯის მოხმარების თვალსაზრისით. აქედან გამომდინარე, ამ პრობლემების გადასაჭრელად საჭიროა ახალი ეკონომიური და ენერგოეფექტიანი ტექნოლოგიები.

ბოლო პერიოდში RIS განიხილება, როგორც ძირითადი ტექნოლოგია, რომელიც საშუალებას იძლევა გვერდი ავუაროთ ზემოხსენებულ პრობლემებს. RIS შეიძლება დამონტაჟდეს დიდ ბრტყელ ზედაპირებზე (მაგალითად, ოთახებში კედლებზე ან ჭერზე, შენობებში ან შენობებს გარეთ აბრებზე), რათა აირეკლოს რადიოსიხშირული (RF) ენერჯია დაბრკოლებების გარშემო და შექმნას ვირტუალური პირდაპირი ხედვის ხაზის (LoS) გავრცელების გზა მმტ წყაროსა და დანიშნულების ადგილს შორის. აღნიშნულ თემატიკასთან დაკავშირებული რამდენიმე გამოწვევა მოკლედ იყო მიმოხილული პირველ თავში და ახლა უფრო დეტალურად შევეცდებით ამ საკითხის შესწავლას.

2.2. RIS-ის დანიშნულება და გამოყენებები

RIS არის ბრტყელი ზედაპირი, რომელიც შედგება პასიური ამრეკლავი ელემენტების მასივისგან, რომელთაგან თითოეულს შეუძლია დამოუკიდებლად დააწესოს საჭირო ფაზური წანაცვლება შემომავალ სიგნალზე. ამრეკლავი ელემენტების სპეციფიკურ მასალებზე დაყრდნობით, RIS შეიძლება დაიყოს საანტენო მესერზე დაფუძნებულ და მეტაზედაპირზე დაფუძნებულ სტრუქტურებად. ყველა ამრეკლავი ელემენტის ფაზური წანაცვლების გულდასმით რეგულირებით, არეკლილი სიგნალების რეკონფიგურაცია შესაძლებელია მათი სასურველი მიმართულებებით გასავრცელებლად. მეტამასალების სწრაფი განვითარების შედეგად, თითოეული ელემენტის არეკვლის კოეფიციენტი შეიძლება შეიცვალოს დროის რეალურ მასშტაბში, რათა მოერგოს დინამიკურად ცვალებად უსადენო გავრცელების გარემოს.

როგორც ნახ. 2.1-ზეა ნაჩვენები, ტიპური RIS არქიტექტურა, რომელიც დამზადებულია მეტამასალებით, ძირითადად შედგება ბრტყელი ზედაპირისა და კონტროლერისგან. ბრტყელი ზედაპირი შეიძლება გაკეთდეს ერთი ფენისგან ან, ზოგადად, მრავალ ფენისგან. მაგალითად, შექმნილია სამფენიანი ბრტყელი ზედაპირი. გარე ფენას აქვს დიდი რაოდენობით ამრეკლავი ელემენტები დაბეჭდილი დიელექტრიკულ სუბსტრატზე, რათა პირდაპირ იმოქმედოს დაცემულ სიგნალებზე. შუა ფენა არის სპილენძის პანელი სიგნალის/ენერჯის გაჟონვის თავიდან ასაცილებლად. ბოლო ფენა არის მიკროსქემის დაფა, რომელიც გამოიყენება RIS ელემენტების არეკვლის კოეფიციენტების დასარეგულირებლად, რომელსაც მართავს ჭკვიანი კონტროლერი, როგორცაა მომხმარებლის მიერ პროგრამირებადი კარიბჭის მასივი (FPGA). მათი ფუნქციონირებისთვის გათვალისწინებულ ტიპურ სცენარში, RIS-ის ოპტიმალური არეკვლის კოეფიციენტები გამოითვლება BS-ზე და შემდეგ იგზავნება RIS-ის კონტროლერთან გამოყოფილი უკუკავშირის არხის მეშვეობით. არეკვლის კოეფიციენტების მნიშვნელობები დამოკიდებულია არხის მდგომარეობის შესახებ ინფორმაციაზე (CSI), რომელიც განახლდება მხოლოდ მაშინ, როდესაც CSI იცვლება გაცილებით უფრო ხანგრძლივ დროით მასშტაბში, ვიდრე მონაცემთა სიმბოლოს ხანგრძლივობაა. ნახ. 2.1ა გვიჩ-



ნახ. 2.1. RIS-ის არქიტექტურა

ვენებს თითოეული ამრეკლავი ელემენტის სტრუქტურას, რომელშიც ჩართულია PIN დიოდი. გამოყოფილი ხაზის მეშვეობით ძაბვის კონტროლით, PIN-ს შეუძლია გადაერთოს „ჩართვის“ და „გამორთვის“ რეჟიმებს შორის, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 2.1ბ-ზე მოცემულ ეკვივალენტურ სქემაზე, რომელსაც შეუძლია განახორციელოს ფაზური წანაცვლების პიკსვაობა (რადიანებში). ფაზური წანაცვლების დონეების რაოდენობის გასაზრდელად, თითოეულ ელემენტში მეტი PIN დიოდი უნდა იყოს ინტეგრირებული.

RIS-ებს ასევე აქვს მნიშვნელოვანი უპირატესობები პრაქტიკული რეალიზაციის კუთხით. მაგალითად, RIS ამრეკლავი ელემენტები მხოლოდ პასიურად ასახავს შემომავალ სიგნალებს, მათი დამუშავების ყოველგვარი რთული ოპერაციების გარეშე, რომლებიც საჭიროებს RF ტრანსივერების აპარატურულ უზრუნველყოფას. მაშასადამე, ჩვეულებრივ აქტიურ გადამცემებთან შედარებით, RIS-ს შეუძლია იმუშაოს გაცილებით დაბალ ფასად, ტექნიკისა და ენერჯის მოხმარების თვალსაზრისით. გარდა ამისა, ამრეკლავი ელემენტების პასიური ბუნების გამო, RIS-ების დამზადება შესაძლებელია მსუბუქი წონით და ფენის შეზღუდული სისქით; აქედან გამომდინარე, ისინი ადვილად მონტაჟდება კედლებზე, ქერზე, აბრებზე, ქუჩის ნათურებზე და ა.შ. გარდა ამისა, RIS ბუნებრივად მუშაობს სრული დუპლექსის (FD) რეჟიმში თვითინტერფერენციების ან თერმული ხმაურის გარეშე. ამრიგად, ისინი აღწევენ უფრო მაღალ სპექტრულ ეფექტიანობას, ვიდრე აქტიური ნახევრად დუპლექსური (HD) სარელო სისტემები და ამავე დროს, აქტიურ FD სარელო სისტემებთან შედარებით, რომლებიც თვითინტერფერენციების დახვეწილ ჩახშობას საჭიროებს, მათ აქვთ სიგნალის დამუშავების ნაკლები სირთულე. შესაბამისად, ფუნქციონირებს რა FD რეჟიმში, RIS, ამავე დროს, ხასიათდება იაფფასიანი აპარატურული უზრუნველყოფით და ენერჯის მცირე მოხმარებით. RIS-ის ამრეკლავი ელემენტების ფაზური ცვლის გონივრულად დარეგულირებით, არეკლილი სიგნალები შეიძლება კონსტრუქციულად

იყოს ზედდებული პირდაპირი გზებიდან მოსულ სიგნალებზე, სასარგებლო სიგნალის სიმძლავრის გასაძლიერებლად, ან დესტრუქციულად გაერთიანდეს მრავალი მომხმარებლის ინტერფერენციის მავნე ზემოქმედების შესამცირებლად. აქედან გამომდინარე, RIS-ების გამოყენება უზრუნველყოფს დამატებითი თავისუფლების ხარისხს სისტემის მუშაობის შემდგომი გაუმჯობესებისთვის. ქვემოთ ჩამოვთვლით რამდენიმე ტიპურ RIS აპლიკაციას სხვადასხვა ახალ სისტემაში.

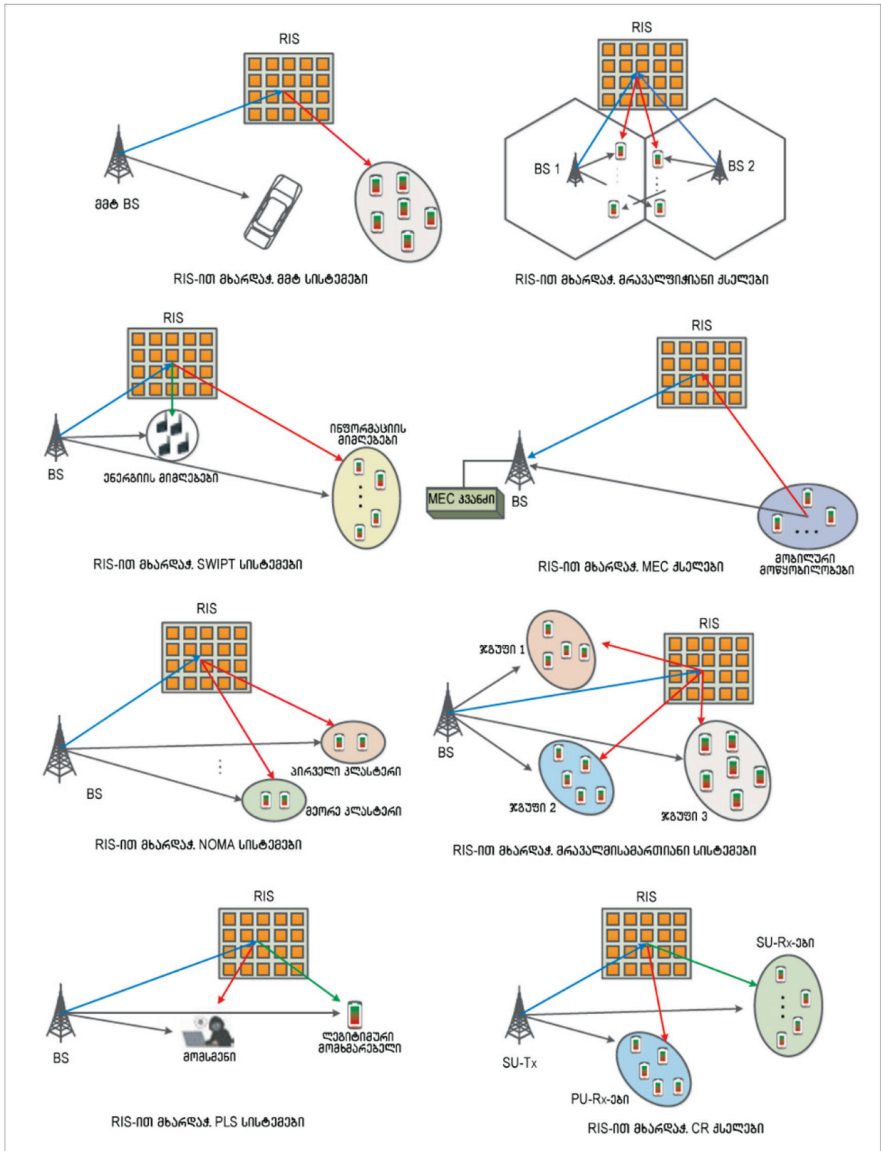
მმტ ტექნიკას აქვს მონაცემთა გადაცემის მაღალი სიჩქარის მხარდაჭერის პოტენციური მათი სიხშირის გატარების ფართო ზოლის გათვალისწინებით. თუმცა, მმტ-ის შესაბამის სიხშირეზე კომუნიკაციას ასევე აქვს გარკვეული ნაკლოვანებები, როგორცაა გადაცემისას გზაში დიდი დანაკარგები. საბედნიეროდ, ამის შერბილება შესაძლებელია მისი უზარმაზარი გაძლიერებით, რომელიც უზრუნველყოფილია დიდი საანტენო მესრით კომპაქტურ სივრცეში, ასევე მისი ტალღის მოკლე სიგრძის მხედველობაში მიღებით. კიდევ ერთი დაბრკოლება არის ის, რომ იგი დაუცველია მანქანების, ფეხით მოსიარულეების და ხეების მიერ შექმნილი დაბლოკვის გამო. შეღწევადობის დანაკარგი ასევე მაღალია, რომლის მოგვარებაც შეუძლებელია დიდი საანტენო მესრის გამოყენებით. ამის ნაცვლად, RIS შეიძლება განლაგდეს დამხმარე გადამცემი ლინკის შესაქმნელად მაშინაც კი, როდესაც პირდაპირი ლინკი დაბლოკილია.

სპექტრული ეფექტიანობის მაქსიმალურად გასაზრდელად, მრავალი BS სხვადასხვა ფიჭაში ხელმეორედ იყენებს ერთსა და იმავე მწირ სიხშირულ რესურსს, რაც იწვევს ფიჭათაშორის ინტერფერენციებს, განსაკუთრებით ფიჭის საზღვარზე მყოფი მომხმარებლებისთვის. კონკრეტულად, სიგნალის სასურველი სიმძლავრე, რომელიც მიღებულია ფიჭის საზღვარზე მყოფი მომხმარებლის მიერ მისი მომსახურე BS-დან, სადაც არაა მეზობელი ფიჭებიდან მიღებულ ინტერფერენციასთან. ამრიგად, ფიჭის საზღვარზე მყოფი მომხმარებლები განიცდიან დაბალ სიგნალის

ინტერფერენცია-პლუს-ხმაურთან თანაფარდობას (SINR). ამ საკითხის გადასაჭრელად, ლიტერატურაში შემოთავაზებულია RIS-ის განლაგება ფიჭის საზღვარზე, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 2.2-ზე. ასეთ სიტუაციაში, RIS-ს შეუძლია ერთდროულად გაამლიეროს მომსახურე BS-დან მიღებული ერთი სიგნალი და შეამსუბუქოს მეორის ინტერფერენცია. კომპიუტერული სიმულაციის შედეგებმა აჩვენა, რომ RIS-ის (რომელსაც 80 ამრეკლავი ელემენტი აქვს) მხარდაჭერით მიღწეული ჯამური სიჩქარე შეიძლება გაორმაგდეს RIS-ის გარეშე ფუნქციონირებასთან შედარებით.

უსადენო გზით ინფორმაციისა და სიმძლავრის ერთდროული გადაცემა (SWIPT) წარმოადგენს პერსპექტიულ ტექნიკას ელექტროენერჯის ეფექტიანი და იაფფასიანი მიწოდების უზრუნველსაყოფად ენერჯით შეზღუდული საგნების ინტერნეტის (IoT) ქსელებში, სადაც BS მუდმივი კვებით, უსადენო გზით გადასცემს სიგნალს ინფორმაციის მიმღებებზე (IR) და ენერჯის მიმღებებზე (ER) ერთდროულად. SWIPT სისტემების მთავარი გამოწვევა არის ის, რომ ER-ები და IR-ები ფუნქციონირებენ ელექტრომომარაგების სხვადასხვა მოთხოვნის შესაბამისად. ცხადია, რომ IR-ებთან შედარებით, ER-ებს ესაჭიროება ბევრად მაღალი რიგის მიღებული სიმძლავრე. შედეგად, ER-ები უნდა განლაგდეს BS-სთან უფრო ახლოს, ვიდრე IR-ები, რათა მიიღოს საკმარისი სიმძლავრე, რადგან სიგნალის მიღევა ზღუდავს ER-ების პრაქტიკულ ოპერაციულ დიაპაზონს. ამ პრობლემის მოსაგვარებლად, შემოთავაზებულ იქნა RIS-ის განთავსება ER-ების სიახლოვეს, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 2.2-ზე. კომპიუტერული სიმულაციის შედეგებმა უჩვენა, რომ 0.2 მგტ მინიმალური შეგროვილი სიმძლავრის უზრუნველსაყოფად, ER-ების ოპერაციული დიაპაზონი შეიძლება გაიზარდოს 5.5-დან 9 მ-მდე, როდესაც RIS აღჭურვილია 40 ამრეკლავი ელემენტით.

ახალ პერსპექტიულ აპლიკაციებში, როგორიცაა ვირტუალური რეალობა (VR), ინტენსიურ გამოთვლებზე დაფუძნებული გამოსახულების და ვიდეოს დამუშავების ამოცანები უნდა შესრულდეს დროის რეალურ მასშტაბში. თუმცა, ტიპური VR მოწყობილობებისთვის ელექტრომომარ-



ნახ.2.2. RIS-ის ტიპური გამოყენებები ზოგიერთ სუბ-6 გჰც სისტემაში

რაგებისა და აპარატურული უზრუნველყოფის შეზღუდული შესაძლებლობების გამო, ამ ამოცანების შესრულება შეუძლებელია ლოკალურად. პრობლემის მოსაგვარებლად, ეს გამოთვლითი ინტენსიური ამოცანები

შეიძლება გადატანილ იქნას მძლავრ გამოთვლით კვანძებში, რომლებიც ჩვეულებრივ განლაგებულია ქსელის საზღვარზე. თუმცა, ზოგიერთი განსაკუთრებული შემთხვევისთვის, როდესაც ეს მოწყობილობები შორს არის მობილური პერიფერიული გამოთვლების (MEC) კვანძისგან, მათ შეუძლიათ ჰქონდეთ მონაცემთა გადმოტვირთვის დაბალი სიჩქარე გზაში დიდი დანაკარგების გამო, რაც იწვევს გადმოტვირთვის გადაჭარბებულ შეფერხებას. ამ დაბრკოლების დასაძლევად, ლიტერატურაში შემოთავაზებულ იქნა ახალი MEC სტრუქტურა RIS-ის გამოყენებით, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 2.2-ზე. კომპიუტერული სიმულაციის შედეგებმა უჩვენა, რომ ამოცანის საერთო შეყოვნება შეიძლება შემცირდეს 115-დან 65 მწმ-მდე, თუ გამოყენებულია 100-ელემენტიანი RIS.

არაორთოგონალური მრავალჯერადი წვდომა (NOMA) წარმოადგენს პერსპექტიული მრავალჯერადი წვდომის ტექნიკას მომავალ უსადენო ქსელებში, რომელშიც თითოეული ორთოგონალური რესურს-ბლოკი ერთდროულად რამდენიმე მომხმარებლის მიერ არის გამოყენებული. ეს მნიშვნელოვნად ზრდის ჩვეულებრივი ორთოგონალური მრავალჯერადი წვდომის სპექტრულ ეფექტიანობას. თუმცა, განსაკუთრებულ შემთხვევებში, როდესაც მომხმარებლების არხის ვექტორები ორთოგონალურია ერთმანეთთან, NOMA შეიძლება არ იყოს კარგი ვარიანტი. NOMA-სთვის განხორციელების იდეალური სცენარია, როდესაც ყველა მომხმარებლის არხის ვექტორი ქმნის ერთსა და იმავე კუთხურ მიმართულებას. NOMA-ს აპლიკაციის გასაფართოებლად, RIS შეიძლება დაინერგოს სისტემაში ყველა მომხმარებლის უსადენო არხის ვექტორის გონივრულად მართვისთვის, რათა ერთი მომხმარებლის არხის ვექტორი გასწორდეს მეორე მომხმარებლის არხის ვექტორთან.

კონტენტის ხელმეორედ გამოყენებაზე დაფუძნებულმა მრავალმისამართიანმა გადაცემამ მიიპყრო მკვლევრების ფართო ყურადღება, რადგან მას შეუძლია შეამციროს ტელეტრაფიკი და შესაბამისად, მომავალ უსადენო ქსელებში გადამწყვეტი როლი შეასრულოს. მრავალმისამა-

რთიანი გადაცემის გამოყენების რამდენიმე ტიპური მაგალითი მოიცავს ვიდეოკონფერენციას, ვიდეოთამაშს და სატელევიზიო მაუწყებლობას. მრავალჯგუფიან მრავალმისამართიან კომუნიკაციებში, იდენტური კონტენტი გაზიარებულია თითოეულ ჯგუფში და მათი მონაცემთა გადაცემის სიჩქარე შეზღუდულია იმ მომხმარებლის მიერ, რომელსაც აქვს არხის ყველაზე სუსტი გაძლიერება. ამ საკითხის გადასაჭრელად, შემოთავაზებულ იქნა RIS-ზე დაფუძნებული მრავალმისამართიანი არქიტექტურა, როგორც ნაჩვენებია ნახ. 2.2-ზე. RIS-ის ფაზური წანაცვლებების ფრთხილად რეგულირებით, შეიძლება გაუმჯობესდეს ყველაზე სუსტი ლინკის არხის პირობები.

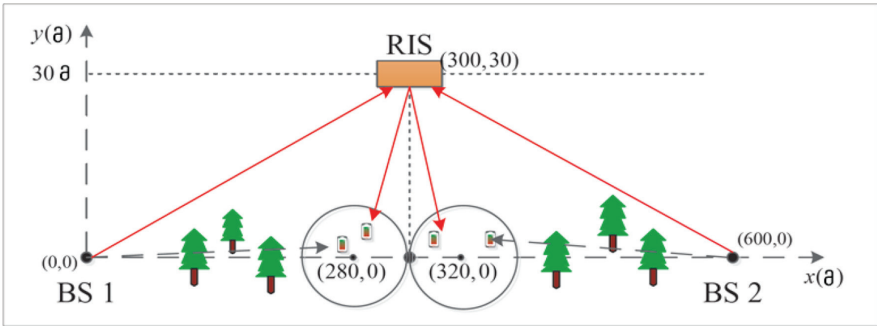
მრავალი მომხმარებლისთვის უსადენო გადაცემების ერთდროულობის გამო, უსადენო ლინკები მიდრეკილია უსაფრთხოებასთან დაკავშირებულ საფრთხეებთან, როგორცაა ჩახშობისთვის გამიზნული შეტევები და უსაფრთხოებასთან დაკავშირებული ინფორმაციის გაჟონვა. ბოლო დროს ფიზიკური ფენის უსაფრთხოების (PLS) ტექნიკამ მიიპყრო ფართო კვლევის ყურადღება, რადგან მას შეუძლია თავიდან აიცილოს გასაღების გაცვლის რთული პროტოკოლები და ის შესაფერისია შეყვანებისადმი მგრძობიარე აპლიკაციებისთვის. უსაფრთხო საკომუნიკაციო კავშირის სიჩქარის მაქსიმალურად გაზრდის მიზნით, შემოთავაზებულია როგორც ხელოვნური ხმაურის, ასევე მრავალი ანტენის გამოყენება. თუმცა, როდესაც ლეგიტიმურ მომხმარებლებს და მომსმენებს (მიმყურადებლებს) აქვთ კორელირებული არხები ან როდესაც მომსმენები უფრო ახლოს არიან BS-სთან, ვიდრე ლეგიტიმური მომხმარებლები, მიღწევადი უსაფრთხოების მაჩვენებელი შეზღუდული რჩება. ამ საკითხის მოსაგვარებლად, RIS განთავსებულ იქნა ქსელში, რომელიც მუშაობს მომსმენის თანდასწრებით, როგორც ნაჩვენებია ნახ. 2.2-ზე. RIS-ის დახმარებით მცირდება ინფორმაციის გაჟონვა მომსმენებისკენ და ამასთან, იზრდება სიგნალის სიმძლავრე ლეგიტიმური მომხმარებლებისთვის.

შემეცნებით რადიოებს (CR) შეუძლია გაზარდოს სპექტრული ეფექტიანობა. ეს ხდება იმის ხარჯზე, რომ ასეთი სისტემა მეორად მომხმარებლებს (SU-ებს) ნებას რთავს, ხელმეორედ გამოიყენონ იგივე სპექტრი, რომელსაც ფლობენ პირველადი მომხმარებლები (PU) და ამასთან, აკონტროლებს SU გადამცემების (SU-Tx) მიერ PU მიმღებებზე (PU-Rx) შექმნილ ინტერფერენციას. სტანდარტული მიდგომაა – გამოყენებულ იქნას სხივის ფორმირება SU-ების ჯამური სიჩქარის მაქსიმიზაციისთვის, იმავდროულად კი იმის უზრუნველსაყოფად, რომ ინტერფერენციის სიმძლავრე PU-Rx-ებში რჩება ინტერფერენციის ტემპერატურის ლიმიტის ქვემოთ. თუმცა, სხივის ფორმირების მოგება შეზღუდულია, როდესაც SU-Tx-ის SU-Rx-თან კავშირი სუსტია და არხის გაძლიერება SU-Tx-სა და PU-Rx-ს შორის გაცილებით მაღალია. ამ პრობლემის მოსაგვარებლად, RIS შეიძლება განთავსდეს PU-Rx-ების სიახლოვეს, როგორც ნაჩვენებია ნახ. 2.2-ზე. აქ RIS გამოიყენება PU-Rx-ების მიმართულებით ინტერფერენციის შესამცირებლად და ამავე დროს, SU-Rx-ებზე სიგნალის სიმძლავრის გასაუმჯობესებლად.

დაბოლოს, წარმოვადგენთ თემატურ მაგალითს, რომელიც გვიჩვენებს RIS-ის განთავსების უპირატესობებს მრავალფიჭიან ქსელებში. კონკრეტულად, ჩვენ განვიხილავთ RIS-ით მხარდაჭერილ ორფიჭიან ქსელს, რომელიც ნაჩვენებია ნახ. 2.3-ზე. თითოეულ ფიჭას ჰყავს ორი მომხმარებელი, რომელიც შემთხვევითი წესითაა განლაგებულია წრეში 20 მ რადიუსით. გზაში დანაკარგების ექსპონენტის მაჩვენებელი BS-სა და მომხმარებლებს შორის არის $\alpha_{BU} = 3.75$. BS-RIS ლინკისა და RIS-მომხმარებლის ლინკის გზაში დანაკარგების ექსპონენტის მაჩვენებლები დაყენებულია, როგორც $\alpha_{BI} = \alpha_{IU} = \alpha_{RIS} = 2.2$. იგულისხმება, რომ ადგილი აქვს მცირემასშტაბიან რელეის მიყუჩებას. შემოთავაზებულ იქნა იტერაციული ალგორითმი BS-ზე გადაცემის წინასწარი კოდირების და RIS-ზე პასიური სხივის ფორმირების ერთობლივი ოპტიმიზაციისთვის, რისი საშუალებითაც მოხდა ერთობლივი შეწონილი ჯამური სიჩქარის (WSR)

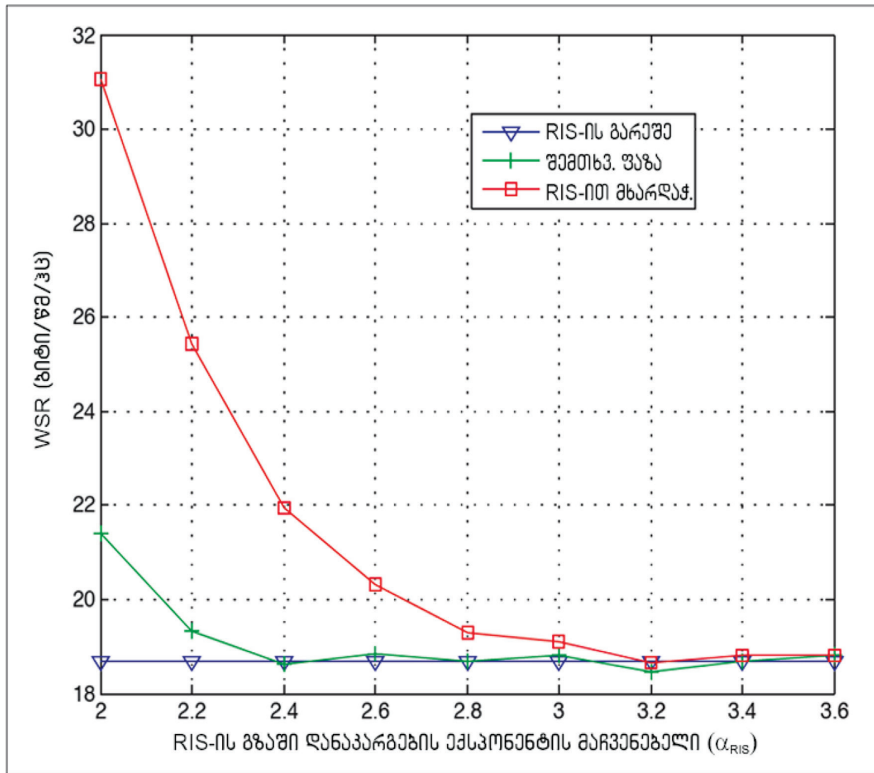
მაქსიმიზაცია. ქვემოთ ჩვენ მას (ეწოდება „RIS-ით მხარდაჭერილი“) შემდეგ ორ ეტალონურ სქემას ვადარებთ:

- შემთხვევითი ფაზით: ხდება RIS-ის ფაზური წანაცვლებების შემთხვევითი წესით გენერირება დიაპაზონიდან $[0, 2\pi]$. გადაცემის წინასწარი კოდირება BS-ზე შექმნილია სპეციალურად შემუშავებული მეთოდით;
- RIS-ის გარეშე: სისტემაში არ არის RIS.



ნახ. 2.3. კომპიუტერული სიმულაციის დაყენება

პირველ რიგში, ჩვენ ვსწავლობთ RIS-თან დაკავშირებული გზაში დანაკარგების ექსპონენტის მაჩვენებლის (α_{RIS}) ზემოქმედებას WSR მახასიათებელზე (იხ. ნახ. 2.4). ამ ნახაზიდან ჩანს, რომ RIS-ის მხარდაჭერით მიღწეული WSR მცირდება α_{RIS} -ის გაზრდით, დაბოლოს, კონვერგირდება RIS-ის გარეშე სქემის WSR-თან. ამის მიზეზი ის არის, რომ α_{RIS} -ის გაზრდით, RIS-თან დაკავშირებული ლინკები განიცდის სიგნალის მკვეთრ მიღევას და შესაბამისად, RIS-ის მიერ არეკლილი სიგნალი ძალიან სუსტდება. თუმცა, როდესაც α_{RIS} მცირეა, RIS-ის გამოყენებით მიიღწევა მახასიათებლის მნიშვნელოვანი გაუმჯობესება RIS-ის გარეშე მოქმედ სცენართან შედარებით. ეს იძლევა მნიშვნელოვან კონსტრუქციულ მინიშნებას, რაც გვიჩვენებს, რომ RIS-ის მდებარეობა ფრთხილად უნდა შევარჩიოთ, რათა თავიდან იქნას აცილებული დაბრკოლებები, როგორც BS-RIS-ის, ასევე RIS-მომხმარებლის ლინკზე.

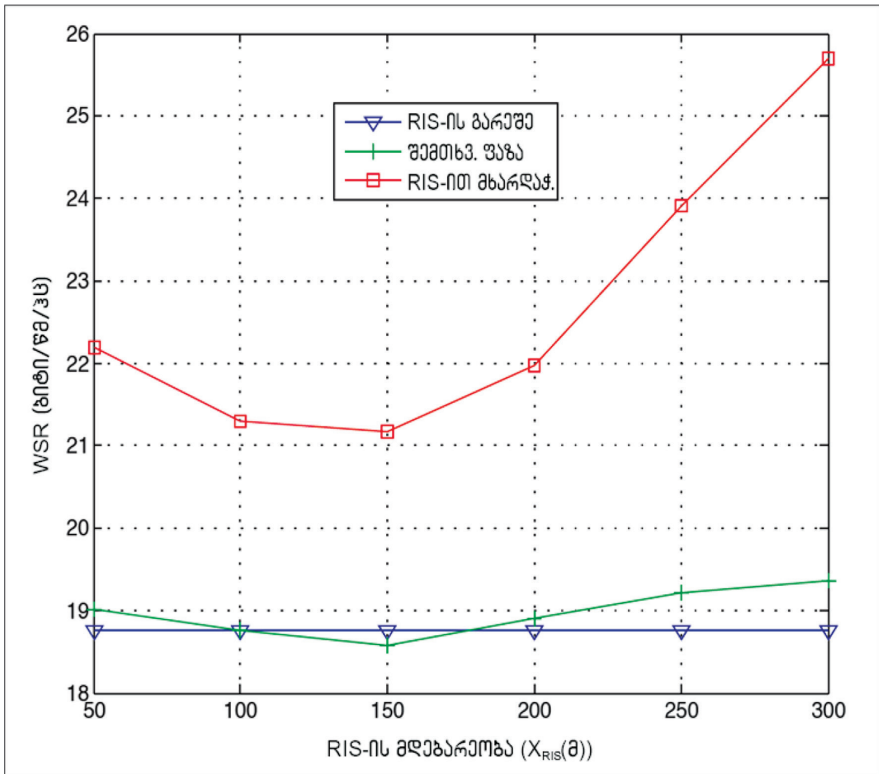


ნახ. 2.4. შეწონილი ჯამური სიჩქარის დამოკიდებულება RIS-ის გზაში დანაკარგების ექსპონენტის მაჩვენებელზე α_{RIS}

ამის შემდეგ, RIS-ის მდებარეობის (X_{RIS}) ზემოქმედება WSR მახასიათებელზე კომპიუტერული სიმულაციით შეფასებულია ნახ. 2.5-ზე, სადაც RIS გადადის $X_{RIS} = 50$ მ-დან (პირველი ფიჭის ცენტრი) $X_{RIS} = 300$ მ-მდე (ფიჭის საზღვარზე). ნაჩვენებია, რომ RIS-ით მხარდაჭერილი ალგორითმი, დანარჩენ ორ საორიენტაციო სქემასთან შედარებით, საუკეთესო მახასიათებელს უზრუნველყოფს.

საინტერესოა დაკვირვება, რომ RIS-ით მხარდაჭერილი ალგორითმით მიღებული WSR ჯერ მცირდება, როდესაც $50 \text{ m} < X_{RIS} < 150 \text{ m}$ და შემდეგ იზრდება X_{RIS} -თან ერთად. ეს ასევე ნათელი ხდება სპეციალური შემთხვევის განხილვისას, როდესაც RIS მდებარეობს BS-სა და მომხ-

მარეზლის ცენტრალურ წერტილს შორის ხაზზე. BS-სა და RIS-ს შორის მანძილი აღნიშნოთ d -თი, ხოლო BS-სა და მომხმარებლის ცენტრალურ წერტილს შორის D -თი. მათემატიკური ანალიზი გვიჩვენებს, რომ მინიმალური WSR მნიშვნელობა მიიღწევა, როდესაც RIS მდებარეობს შუა წერტილში ($d = D/2$), რაც შეესაბამება ნახ. 2.5-ის სიმულაციის შედეგებს. გარდა ამისა, მიღწეული WSR, როდესაც RIS არის ფიჭის საზღვარზე, გაცილებით მაღალია, ვიდრე იმ შემთხვევაში, როდესაც RIS არის ფიჭის ცენტრში. ეს იმიტომ ხდება, რომ RIS-ის განთავსება BS 1-თან ახლოს, მხოლოდ პირველი ფიჭის მომხმარებლებისთვის არის მომგებიანი, მაშინ როდესაც ყველა მომხმარებელი პოულობს სარგებლობს RIS-ით, როდესაც ის ფიჭის საზღვარზეა.



ნახ. 2.5. შეწონილი ჯამური სიჩქარის დამოკიდებულება RIS-ის მდებარეობაზე

2.3. RIS-თან დაკავშირებული გამოწვევები და კვლევის მიმართულებები

მიუხედავად იმისა, რომ RIS-ები მართლაც მიმზიდველია ზემოაღნიშნული აპლიკაციებისთვის, მათი განხორციელება ასევე ქმნის რამდენიმე გამოწვევას. ქვემოთ ჩამოვთვლით სამომავლო კვლევის რვა პერსპექტიულ მიმართულებას.

მიმართულება 1: არხის შეფასება

RIS-ით მხარდაჭერილი უსადენო ქსელების ფუნქციონირებისას სრული სარგებლის მისაღებად, CSI უნდა შეფასდეს ფაზის წანაცვლების დიზაინის მხარდაჭერის კუთხით. ჩვენ შეიძლება განვიხილოთ თითქმის მყისიერი CSI და გრძელვადიანი CSI.

თითქმის მყისიერ CSI-ის შეფასებასთან დაკავშირებით, ჩვენ განვიხილავთ RIS-ით მხარდაჭერილ უსადენო სისტემას, სადაც მრავალანტენიანი BS ემსახურება ერთანტენიან მომხმარებელს RIS-ის დახმარებით. აღვნიშნოთ არხი, რომელიც განთავსებულია BS-დან RIS-მდე და RIS-დან მომხმარებელამდე, შესაბამისად H-ით და h_r -ით. უმეტეს სიტუაციაში საკმარისია მხოლოდ ორი ნახტომისთვის (ჰოპისთვის) განსაზღვრული კასკადური CSI-ის ქონა, რომელიც განსაზღვრულია როგორც $G = \text{diag}(h_r^H)H$. თუმცა, ვინაიდან ამრეკლავი ელემენტების რაოდენობა ჩვეულებრივ ძალიან დიდია, კასკადური G არხი შეიცავს არხის კოეფიციენტების დიდ რაოდენობას. აქედან გამომდინარე, მათი შეფასება მოითხოვს ბევრ პილოტ-სიგნალს, რომელიც პროპორციულია ამრეკლავი ელემენტების რაოდენობის. თუ როგორ შევამციროთ არხის შეფასების ოვერჰედი, ეს საკითხი ღია პრობლემად რჩება.

გრძელვადიანი CSI-ზე დაფუძნებული ფაზის ცვლის დიზაინის გასაადვილებლად, კუთხის ან ადგილმდებარეობის ინფორმაცია ხელმისაწვდომი უნდა იყოს BS-ზე. სამწუხაროდ, კუთხის/მდებარეობის შეფასების ჩვეულებრივი ალგორითმები შეიძლება არ იყოს მისადაგებული RIS-ით მხარდაჭერილი ქსელებისთვის, როდესაც პირდაპირი არხი, რომელიც

ვრცელდება BS-დან მომხმარებლამდე, დაბლოკილია. ეს იმიტომ ხდება, რომ ჩვეულებრივ BS-ის შეუძლია გადასცეს საპილოტე სხივები მომხმარებლის თვალყურის დევნებისთვის, ხოლო RIS არის პასიური და შესაბამისად, არ შეუძლია პილოტ-სიგნალების გაგზავნა. ამრიგად, კუთხის/მდებარეობის შეფასების დაბალი სირთულის, მაგრამ მაღალი ხარისხის ალგორითმები უნდა შემუშავდეს RIS-ის მხარდამჭერი ქსელებისთვის.

მიმართულება 2: არასრულყოფილ პარამეტრებზე დაფუძნებული პასიური სხივის ფორმირების დიზაინი

მოსალოდნელი CSI-ის გათვალისწინებით, ფაზური წანაცვლებები ერთობლივად უნდა იყოს დაპროექტებული BS-ის სხივის აქტიურ ფორმირებასთან ერთად, სასურველი მიზნების მისაღწევად. თუმცა, არსებული კვლევითი შედეგების უმეტესობა დაფუძნებულია სრულყოფილი მყისიერი CSI-ის ხელმისაწვდომობაზე, რაც პრაქტიკაში არარეალურია. კასკადური CSI-ის შესაფასებლად, ჯერ უნდა შეფასდეს BS-სა და მომხმარებელს შორის პირდაპირი არხი, სადაც RIS გამორთულია, შემდეგ კი მთლიანი არხის შეფასება მოხდეს RIS-ის ჩართვით. კასკადური CSI შეიძლება გამოითვალოს BS-ის მომხმარებლის პირდაპირი არხის გამოძახილის არხის საერთო გამოძახილიდან გამოკლებით. ვინაიდან BS-ის მომხმარებლის პირდაპირი არხის სრულყოფილად შეფასება შეუძლებელია, გამოკლების ოპერაცია კიდევ უფრო დააბინძურებს კასკადურ CSI-ის, რაც მსგავსია ინტერფერენციების მიმდევრობითი ჩახშობის პროცესში შეცდომის გავრცელების. ამრიგად, კასკადური CSI-ის შეცდომა არის მნიშვნელოვანი და გასათვალისწინებელი. თავდაპირველი კვლევები დაეთმო RIS-ით მხარდაჭერილ მრავალმომხმარებლიან დაუნლინკის მარტივ სცენარს და მომავალში აუცილებელად უნდა იყოს შესწავლილი გამოყენებების უფრო რთული სცენარებიც.

არასრულყოფილი CSI-ის გარდა, ჩვენ ვხვდებით ტრანსსივერის რეალურ აპარატურულ გაუარესებებს (HWI), რომელიც გამოწვეულია არაწრფივი გამაძლიერებლებით, ანალოგურ-ციფრული გარდამქმნე-

ლების (ADC) დაბალი გარჩევადობით და არასრულყოფილი ოსცილატორებით. აპარატურული საშუალებების ღირებულებისა და ენერჯის მოხმარების შესამცირებლად, შეიძლება გამოყენებულ იქნას ფაზის წანაცვლებების დაქვანტვის შეზღუდული რაოდენობა. ეს შემოიტანს დაქვანტვის ხმაურს RIS ელემენტების ფაზურ წანაცვლებებზე. გარდა ამისა, ფართოდ გავრცელებული, მხოლოდ ფაზის მიხედვით ასახვის მოდელი, პრაქტიკაში ზუსტი არ არის, რადგან ასახვის ამპლიტუდა თავად ფაზის წანაცვლების მნიშვნელობაზეა დამოკიდებული. RIS-ის გარეშე მომუშავე ჩვეულებრივ სისტემებთან შედარებით, HWI-ების გავლენა RIS-ით მხარდაჭერილ სისტემებში მნიშვნელოვანია RIS-ში დაქვანტული ფაზის არსებობის გამო. აქედან გამომდინარე, საჭიროა გადაცემის საიმედო სქემა, რომელიც ითვალისწინებს HWI-ებს როგორც ტრანსივერებში, ასევე RIS-ზე.

მეორე მხრივ, თითქმის მყისიერი CSI-ის მოპოვება შეიძლება რთული იყოს შემდეგი მიზეზების გამო: ჯერ ერთი, ტრენინგის ოვერჰედი ძალიან გადატვირთულია, როდესაც ამრეკლავი ელემენტების რაოდენობა დიდია. გარდა ამისა, BS-მა უნდა გამოთვალოს მისი სხივის ფორმირების წონა, ისევე როგორც ფაზური წანაცვლებები RIS-ზე, რაც გულისხმობს ფართომასშტაბიანი ოპტიმიზაციის პრობლემის გადაჭრას. დაბოლოს, როდესაც RIS-ის ელემენტების რაოდენობა დიდია და არხის პარამეტრები სწრაფად იცვლება, BS-დან RIS-მდე უკუკავშირის არხის საჭირო გამტარუნარიანობა იზრდება, რაც იწვევს დიდ ოვერჰედს და ძალაღ ხარჯებს. ამ გამოწვევების საპასუხოდ, მიმზიდველია ფაზური წანაცვლებების შემუშავება გრძელვადიან CSI-ზე დაყრდნობით, როგორც კუთხის, ასევე ადგილმდებარეობის შესახებ ინფორმაციის მიხედვით, რომელიც ბევრად ნელა იცვლება. სამწუხაროდ, კვლევის ამ სფეროს ძალიან მცირე ნაშრომები აქვს მიძღვნილი.

მიმართულება 3: განაწილებული ალგორითმები ოვერჰედის მცირე გავლლით

RIS-ით მხარდაჭერილ მრავალფიჭიან სცენარში, გადაცემის სქემა ცენტრალიზებულია. კერძოდ, შემოთავაზებულია ალგორითმი, რომელიც მოითხოვს CPU-ის ქსელში ყველა კომპლექსური მნიშვნელობის მქონე არხის მატრიცების შეგროვებას. CPU ითვლის აქტიური სხივის ფორმირების ყველა წონას, ფაზურ წანაცვლებას და შემდეგ აგზავნის მათ შესაბამის კვანძებში. თუმცა, ეს ცენტრალიზებული ალგორითმები შეიცავს უკუკავშირის კუთხით „მძიმე“ ოვერჰედს და მაღალ გამოთვლით სირთულეს, რაც დაბრკოლებას წარმოადგენს. გასათვალისწინებელია, რომ RIS-ისგან თავისუფალ ჩვეულებრივ სისტემებთან შედარებით, დიდი განზომილების მქონე არხების კასკადური მატრიცა დამატებით უნდა მიეწოდოს CPU-ს.

აქედან გამომდინარე, აუცილებელია განაწილებული ალგორითმების შემუშავება, სადაც თითოეულ BS-ის შეუძლია გადაცემის გადაწყვეტილების მიღება მისი ადგილობრივ CSI-ზე და სხვა BS-ებთან შეზღუდული ინფორმაციის გაცვლაზე დაყრდნობით. განაწილებულ ალგორითმებს აქვს მიმზიდველი უპირატესობები ცენტრალიზებულ ალგორითმებთან შედარებით. მაგალითად: ინფორმაციის გაცვლის დაბალი ღირებულება, შემცირებული გამოთვლითი სირთულე და გაზრდილი მასშტაბურობა.

მიმართულება 4: *სისტემის პროექტირება RIS-ით მხარდაჭერილი დუპლექსური სისტემებისათვის სიხშირული დაყოფით*

RIS-თან დაკავშირებული არსებული კვლევების უმეტესობა განიხილავს არხის შეფასებას დუპლექსი დროითი დაყოფით (TDD) შემუშავებული იმპლემენტაციისთვის, არხის ორმხრივობის მიმზიდველი მახასიათებლის გამო. თუმცა, ბოლოდროინდელმა შედეგებმა გამოავლინა, რომ RIS-ის ფაზის წანაცვლების მოდელი დამოკიდებულია დაცემულ ელექტრომაგნიტურ კუთხეებზე, რაც გულისხმობს, რომ TDD სისტემებში არხის ორმხრივობის დაშვება შეიძლება პრაქტიკაში არ იყოს დაცული. აქედან გამომდინარე, RIS სისტემებისთვის აუცილებელია არხის შეფასების და გადაცემის სქემის შესწავლა – დუპლექსი სიხშირული დაყოფით (FDD). RIS-ში ამრეკლავი ელემენტების დიდი რაოდენობის გამო,

დიდი განზომილების მქონე არხის მატრიცები FDD RIS სისტემებში უნდა ბრუნდებოდეს უკან BS-ში, რაც იწვევს უკუკავშირის დიდ ოვერჰედს.

მიმართულება 5: RIS-ის გამოყენება ტერაჰერცულ კომუნიკაციებში

მმტ კომუნიკაციებთან შედარებით, ტერაჰერცულ კომუნიკაციებს შეუძლია სიხშირის გატარების უფრო ფართო ზოლი და მონაცემთა გადაცემის უფრო მაღალი სიჩქარე უზრუნველყოს. მიუხედავად ძალიან ფართო სიხშირის გატარების ზოლისა, ტერაჰერცული სიხშირეები განიცდის ძლიერ ატმოსფერულ მილევას, მოლეკულურ შთანთქმას და შესაბამისად, უკიდურესად დიდ დანაკარგებს გზაში, რაც ზღუდავს მათ ოპერაციულ დიაპაზონს. უფრო მეტიც, ასეთი მაღალი სიხშირის სიგნალები ძლიერ მიდრეკილია ბლოკირების ეფექტებისკენ და შესაბამისად, მათ არ შეუძლია საიმედო საკომუნიკაციო ლინკების მხარდაჭერა. ეს ნაკლოვანებები აფერხებს სისტემის პრაქტიკულ განხორციელებას. RIS-ების გამოყენება პერსპექტიული საშუალებაა ამ პრობლემების გადასაჭრელად, მათი უნარის გამო, შექმნან სიგნალის გავლის ალტერნატიული გზები. ტერაჰერცულ დიაპაზონში გზაში დანაკარგების პიკები ჩნდება სხვადასხვა სიხშირულ დიაპაზონში და შესაბამისად, მთლიანი სიხშირის გატარების ზოლი უნდა დაიყოს რამდენიმე ქვეჯგუფად, რომლებსაც აქვთ განსხვავებული გამტარობა. გარდა ამისა, ტერაჰერცული ელექტრონული კომპონენტები შეიძლება იყოს კომპაქტური და შესაბამისად, RIS-ს შეუძლია განათავსოს პაწაწინა ამრეკლავი ელემენტების დიდი რაოდენობა, რაც საშუალებას გვაძლევს მოვახდინოთ ჰოლოგრაფიული მესრის რეალიზაცია, რომელსაც თითქმის უწყვეტი აპერტურა აქვს. აქედან გამომდინარე, არხის შეფასება და სხივის მიმართულობის დიაგრამის დიზაინი RIS-ის დახმარებით, ტერაჰერცული კომუნიკაციებისთვის საინტერესო სფეროა მომავალი კვლევისთვის.

მიმართულება 6: მობილურობის მართვა

მობილურობის მართვა რთული პრობლემაა RIS-ით მხარდაჭერილი უსადენო ქსელებისთვის. მომხმარებელთა სწრაფი გადაადგილების

გამო, BS-მა შეიძლება დაკარგოს კავშირი მათთან, თუ მობილურობის მართვის სწრაფი სქემები არ იქნება გამოყენებული. ვინაიდან RIS-ები პასიურია, მათ არ შეუძლია პილოტ-სიგნალების გაგზავნა მომხმარებლების მოძრაობის თვალყურის დევნებისთვის. აქედან გამომდინარე, ბევრად რთულია როუმინგის მომხმარებლების თვალყურის დევნება, განსაკუთრებით მაშინ, როდესაც პირდაპირი კავშირები BS-სა და მომხმარებლებს შორის დაბლოკილია.

მიმართულება 7: განლაგების საკითხები

RIS-ის ამრეკლავი ელემენტების განლაგების სტრატეგია მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს RIS-თან დაკავშირებული არხის კოეფიციენტების გენერირებაზე და შესაბამისად, სისტემის მახასიათებლის ზღვრულ მნიშვნელობაზე. პრაქტიკული განხორციელების პერსპექტივიდან გამომდინარე, RIS-ის დანერგვისას უნდა გაითვალისწინონ აპარატურის ღირებულება, ადგილმდებარეობის ხელმისაწვდომობა, მომხმარებელთა განაწილება და მოთხოვნილი სერვისები. აუცილებელია შემდეგ ფუნდამენტურ კითხვაზე პასუხის გაცემა: ამრეკლავი ელემენტების მთლიანი რაოდენობის გათვალისწინებით, უკეთესია თუ არა ცენტრალიზებული განლაგება, ვიდრე განაწილებული? ამ კითხვაზე პასუხის გასაცემად, ჩვენ უნდა შევეხოთ შემდეგ ორ კვლევით საკითხს:

- ცენტრალიზებული განლაგებისთვის, სად უნდა განთავსდეს RIS: BS-ის ან მომხმარებლების სიახლოვეს, თუ სადმე სხვაგან BS-სა და მომხმარებელს შორის?
- განაწილებული განლაგებისთვის, RIS-ების რამდენ მცირე ზომის ჯგუფად უნდა დაიყოს ამრეკლავი ელემენტების საერთო რაოდენობა? სად უნდა განთავსდეს ეს უფრო მცირე ზომის RIS-ები?

მიმართულება 8: AI-ზე ორიენტირებული დიზაინი და ოპტიმიზაცია

RIS-ის ფაზური წანაცვლების მატრიცები უნდა იყოს ოპტიმიზებული სისტემის მახასიათებლების გასაუმჯობესებლად. პრაქტიკული განლაგების პროცესში, თითოეული RIS აღჭურვილია ასობით ამრეკლავი ელემენტებით.

მენტით. ფაზური წანაცვლების დიზაინთან დაკავშირებული არსებული კვლევების უმეტესობა ეყრდნობა მოდელზე დაფუძნებულ ოპტიმიზაციის მეთოდებს, რომლებიც საჭიროებს იტერაციების დიდ რაოდენობას ოპტიმალური გადაწყვეტილების მოსაძებნად, რაც განპირობებულია ფაზური წანაცვლების შეზღუდვების ფუნქციის არაამოხსნეილობით და მიზნობრივი ფუნქციის არაამოხსნეილი ბუნებით. ამრიგად, არსებულ მეთოდებს ექნება მაღალი გამოთვლითი სირთულე, რაც მათ უვარგის ხდის დროის რეალური მასშტაბის აპლიკაციებისთვის. ამ საკითხის გადასაჭრელად, ხელოვნური ინტელექტის საფუძველზე დაფუძნებული მეთოდი არის მონაცემების მართვის მიმზიდველი სქემა, რომელსაც შეუძლია ამოიღოს სისტემის მახასიათებლები კონკრეტული მათემატიკური მოდელის გარეშე. ტრენინგის შემდეგ, ოპტიმალური გადაწყვეტის პოვნა შესაძლებელია მარტივი ალგებრული გამოთვლებით. გარდა ამისა, ტრენინგის მოდელი შეიძლება იყოს საკმაოდ მდგრადი, როგორც არასრულყოფილი CSI-ის, ასევე აპარატურული უზრუნველყოფის გაუფასურების მიმართ.

2.4. მეორე თავის დასკვნა

ამ თავში ჩვენ ვუპასუხეთ RIS-თან დაკავშირებულ რამდენიმე კრიტიკულ კითხვას. გარდა ამისა, ჩვენ ვაჩვენეთ, რომ მათ შეუძლიათ შეამსუბუქონ მმტ და ტერაჰერცულ კომუნიკაციებთან დაკავშირებული ბლოკირებისა და დაფარვის პრობლემები. ჩვენ მოკლედ წარმოვადგინეთ RIS ტექნიკის ძირითადი არქიტექტურა და მისი მთავარი დადებითი მხარეები. ჩვენ ასევე განვიხილეთ მათი პოტენციური ინტეგრაცია ახალ უსადენო აპლიკაციებში, როგორებიცაა: მრავალფიჭიანი ქსელები, მრავალმისამართიანი გადაცემა, SWIPT, MEC, NOMA, PLS, CR სისტემები და მმტ. დაბოლოს, სასარგებლო რეკომენდაციების უზრუნველსაყოფად და დამატებითი კვლევის ინტერესის გასაღვივებლად, ჩვენ ასევე წარმოვადგინეთ რვა პერსპექტიული კვლევითი მიმართულება.

თავი 3. ტერაჰერცული უსადენო კომუნიკაციები 2030 წლისთვის და შემდგომ პერიოდში

3.1. შესავალი

5G-ის სწრაფი განვითარებით, არა მხოლოდ ადამიანები იქნებიან უკეთესად დაკავშირებული, არამედ უფრო და უფრო მეტი ინტელექტუალური საგანიც, როგორცაა: სამრეწველო აღჭურვილობა, მანქანები, სენსორები და სახლის მოწყობილობები. ეს ტენდენცია გაგრძელდება 2030 წლის შემდეგაც, რაც გამოიწვევს ყველაფრის ინტელექტუალურ კავშირს ყველაფერთან, ნებისმიერ ადგილას და ნებისმიერ დროს. ურთიერთდაკავშირებული მოწყობილობების რაოდენობის ექსპონენტურ ზრდასთან ერთად, 6G 2030 წელს და მის შემდგომ პერიოდში პროგნოზირებს ძირითადი მახასიათებლების ინდიკატორებს (KPI), რომელთაც განეკუთვნება:

- ასობით გიგაბიტი წამში და თუნდაც, ტერაბიტი წამში გადაცემის სიჩქარე;
- დაბალი შეყოვნება, რომელიც შეადგენს მილიწამის დაახლოებით ერთ მეათედს და პრაქტიკულად, ნულოვანი ჯიტერი;
- პოზიციონირების და ზონდირების უფრო მაღალი გარჩევადობა და სიზუსტე მილიმეტრულ დონეზე;
- ენერჯის შემცირებული მოხმარება და 100-ჯერ გაუმჯობესებული ენერგოეფექტიანობა;
- გაუმჯობესებული, 99.99999-პროცენტისანი საიმედოობა, უსაფრთხოება და მასშტაბურობა.

მომავალი უსადენო კომუნიკაციების ამ მოთხოვნების მხარდასაჭერად, ამერიკის შეერთებული შტატების სტანდარტებისა და ტექნოლოგიების ეროვნული ინსტიტუტი მომავალი თაობის უსადენო კვლევისა და განვითარების ხარვეზის შესახებ აცხადებს, რომ „მომავალი თაობის ქსელებმა უნდა გამოიყენონ უფრო მაღალი სიხშირეები (6 გჰც-ზე მეტი

და ტ3ც-მდე) არსებულ ტექნოლოგიებთან (6 გ3ც-ის ქვემოთ) ერთად, რათა დააკმაყოფილონ მახასიათებლის მოლოდინები მომხმარებლის უწყვეტი კავშირის უზრუნველყოფის, გაუმჯობესებული სიჩქარისა და ულტრასაბიძობის კუთხით“. ამ მიზნით, ტერაჰერცული სიხშირული დიაპაზონით (0.1 – 10 ტ3ც) კომუნიკაცია არის პერსპექტიული საყრდენი ტექნოლოგია 6G-ის მოთხოვნების შესასრულებლად 2030 წლისთვის და შემდგომ პერიოდში.

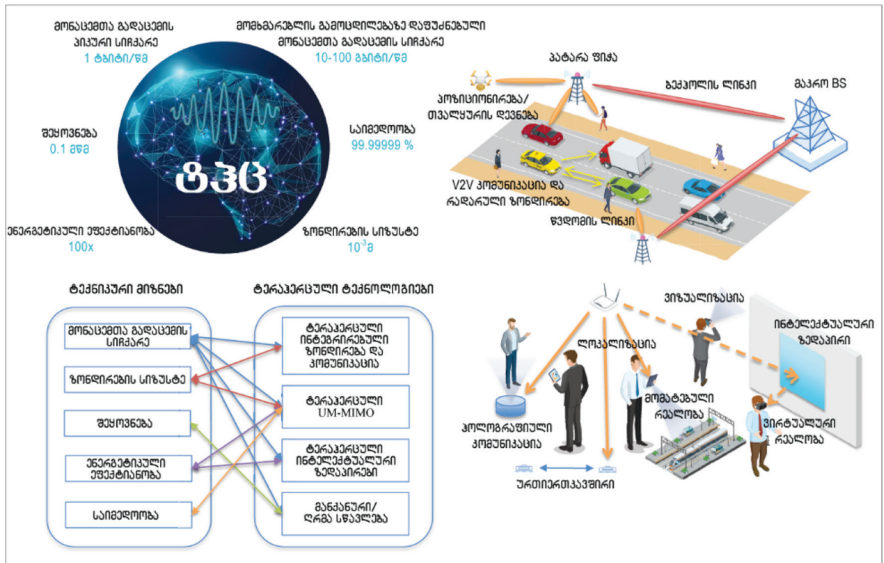
ტერაჰერცული სიხშირული დიაპაზონის გამოყენება გახსნის ახალ აპლიკაციებს მომავალი, მონაცემთა ულტრამაღალი სიჩქარის კომუნიკაციისთვის და მაღალი გარჩევადობით ზონდირებისთვის; მათ შორის აღსანიშნავია შენობებს შიდა უსადენო ლინკები ტერაბიტი წამში გადაცემის სიჩქარით (მაგალითად, ვირტუალური და მომატებული რეალობისთვის და ჰოლოგრაფიული კომუნიკაციისთვის), უსადენო ბექჰოლი და წვდომა ქსელებში მცირე რაოდენობის ფიჭებით, ასევე მიკრო/ნანო-მასშტაბიან მანქანებსა თუ ნანომანქანებს შორის ურთიერთკავშირი. საკომუნიკაციო გამოყენებების გარდა, ტერაჰერცული დიაპაზონი ასევე გზას გაუხსნის მაღალი გარჩევადობისა და სიზუსტის ზონდირების სცენარებს, მათ შორის მილიმეტრული გარჩევადობის უსადენო პოზიციონირებას და თვალყურის დევნებას, მაღალი სიზუსტის ვიზუალიზაციას და კარტოგრაფირებას ჟესტებისა თუ მოძრაობის ამოცნობით, ასევე, გაფართოებულ ადამიანურ შეგრძნებებს.

მიუხედავად იმისა, რომ ფლობს ულტრაფართო სიხშირის გატარების ზოლს, ტერაბიტი წამში უსადენო გადაცემის სიჩქარის მხარდასაჭერად, ტერაჰერცული კომუნიკაციებისთვის არსებობს ორი მთავარი გამოწვევა – დაფარვის მანძილის შეზღუდვის დამლევა და ენერგოეფექტიანობის გაუმჯობესება ტერაჰერცული მახასიათებლების შემდეგი თავისებურებების გათვალისწინებით: ერთი მხრივ, გადამტანი სიხშირეების მნიშვნელობების ზრდასთან და ულტრამოკლე ტალღის გამოყენებასთან ერთად, ტერაჰერცული ტალღა გავრცელების პროცესში განიცდის უფრო

მაღალ დანაკარგებს, ისევე როგორც არაპირდაპირი ხედვის ხაზის (NLoS) გავრცელების დანაკარგებს, რომლებიც გამოწვეულია დიფუზური გაფანტვით და სარკისებრი არეკვლით, დიფრაქციითა და დაჩრდილვით. გარდა ამისა, ის კიდევ უფრო სუსტდება ამინდის გავლენით გავრცელების გარემოში ატმოსფერული ზემოქმედების გამო. მეორე მხრივ, ტერაჰერცული გადაცემების ნაკლებობას მაღალი გადაცემის სიმძლავრით, მიყვარტ უფრო დაბალ სიმძლავრესთან, ვიდრე მიკროტალღურ დიაპაზონში. მიუხედავად იმისა, რომ შესაძლებელია გადაცემული სიგნალის სიმძლავრის გაზრდა ფაზირებული საანტენო მესრის არქიტექტურის გამოყენებით, ეს ხდება მაღალი მიმართულობის მქონე გამოსხივების გამოყენების ხარჯზე. იმავდროულად, ხმაურის სიმძლავრე იზრდება გამოყენებული სიხშირის გატარების ზოლის პროპორციულად და მიმდებარის ხმაურის კოეფიციენტი მიკროტალღურ დიაპაზონთან შედარებით, დაახლოებით 10 დბ-ით უფრო მაღალია.

როგორც მიმოხილულია ნახ. 3.1-ზე, ამ თავში, 6G ტერაჰერცული კომუნიკაციებისთვის, ჩვენ ვიკვლევთ ოთხ ინტერდისციპლინურ ტექნოლოგიას, რათა გადავლახოთ მანძილის შეზღუდვა და გავზარდოთ ენერგოეფექტიანობა. პირველ რიგში, ჩვენ ვაანალიზებთ ტერაჰერცულ ინტეგრირებულ ზონდირებასა და კომუნიკაციას (ISAC), რომელიც იძლევა სპექტრის, აპარატურის, სიგნალების დამუშავების გაზიარების შესაძლებლობას და მახასიათებლების ერთობლივად გაუმჯობესების საშუალებას. ამასთან, ჩვენ ვაპროექტებთ UM-MIMO-ს და განვიხილავთ სხივის ჰიბრიდულ ფორმირებას, რომლისთვისაც გამოიყენება ქვემესრების დინამიკური მატრიცა ენერგოეფექტიანობის გასაზრდელად და ფიქსირებული ჭეშმარიტი დროითი დაყოვნება (FTTD) სხივის მიმართულების ცვლილების (გადახრის) შესამცირებლად. ამის შემდეგ, ჩვენ განვსაზღვრავთ ინტელექტუალური ზედაპირების (IS) დიზაინს რეკონფიგურირებადი უსადენო გარემოს რეალიზაციისთვის. IS-ების და ჰოლოგრაფიული MIMO-ს ჭკვიანი განლაგებით, ტერაჰერცულ IS-ებს შეუძლია ეფექტიანად მოაგვაროს LoS-

ის ბლოკირების პრობლემა, გააუმჯობესოს სიგნალის დაფარვა და ფიზიკური ფენის უსაფრთხოება. დაბოლოს, ჩვენ მივმართავთ მანქანურ/ღრმა სწავლებას, რათა გადაწყდეს ტერაჰერცულ კომუნიკაციებთან დაკავშირებული მაღალი განზომილების, დაუცველი გადაცემის და მოდელის გარეშე ფუნქციონირების პრობლემები. თითოეული ზემოაღნიშნული ტექნოლოგიისთვის ამ თავში შესწავლილია ახალი კვლევის მიმართულებები და ძირითადი იდეები. იმავდროულად, ზემოთ აღნიშნულ ტექნოლოგიებზე ინტერდისციპლინური კვლევები განხილულია ღია პრობლემების და მათი შესაძლო გადაწყვეტილებების წარმოდგენით. განხილულია ამ ტექნოლოგიების ინტეგრაცია ტერაჰერცულ უსადენო კომუნიკაციების სრული პოტენციალის გამოსავლენად და 2030 წლის, ასევე შემდგომი პერიოდის KPI-ების დასაკმაყოფილებლად, მანძილის შეზღუდვისა და ენერჯის მოხმარების პრობლემასთან ერთად. ძირითადი იდეებისა და ღია პრობლემების გარდა, წარმოდგენილია ამ ტერაჰერცული ინტერდისციპლინური ტექნოლოგიების რიცხვითი შეფასებები.



ნახ. 3.1. 6G-ის მოთხოვნები და გამოყენებები, განპირობებული ოთხი ტერაჰერცული ტექნოლოგიით

3.2. ტერაპერცული ინტეგრირებული ზონდირება და კომუნიკაცია

6G კომუნიკაციებში ყველაფრის აღქმის და დაკავშირების ტენდენციის შესაბამისად, მოსალოდნელია, რომ ტერაპერცული უსადენო სისტემები ერთდროულად გადასცემენ მონაცემთა მილიარდობით ნაკადს და შეიგრძნობენ გარემოს ან ადამიანის აქტივობას, რაც გულისხმობს ტერაპერცულ ISAC-ს. ერთი მხრივ, სიხშირული ზოლების, აპარატურის და სიგნალის დამუშავების მოდულების გაზიარებით, ტერაპერცული კომუნიკაციისა და ზონდირების ინტეგრაციამ შეიძლება გაზარდოს სპექტრული ეფექტიანობა და შეამციროს აპარატურული ღირებულება და გამოთვლითი სირთულე. მეორე მხრივ, ტერაპერცული სიგნალებიდან ფუნქციებისა და ინფორმაციის ამოღებით, ტერაპერცულ ISAC-ს შეუძლია ხელი შეუწყოს კომუნიკაციისა და ზონდირების ურთიერთდახმარებას და შემდგომში უზრუნველყოს ტერაბიტი წამში სიჩქარიანი ლინკები და მილიმეტრული დონის ზონდირების სიზუსტე.

ინტეგრაციის მზარდობის დონით ტერაპერცული ISAC სისტემები შეიძლება დაიყოს რამდენიმე კლასად. ქვედა დონეზე, კომუნიკაციისა და ზონდირების თანაარსებობა ხელს უწყობს ამ ორი ფუნქციისთვის ერთი და იმავე სიხშირული სპექტრის გაზიარებას და აუმჯობესებს სპექტრულ ეფექტიანობას. ტიპური სცენარი არის საკომუნიკაციო სისტემა, რომელიც იზიარებს იმავე სიხშირის დიაპაზონს თანამდებარე სარადარო სისტემასთან, სადაც ინტერფერენცია მთავარი პრობლემაა. მიუხედავად იმისა, რომ ვიწრო სხივებს შეუძლია შეასუსტოს ასეთი ინტერფერენცია ტერაპერცულ დიაპაზონში, 6G ქსელების განთავსების მაღალმა სიმკვრივემ შესაძლოა გამოიწვიოს სერიოზული ხელშეშლები. ამრიგად, საჭიროა ინტერფერენციის მართვის ეფექტიანი მეთოდები, რათა ავიცილოთ კომუნიკაციისა და ზონდირების სიგნალების კონფლიქტი. მეორე დონეზე, სისტემის აპარატურა ნაწილობრივ ან სრულად არის გაზიარებული; მაგალითად, გამოყენებულია საერთო რადიოსიხშირული ინტერფეისი. კერძოდ, მილიმეტრული ტალღის რადარისა და 5G საკომუნი-

კაციო ტრანსივერის ერთ ჩიპზე ინტეგრაციისთვის შემოთავაზებულია სუბპარმონიკული ინექციის ბლოკირება. ამ შემთხვევაში, ინტეგრირებული სისტემას შეუძლია გააზიაროს აპარატურა, თუმცა ცალკე გადაცემული სიგნალების გამოყენებით, რამაც შეიძლება შეამციროს სისტემის ღირებულება, ზომა და წონა. ინტეგრაციის უფრო მაღალი დონის მისაღწევად, საერთო გადაცემული ტალღის ფორმა ერთობლივად უნდა იყოს შემუშავებული და ოპტიმიზებული როგორც კომუნიკაციისთვის, ასევე ზონდირებისთვის. ერთი გადაცემული ტალღის ფორმის დამუშავებისას, ზონდირება და კომუნიკაცია შესაძლებელია სრულად იყოს გაზიარებული გადამცემი აპარატურული უზრუნველყოფის და სიგნალთა დამუშავების მოდულების თვალსაზრისით, ამით კი შემცირდება მოხმარებული ენერჯია და სიგნალების დამუშავების სირთულე. ფიზიკური ფენის დიზაინის მიღმა, ტერაჰერცული ISAC სისტემები უფრო ეფექტიანად ვითარდება, როდესაც ინტერფეისი ხელმისაწვდომია ინფორმაციის გასაზიარებლად სხვადასხვა ფენას, ფუნქციასა და კვანძს შორის. მაგალითად, სხივის გასწორება და მასზე თვალყურის დევნება შეიძლება განხორციელდეს ზონდირების უკუკავშირის გამოყენებით, უსადენო მოწყობილობების ლოკალიზება შესაძლებელია ტერაჰერცული საკომუნიკაციო სიგნალების მახასიათებლების საფუძველზე. იდეალურ შემთხვევაში, უმაღლეს დონეზე, კომუნიკაცია და ზონდირება ურთიერთქმედებენ ერთმანეთთან, რათა უზრუნველყონ გაუმჯობესებული მახასიათებლები.

ქვემოთ წარმოდგენილია სხვადასხვა ტერაჰერცული ISAC ტექნოლოგიები.

ტალღის ფორმის შემუშავება ტერაჰერცული ISAC-სთვის: მრავალი მიზნით, მათ შორის ზონდირების განხორციელების და ინფორმაციის გადაცემის ჩათვლით, როდესაც ტერაჰერცული ISAC სისტემა გადასცემს საერთო შემუშავებულ სიგნალს, არსებობს სხვადასხვა მოთხოვნა გაზიარებული ტალღის ფორმაზე მოდულაციის სქემების, გადაცემის სიმძლავრის

ვრისა და გამტარუნარიანობის, ასევე სხვა ტექნიკური მახასიათებლების თვალსაზრისით. საკომუნიკაციო სიგნალების ფორმებზე დაყრდნობით, რომლებიც მოიცავს ერთგადამტანიან ტალღის ფორმებს, OFDM-ს და ორთოგონალურ დროით-სიხშირულ სივრცეს (OTFS), შემოთავაზებულია ISAC სისტემები შესაბამისი ზონდირების ალგორითმებით, ასევე ნაჩვენებია კომუნიკაციისა და ზონდირების პერსპექტიული შესაძლებლობები. როდესაც საუბარია ტერაჰერცულ დიაპაზონზე, ერთი სიხშირული გადამტანის ოჯახი, რომელიც შეიცავს ფურიეს დისკრეტული გარდაქმნის გავრცელებას OFDM-ზე და მის ვარიანტებს, განიხილება როგორც ტერაჰერცული ISAC სიგნალის ყველაზე პოტენციური კანდიდატი შემდეგი ორი ასპექტის გამო: ჯერ ერთი, შეზღუდული მრავალსიხვიანი გავრცელების და ანტენის კარგი მიმართულობის პირობებში, ტერაჰერცული არხის სიხშირის გატარების ზოლის კოჰერენტულობა იზრდება და შესაბამისად, მისი სიხშირე-გარჩევითობის მახასიათებელი შესუსტებულია. გარდა ამისა, ერთი გადამტანის მქონე სიგნალებს შეუძლიათ მიაღწიონ პიკური სიმძლავრის საშუალო სიმძლავრესთან ფარდობის უფრო დაბალ მნიშვნელობას, ვიდრე მრავალსიხშირულ გადამტანზე დაფუძნებულ მოდულაციას და ამით შეამცირონ სიმძლავრის გამამძიერებლების (PA) სიმძლავრის დანაკარგები. შედეგად, გაუმჯობესებულია გადაცემის საშუალო სიმძლავრე და ამალღებულია ტერაჰერცული კომუნიკაციისა და ზონდირების ეფექტიანობა.

სხივის ფორმირების დიზაინი ტერაჰერცული ISAC-სთვის: კარგი მიმართულობის მქონე სხივების გამოყენებით, ტერაჰერცულ დიაპაზონში გზაში მძიმე დანაკარგების კომპენსაციისთვის, შეიძლება წარმოიშვას კონფლიქტი კომუნიკაციასა და ზონდირებას შორის მათი მიზნების განსხვავებულობის გამო: ზონდირების პროცესში ხდება სკანირების სხივების მაქსიმალურად გამოყენება სამიზნეების საძიებლად, ხოლო კომუნიკაციას სჭირდება სტაბილური სხივები მიმღებების მიმართ. კომუნიკაციისა და ზონდირების ჰარმონიზაციის მიზნით, შესაძლებელი

მიდგომა მრავალი სხივის გენერირება და განახლება, კერძოდ, „წერტილი-წერტილი“ არქიტექტურით კომუნიკაციებისთვის განკუთვნილი ფიქსირებული ქვესხივის ინტეგრირება რამდენიმე დროში ცვალებად ქვესხივთან, რომლებიც გამოიყენება ზონდირების მიზნებისთვის. მიუხედავად ამისა, სივრცითი რესურსების გაზიარება ამცირებს უსადენო კავშირების სხივის ფორმირების გაძლიერებას, ვინაიდან გადამცემი სიგნალების ენერჯია კონცენტრირებული არ არის სასურველი მომხმარებლის მიმართულებაზე. ამრიგად, სივრცითი რესურსების მოქნილი დაგეგმვა, ზონდირების მოთხოვნების დაკმაყოფილებისას, ხელს უწყობს კარგი კომპრომისის მიღწევას მონაცემთა გადაცემის მაღალ სიჩქარესა და მაღალი გარჩევადობით ზონდირების შესაძლებლობას შორის.

ღრმა სწავლებაზე დაფუძნებული ტერაჰერცული ISAC: ტერაჰერცულ ქსელებში მონაცემთა დიდი რაოდენობით ნაკადის გამო, DL ტექნიკას შეუძლია გააფართოოს ISAC-ის პოტენციალი, კონკრეტულად შემდეგ სამ ასპექტში: ჯერ ერთი, DL-ს შეუძლია გადაცემული მონაცემების აღდგენისას უკეთ გაუმკლავდეს ტერაჰერცული სისტემების ნაკლოვანებებს, ვიდრე სიგნალის დამუშავების კლასიკურ მეთოდებს. გარდა ამისა, ის გზას უხსნის ინტეგრირებული დეტექტორის შექმნას კომუნიკაციისა და ზონდირებისთვის; მაგალითად, ტერაჰერცული ISAC შეიძლება ჩაითვალოს მრავალი დავალების შემცველი სწავლების პრობლემად, როგორცაა სიგნალის აღდგენა და ზონდირების პარამეტრის შეფასება. მიღებული მონაცემების სიმბოლოებით, როგორც შეყვანის ფუნქციებით, ჩვენ შეგვიძლია განვახორციელოთ ნეირონული ქსელის ღრმა სწავლების შესაბამისი ტრენინგი, რომელიც კარგად მუშაობს როგორც კომუნიკაციისთვის, ასევე ზონდირებისთვის.

დაბოლოს, ტერაჰერცული სიგნალებიდან გარემოსა და ადამიანის აქტივობის შესახებ მრავალი ინფორმაციის მოპოვება შეიძლება სწავლებაზე დაფუძნებული ტექნიკის გამოყენებით, როგორცაა შენობებს შიდა

ტერაპერცული ლოკალიზაცია, რომელიც იყენებს არხის მდგომარეობის შესახებ ინფორმაციის მახასიათებლებს.

პარაგრაფის დასასრულს, განვიხილოთ ტერაპერცულ ISAC ტექნოლოგიებთან დაკავშირებული ღია პრობლემები.

RF ინტერფეისის გაუარესებების შემცირება და კომპენსაცია: ძლიერი RF გაუარესებები ჩნდება ტერაპერცულ გადამცემებზე, მათ შორის ფაზური ხმაური ლოკალურ ოსცილატორზე (გეტეროდინზე), PA-ს არაწრფივი დამახინჯება და დისბალანსი სინფაზურ/კვადრატორულ მდგენელებს შორის. ამან შესაძლოა სერიოზულად იმოქმედოს ლინკის მახასიათებლებზე. ტერაპერცული ISAC სისტემები კარგად უნდა იყოს შემუშავებული, რათა შეამსუბუქოს ეს ტექნოლოგიური არასრულყოფილება ან მოახდინოს მისი კომპენსირება.

ზონდირების პარამეტრის შეფასება და ნიმუშების ამოცნობა: ზონდირების მიზანია ფიზიკური პარამეტრების შეფასება, სამიზნე დიაპაზონისა და სიჩქარის ჩათვლით, ასევე გარემოსა და ადამიანის მდგომარეობის მონიტორინგი. განიხილება რა როგორც არაწრფივი პრობლემები, ტერაპერცული ISAC-სთვის საჭიროა ზონდირების შემფასებლების ეფექტიანი დიზაინი და ნიმუშების ანალიზის მეთოდები, როგორცაა DL-ზე დაფუძნებული დეტექტორების გამოყენება.

სხივის კოოპერატიული ფორმირება და რესურსების განაწილება: იყენებს რა ზონდირების უკუკავშირს, უსადენო წვდომის წერტილებს შეუძლია განახორციელოს სხივის კოოპერატიული ფორმირება, რათა თვალყური ადევნოს ლოკაციას პილოტ-სიგნალის შემცირებული ოვერჰედით და შეყოვნებით. გარდა ამისა, საკომუნიკაციო რესურსების განაწილების სქემები შეიძლება იყოს ოპტიმიზებული დინამიკური გარემოსა და მომხმარებლის ინფორმაციის მიხედვით, რომელიც მოწოდებულია ზონდირებით, რათა უზრუნველყოფილ იქნას მომხმარებელთა შორის გაუმჯობესებული ურთიერთქმედების ხარისხი.

3.3. ტერაჰერცული ულტრამასიური MIMO და სხივის დინამიკური ჰიბრიდული ფორმირება

ტერაჰერცული კომუნიკაციების პროცესში მანძილის შეზღუდვის დასაძლევად, პირველ რიგში, პრაქტიკაში იყენებენ ასობით და ათასობით ანტენით აღჭურვილ ტერაჰერცულ UM-MIMO-ს. ტერაჰერცულ დიაპაზონში, სხივის ჰიბრიდული ფორმირება იყენებს ულტრამასიური ანტენის მესერს ციფრულ და ანალოგურ დომენში სიგნალის დამუშავების კომბინირებით, რაც მნიშვნელოვნად ამცირებს RF წრედების რაოდენობას სხივის სრულად ციფრულ ფორმირებასთან შედარებით და თანაც, მიიღწევა დაახლოებით ისეთივე მახასიათებლები. ტერაჰერცული სხივის ჰიბრიდული ფორმირების პროცესში მრავალი გამოწვევა წარმოიქმნება ტერაჰერცული სიხშირული დიაპაზონის შემდეგი თავისებურებების გათვალისწინებით: ჯერ ერთი, ბლოკირების და უზარმაზარი არეკვლის გაფანტვის დანაკარგების შედეგად, ტერაჰერცულ არხს აქვს მაღალი გამეჩხერება და შედეგად მიღებული სივრცითი თავისუფლების ხარისხი შეზღუდულია 5-ს ქვემოთ, რაც მკაცრად ზღუდავს სივრცითი მულტიპლექსირების პოტენციალს. ასევე, ძალიან დიდი საანტენო მესრის ენერგოეფექტიანობა რთულად მისაღწევია, თუ გავითვალისწინებთ 1024 ან მეტი ანტენის მოხმარებულ ენერგიას, ფაზის წამნაცვლებლებს (PS), გადამრთველებს და ა.შ. ამას გარდა, ბრტყელტალღოვანი აპროქსიმაცია ხდება არაზუსტი, რადგან ანტენებს შორის მანძილი შეიძლება იყოს ათობით ტალღის სიგრძემდე. დაბოლოს, მრავალგაჰერციანი სიხშირის გატარების ზოლის გამო, სხივის მიმართულების ცვლილების ეფექტმა შეიძლება გამოიწვიოს 5 დბ-ზე მეტი დანაკარგი საანტენო მესრის გაძლიერების კუთხით.

თავდაპირველად წარმოვადგინოთ სხივის დინამიკური ჰიბრიდული ფორმირების არქიტექტურა.

ტერაჰერცული DAoSA არქიტექტურა: ენერჯის მოხმარების შემცირების მიზნით, მიზიდიველი სპექტრული ეფექტიანობის შენარჩუნებისას, გათვალისწინებულია დინამიკური, ქვემესრებიდან მესრის შექმნის

(DAoSA) არქიტექტურა მოქნილი აპარატურული კავშირით. ამ დიზაინში ანტენები იყოფა რამდენიმე ქვემესრად და გადამრთველები ჩასმულია თითოეულ RF წრედსა და თითოეულ ქვემესერს შორის. გადამრთველების მდგომარეობა (ანუ ღია და დახურული) ინტელექტუალურად არის განსაზღვრული RF წრედებსა და ქვემესრებს შორის შეერთებების სამართავად.

FTTD-ზე დაფუძნებული ტერაჰერცული დინამიკური ქვემესრის არქიტექტურა: ტერაჰერცულ დიაპაზონში ფართოზოლოვანი კომუნიკაციებისას (მაგალითად, 30 გჰც სიხშირის გატარების ზოლი 300 გჰც ცენტრალურ სიხშირეზე), ჩნდება სხივის მიმართულების ცვლილების მწვავე პრობლემა, ძირითადად PS-ების სიხშირეზე დამოუკიდებელი რეგულირების გამო. ძალიან დიდი სააანტენო მესრის და ულტრაფართო სიხშირის გატარების ზოლის გამო, წარმოქმნილი სხივები გადახრილია დამიზნებული მიმართულებიდან, რაც მესრის გაძლიერების შემცირებას იწვევს. ამ მიზნით პერსპექტიულია ჭეშმარიტი დროითი დაყოვნების (TTD) არქიტექტურა, რომელიც ანაცვლებს PS-ებს და რომელიც, თავის მხრივ, სიხშირეზე დამოკიდებული მთელი სიხშირული სპექტრის მიხედვით. შედეგად, TTD-ით დაზუსტებული PS დაპროექტებულია ისე, რომ იყოს გადამტანი სიხშირის პროპორციული, რაც კარგად ანაზღაურებს სხივის მიმართულების ცვლილების ეფექტს ფართოზოლოვანი ტერაჰერცული სხივის ჰიბრიდული ფორმირების სისტემაში. აპარატურული სირთულის შემდგომ შესამცირებლად, პერსპექტიულია FTTD დიზაინი წინასწარ განსაზღვრული დაყოვნების პარამეტრებით. დაბალი სირთულის კომპუტაციურ ქსელთან ერთად, მიღებულ დინამიკურ ქვემესერს, FTTD-ს შეუძლია მიაღწიოს დამაკმაყოფილებელ სპექტრულ ეფექტიანობას და მნიშვნელოვნად შეამციროს ენერჯის მოხმარება, ასევე აპარატურული სირთულე.

პარაგრაფის ბოლოს, განვიხილოთ ტერაჰერცულ UM-MIMO-სა და დინამიკურ სხივის ჰიბრიდულ ფორმირებასთან დაკავშირებული ღია პრობლემები.

აპარატურულად ეფექტიანი დიზაინი: როდესაც საქმე ეხება ტერაჰერცულ დიაპაზონს, აპარატურული გამოწვევები მკვეთრად იზრდება; მაგალითად, მაღალი გარჩევადობის PS, TTD და ციფრულ-ანალოგური/ანალოგურ-ციფრული გარდამქმნელი (DAC/ADC) ჯერ კიდევ რთულად წარმოებადია. ამიტომ, ტერაჰერცული სხივის ჰიბრიდული ფორმირებისთვის, არქიტექტურები და ალგორითმები, რომლებიც გამოიყენება დაბალი გარჩევადობის მქონე PS-ში, TTD-ში და DAC/ADC-ში, სასწრაფოდ შესამუშავებელია დამაკმაყოფილებელი ენერგოეფექტიანობის მქონე პრაქტიკული სისტემების დანერგვისას. ტერაჰერცული სხივის ჰიბრიდული ფორმირების რეალიზაციისათვის, ერთ-ერთი ალტერნატიული მიმართულებაა საანტენო ლინზური მესრის გამოკვლევა. ელექტრომაგნიტური ლინზის ფოკუსურ ზედაპირზე მოთავსებულ შესაბამის საანტენო მესერს შეუძლია ტერაჰერცული ტალღის ფოკუსირება.

არხის მდგომარეობის შესახებ არასრულყოფილი ინფორმაციის ზემოქმედება: ზოგადად, რთულია ტერაჰერცული UM-MIMO არხის სრულყოფილი CSI-ის მიღება მისი მაღალგანზომილებიანი თვისებების გამო. გარდა ამისა, ტერაჰერცული UM-MIMO სისტემების მიერ წარმოქმნილი ულტრამკვეთი სხივი, არასრულყოფილი CSI და სხივის წანაცვლება მნიშვნელოვნად გააუარესებს მახასიათებლებს. შედეგად, ერთი მხრივ, საჭიროა შემუშავდეს კუთხის მილიგრადუსიანი სიზუსტით განგარიშების და არხის ძალიან საიმედო შეფასების მეთოდები; მეორე მხრივ, გამოკვლეული უნდა იქნას ტერაჰერცული სხივის ჰიბრიდული ფორმირების ალგორითმები, რომლებიც იმუნურია არასრულყოფილი CSI-ის მიმართ.

3.4. ტერაჰერცული ინტელექტუალური ზედაპირები

IS გულისხმობს იაფვასიან, ჭკვიან, თხელი კომპოზიციური მასალის ფურცელს, რომელიც შეიცავს მეტალის ან დიელექტრიკულ გაფანტულ ნაწილაკებს და შეიძლება რეალიზებულ იქნას სხვადასხვა ტექნოლო-

გიით. როდესაც IS შედგება დისკრეტული პაწაწინა ანტენის ელემენტებისაგან, ნაწილაკთა შორის მანძილი ხშირად, რადიოტალღების ტალღის სიგრძის ნახევარს უდრის, ხოლო როდესაც IS შედგება მეტაზედაპირებისგან, ნაწილაკებს შორის მანძილი ჩვეულებრივ 5-10-ჯერ ნაკლებია ტალღის სიგრძეზე. ამ ელემენტებს ჩვეულებრივ აკონტროლებს ცენტრალური მმართველი მოწყობილობა, რომელიც მანიპულირებს თითოეული ელემენტის არეკვლის ამპლიტუდით და ფაზური წანაცვლებით, რითაც უსადენო გარემო გადაჰყავს ტრანსფორმირებად სისტემად ელექტრომაგნიტური ტალღების სივრცეში.

რეკონფიგურირებად უსადენო გარემოში, IS შეიძლება იყოს გადამცემი, მიმღები ან რეფლექტორი. ტრანსივერში აქტიურია IS, რისთვისაც ენერგოტევადი RF სქემები და სიგნალების დამუშავების ბლოკები ჩაშენებულია ზედაპირზე. ამის საპირისპიროდ, ამრეკლავად გამოყენების პროცესში, IS არის პასიური და ის ხდება პასიური ლითონის სარკე ან „ტალღის კოლექტორი“, რომელიც ჩვეულებრივ შედგება პასიური ელემენტებისაგან, ელექტროენერჯის მოხმარების გარეშე.

გადავიდეთ ტერაჰერცული IS ტექნოლოგიების წარმოდგენაზე.

IS-ის განთავსება: მიუხედავად იმისა, რომ IS-ზე დაფუძნებულ სისტემებს შეუძლიათ ელექტრომაგნიტური ტალღის გავრცელების რეკონფიგურაცია, ბუნებრივია გვეკონდეს იმის მოლოდინი, რომ IS-ზე დაფუძნებული უსადენო საკომუნიკაციო სისტემები გამოავლენენ უნიკალურ მახასიათებლებს. მაგალითად, როდესაც LoS გზა იბლოკება დაბრკოლებებით, გამტარუნარიანობის მახასიათებელი IS-ის გარეშე მკვეთრად ეცემა. ამის ნაცვლად, IS-ის მიმართ სხივის მიმართულების კორექტირებით და მიმღების არეკვლილი სიგნალის სიმძლავრის მაქსიმალურად გაზრდით, IS-ის დახმარებით საკომუნიკაციო სისტემას შეუძლია შეინარჩუნოს კავშირის კარგი მახასიათებლები. კიდევ ერთი მაგალითია IS-ზე დაფუძნებული მრავალნახტომიანი ტერაჰერცული საკომუნიკაციო ქსელები, სადაც IS-ის დახმარებით, ტერაჰერცულ საკომუნიკაციო სისტემას

შეუძლია შესამჩნევად გააუმჯობესოს გამტარუნარიანობის მახასიათებელი და უზრუნველყოს უკეთესი დაფარვის შესაძლებლობა, ვიდრე ეს შესაძლებელია IS-ის გარეშე.

ჰოლოგრაფიული MIMO: მეტაზედაპირების დახმარებით, რომლებიც შედგება ტალღის ქვესიგრძის მქონე მეტალის სტრუქტურებისგან, შესაძლებელია კომპაქტურ სივრცეში უზარმაზარი, თუნდაც უსასრულო რაოდენობის ანტენების ინტეგრირება. მაგალითად, IS-ზე ზომებით 3 სმ × 3 სმ და რომელიც მუშაობს 1 ტკც-ზე, შეიძლება განთავსდეს 1000 × 1000 მეტატომი, მეტატომებს შორის მეათედი ტალღის სიგრძის ტოლი მანძილით. ამ ტიპის ბრტყელ სტრუქტურას მოიხსენიებენ, როგორც MIMO ჰოლოგრაფიულ ზედაპირს, რომელსაც შეუძლია უზრუნველყოს უკიდურესად მაღალი სივრცითი გარჩევადობა და უპრეცედენტო სპექტრული ეფექტიანობა. UM-MIMO-სგან განსხვავებით, ჰოლოგრაფიულ MIMO-ს შეუძლია შექმნას უწყვეტი მიღებისა და გადაცემის აპერტურა და მისი გადაცემის მექანიზმი ტრანსფორმირდება ინტერფერენციისა და დიფრაქციის პრინციპის გამოყენებით. ჰოლოგრაფიული MIMO-ს უპრეცედენტო შესაძლებლობები IS-ს აქცევს ახალ კანდიდატად შენობების დაკავშირების, შენობებს შიდა გაუმჯობესებული დაფარვის, ენერგოეფექტიანი სხივის ფორმირების, ფიზიკური ფენის უსაფრთხოებისა და მაღალი სიზუსტით შენობებს შიდა პოზიციონირებისთვის.

განვიხილოთ ტერაჰერცულ ინტელექტუალურ ზედაპირებთან დაკავშირებული ღია პრობლემები.

არხის შეფასება გარემოს გათვალისწინებით: გარემოს გათვალისწინებით სხივის ფორმირება ეყრდნობა არხის მდგომარეობის ზუსტ შეფასებას. პასიური IS-ის შემთხვევაში, მას არ გააჩნია რაიმე აქტიური კომპონენტი და შესაბამისად, არ აქვს არხის შეფასებისთვის საჭირო სიგნალის დამუშავების უნარი. ამ მიზნით, შეიძლება გამოყენებულ იქნას ორობითი არეკვლით მართვადი არხის შეფასების სქემა, ქსელური შეყოვნების შემდგომი შემცირებით. აქტიური IS, ძალიან დიდი რაოდენობის UM-MIMO

არხების გამო, მოითხოვს უკიდურესად ინტენსიურ ოვერჰედებს პილოტ-სიგნალებისთვის. დამატებით, მომხმარებლის მობილურობის გათვალისწინებით, IS-ით მხარდაჭერილი ტერაჰერცული საკომუნიკაციო სცენარებისთვის უფრო რთული ხდება დროში ცვალებადი არხების შეფასების ეფექტიანი სქემების შემუშავება დაბალი შეყოვნებით. გარდა ამისა, ჯერ კიდევ საბოლოოდ უნდა დადგინდეს ფუნდამენტური საზღვრები, მათ შორის მათემატიკურად დამუშავებას დაქვემდებარებული და რიცხობრივად რეპროდუცირებადი არხების მოდელისთვის, რომლებიც განსაზღვრავენ ჰოლოგრაფიულ MIMO-ს.

ახლო ველის კომუნიკაცია: ზოგიერთი გამოყენების სცენარში (მაგალითად, შენობებს შიდა გარემოში), IS შეიძლება მოქმედებდეს ახლო ველის რეჟიმში. ამ შემთხვევაში, გეომეტრიულად დიდი IS-ის გამოყენება ხსნის ახალი უსადენო ქსელების შექმნის შესაძლებლობას. უკიდურესად დიდი IS-ის გამოყენების შედეგია ის, რომ აპერტურამ შეიძლება განსაზღვროს არა მხოლოდ ტალღის მოსვლის/გასვლის კუთხე (AoA/AoD), არამედ არხის გაძლიერების განსხვავება მეტაატომებისთვის. ეს ართულებს არხის მოდელირებას და სხივების მართვას, შორეულ მანძილებზე კომუნიკაციასთან შედარებით. ელემენტებს შორის ტალღის ქვესიგნალის ტოლი მანძილის გამო, ასევე საჭიროა რეალისტური მოდელები, რომლებიც ითვალისწინებენ კავშირს მეტაზედაპირებით მიმოფანტული სიგნალების გავრცელებისთვის, რაც უფრო რთულს ხდის არხის მოდელირებას.

სხივის ერთობლივი აქტიური და პასიური ფორმირება: LoS-ის ბლოკირების შესამცირებლად და ტერაჰერცული კომუნიკაციების დაფარვის გასაზრდელად, საჭიროა გაანალიზდეს სხივის ერთობლივი აქტიური და პასიური ფორმირება, რომელიც იყენებს IS-ს, როგორც ტრანსივერში, ასევე გავრცელების გარემოში. სხივის ფორმირების ჰიბრიდული არქიტექტურა ახორციელებს სხივის აქტიურ ფორმირებას გადამცემსა და მიმღებში, სიგნალის სიმძლავრისა და მონაცემთა გადაცემის სიჩქარის

გასაუმჯობესებლად. იმავედროულად, გარემოში ჩაშენებულ IS-ს შეუძლია უზრუნველყოს სხივის პასიური ფორმირება დაცემული სიგნალის ფაზის დასარეგულირებლად და არეკლილი სიგნალის მიმართულების გასაკონტროლებლად სიგნალის სიმძლავრის შემდგომი გაზრდის მიზნით. აქედან გამომდინარე, საჭიროა სიგნალის დამუშავების ახალი ალგორითმები და ქსელის პროტოკოლები, UM-MIMO და IS ტექნოლოგიების ერთობლივი დიზაინისთვის, რომელთა საშუალებითაც მოხდება გამტარუნარიანობის ოპტიმიზაცია და IS-ის გონივრული განთავსება.

3.5. მანქანურ/დრმა სწავლებაზე დაფუძნებული

ტერაჰერცული კომუნიკაციები

საყოველთაოდ ცნობილია, რომ თანამედროვე უსადენო კომუნიკაციები დიდწილად ეყრდნობა მათემატიკურ მოდელებს, რომლებიც განსაზღვრავს სიგნალის უსადენო გადაცემას სივრცეში. თუმცა, ასეთი მათემატიკური მოდელები, როგორც წესი, არაზუსტია კონკრეტული ფიზიკური სისტემების აღწერისას. უფრო მეტიც, ზოგიერთ ტიპურ საკომუნიკაციო სცენარში, ჩვენ ჩვეულებრივ ვერ ვიღებთ შესაბამის მათემატიკურ განტოლებებს, მათ შორის უსადენო ქსელებისთვის მჭიდრო სამშენებლო ბლოკებში, შენობებს შიდა ტერაჰერცულ კომუნიკაციებში და ა.შ.; მეორე მხრივ, ML/DL-ზე დაფუძნებული მეთოდი, როგორც განსაკუთრებით აღსანიშნავი ტექნოლოგია, ბოლო წლებში შემოტანილ იქნა მაღალ განზომილებასთან, რთულ ელექტრომაგნიტურ გარემოსთან, მოდელისგან თავისუფალ ბუნებასთან და გადაუჭრელ არაწრფივ საკითხებთან დაკავშირებული პრობლემების მოსაგვარებლად. ტერაჰერცული კომუნიკაციების თანდაყოლილი გამოწვევების გათვალისწინებით (მაღალი განზომილება, დაუცველი გადაცემა და მოდელის არარსებობა) განსაკუთრებული კვლევითი ინტერესები მიმართულია ML/DL ტექნოლოგიის დანერგვაზე მომავალ 6G ტერაჰერცულ საკომუნიკაციო სისტემებში. სავარაუდოდ, ეს საშუალებას მოგვცემს გავუმკლავდეთ ისეთ პრობლე-

მებს, როგორცაა: არხის შეფასება, სხივის ფორმირების დიზაინი, სხივის თვალყურის დევნება და მისი ბლოკირების წინასწარ განსაზღვრა, ასევე, ინტერფერენციების ჩახშობა.

წარმოვადგინოთ ML/DL-ზე დაფუძნებული ზოგიერთი მეთოდი.

არხის შეფასება: ძალიან მაღალი სამუშაო სიხშირისა და RF წრედების შეზღუდული რაოდენობის გამო, ტერაჰერცულ საკომუნიკაციო სისტემებში, არხის შეფასება ძალიან რთული პრობლემაა. ამ გამოწვევის გადასაჭრელად, დღეისათვის არსებულ ნაშრომებში შემოთავაზებულია ML/DL-ით მხარდაჭერილი გადაწყვეტილებები. ერთი მხრივ, ტერაჰერცული კომუნიკაციების არხის შეფასების ფორმულირებისთვის გამეჩხერების აღდგენის პრობლემის სახით, სადაც გამოიყენება გამეჩხერება, ზოგადი ნეირონული ქსელი შეიძლება იყოს შემოთავაზებული ზონდირების მატრიცის მისაღებად და ერთდროულად სიგნალის აღდგენის მისაღწევად. მეორე მხრივ, არხის შეფასება სხვა მოდულებთან ერთად (კოდირება, მოდულაცია, დემოდულაცია და ა.შ.) შეიძლება განხორციელდეს გამჭოლ ავტოკოდერში.

სხივის ფორმირების დიზაინი: სხივის ინტელექტუალურმა ფორმირებამ და ანტენის გონივრულმა მართვამ შეიძლება მნიშვნელოვნად გააუმჯობესოს გამტარუნარიანობა, სპექტრული ეფექტიანობა და ენერგოეფექტიანობა, შეამციროს ინტერფერენციები, გაზრდოს დაფარვა და უზრუნველყოს მნიშვნელოვანი მობილური გამოყენებები. სხივის ფორმირების ინტელექტუალური გადაწყვეტა უკვე წარმოადგენს მიმდინარე 5G კომუნიკაციების განუყოფელ ნაწილს და შემდგომში გავრცელდება ტერაჰერცულ 6G კომუნიკაციებზე ML/DL-ის უპირატესობების გამოყენებით, სადაც ციფრული სხივის ფორმირება და ანალოგური სხივის ფორმირება საკომუნიკაციო წრედებში ხასიათდება ინტელექტუალურობის გარკვეული დონით.

სხივის თვალყურის დევნება და ბლოკირების წინასწარმეტყველება: სხივის გონივრულად თვალყურის დევნება და ბლოკირების წინასწარი

განსაზღვრა ასევე მნიშვნელოვანი საშუალებებია საკომუნიკაციო კავშირების საიმედოობის გასაზრდელად და გზაში დანაკარგების თავიდან ასაცილებლად. ჩვეულებრივ, მომხმარებლის მობილურობის თვალყურის დევნება არის სხივის თვალყურის დევნების საფუძველი მაღალი მობილურობის მქონე ტერაჰერცულ სისტემებში; თუმცა, ტრადიციულ მეთოდებს, როგორცაა კალმან-ბიუსის ფილტრაციაზე დაფუძნებული მეთოდი, აქვთ მაღალი გამოთვლითი სირთულე. ML/DL-ით მხარდაჭერილ მეთოდებს, რომლებიც მიმართულია მომხმარებლების მობილურობის და ბლოკირების შესასწავლად, გადავყავართ მომავალი მობილური ტერაჰერცული საკომუნიკაციო სისტემების, მომხმარებლის ტრაექტორიაზე დაფუძნებულ სხივზე თვალყურის დევნების და ბლოკირების პროგნოზირების მეთოდების ახალ ეპოქაში. ბლოკირების ინტელექტუალური პროგნოზირება და სწრაფი დაგეგმვა სარელეო კავშირის ქსელებში შეიძლება შესრულებული იყოს DL-ის მიერ LoS ბლოკირების პრობლემის გადასაჭრელად, რომელიც შეესაბამება ტერაჰერცული IS დიზაინის მოტივაციას.

ინტერფერენციების ჩახშობა: მკვრივ ტერაჰერცულ ქსელებში მომხმარებელთა დიდი რაოდენობის გადაცემებზე წვდომა გამოიწვევს მნიშვნელოვან ინტერფერენციებს არაკოორდინირებული მიმართულებითი გადაცემის გამო, მაშინ როდესაც ასეთი ინტერფერენციები ჩვეულებრივ მიიღება შემთხვევითი წესით, მოკლე დროში და როდესაც მიღებული სიმძლავრე ასევე დიდია. ამ პრობლემის გადასაჭრელად გამოიყენება ML/DL-ზე დაფუძნებული მეთოდები, როგორცაა მაგალითად, განმტკიცებული სწავლება. აღნიშნული საშუალებას იძლევა ეფექტიანად აღმოაჩინოს და ჭკვიანურად თავიდან აიცილოს პერიოდული ინტერფერენცია არაკოორდინირებული მიმართულებებიდან, მაგრამ გაცილებით ნაკლები გამოთვლითი დროით, რაც საფუძველს უქმნის მასობრივი კავშირების ინტელექტუალურ მხარდაჭერას და მრავალფეროვან მომსახურებას.

პარაგრაფის ბოლოს განვიხილოთ ის ღია პრობლემები, რომლებიც დაკავშირებულია მანქანურ/დრმა სწავლებაზე დაფუძნებულ ტერაპიურ ცულ კომუნიკაციებთან.

გლობალური ინტელექტუალურობის მასშტაბურობა: ML/DL-ზე დაფუძნებული მეთოდები შედგება მრავალი განსხვავებული მოდელისგან, რომელთა მასშტაბურობა და ეფექტიანობა დაკავშირებულია სხვადასხვა გამოწვევებთან. გარდა ამისა, ტერაპიურ ცული კომუნიკაციები, როგორც წესი, დაუცველია გარემოსა და ცვლილებების მიმართ, რასაც მიყვავართ განხილულ ML/DL მეთოდებამდე, რომლებიც, თავის მხრივ რთულად ადაპტირებადია მრავალი განსხვავებული დინამიკური სცენარისთვის.

დიდი გამოთვლითი ოვერჰედი: ტერაპიურ ცული კომუნიკაციებისთვის დამახასიათებელი უფრო ფართო სიხშირის გატარების ზოლი და უფრო მაღალი გამტარუნარიანობა ქმნის მეტ მოთხოვნებს ტრენინგისა და ML მოდელების გამოყენების პროცესში. გარდა ამისა, ტერაპიურ ცული კომუნიკაციები, როგორც წესი, ჰეტეროგენულად ინტეგრირებულია მობილურ ქსელებთან დიდი რაოდენობით დაკავშირებული მოწყობილობებით. შედეგად, ასევე არარეალურია ყველა არსებული საკომუნიკაციო ინფრასტრუქტურის უახლესი განვითარებული გამოთვლითი საშუალებებით ჩანაცვლება. ამ გამოწვევებს აუცილებლად მიყვავართ უფრო დიდ ოვერჰედთან, ანუ გამოთვლით დანახარჯებთან.

კომუნიკაციის კუთხით ეფექტიანი ML/DL: ეფექტიანი სწავლება და ლოგიკური დასკვნები არის საფუძველი ML/DL და ტერაპიურ ცული საკომუნიკაციო სისტემების სრულყოფილი ინტეგრაციისთვის. თუმცა, ML/DL-სთვის ასევე რთულია მოდელის ეფექტიანი ტრენინგისა და დასკვნების მიღწევა სუპერმასობრივ და ჰეტეროგენულ ქსელში, რაც გამოწვეულია არასტაბილურ ტერაპიურ ცულ არხებში კომუნიკაციით და გამოთვლებისთვის ნეირონული ქსელების რესურსის განაწილებით. შეზღუდული გამოთვლითი შესაძლებლობების მქონე მოწყობილობები ჰეტეროგენულ ქსელებში აუცილებლად მოიხმარენ მეტ რესურსს და დროს.

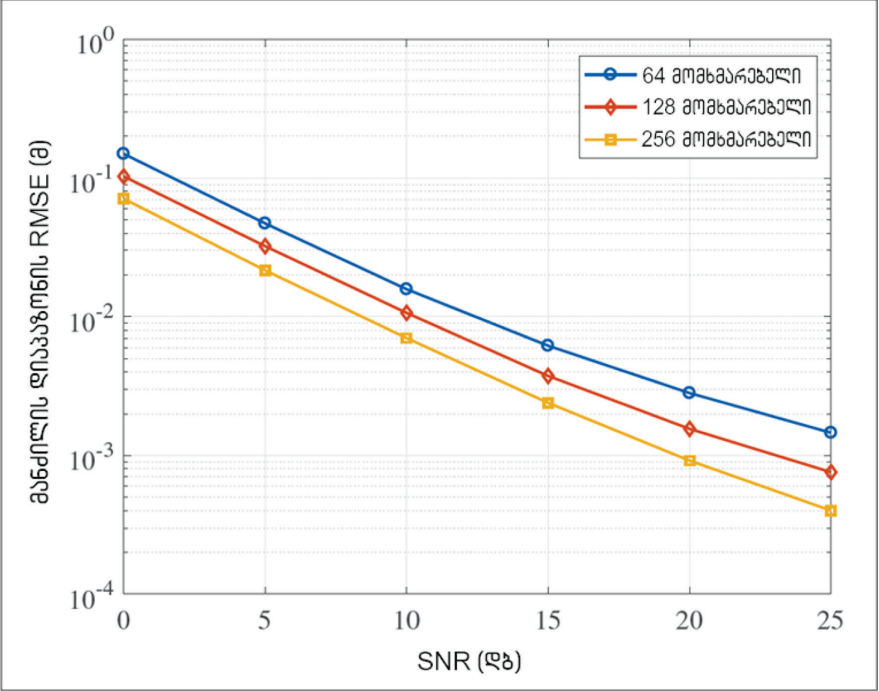
3.6. ეფექტიანობის შეფასება

ამ პარაგრაფში, ჩვენ მოვიყვანთ ციფრულ შედეგებს, რათა რაოდენობრივად წარმოვადგინოთ ზემოაღნიშნული ოთხი ინტერდისციპლინური ტექნოლოგიის უპირატესობები, რომლებიც მოქმედებენ როგორც ოთხი საყრდენი ტექნოლოგია გაფართოებული დაფარვისა და ენერჯის დაბალი მოხმარების ტერაჰერცული კომუნიკაციების მხარდასაჭერად.

ტერაჰერცული ინტეგრირებული ზონდირება და კომუნიკაცია: ტერაჰერცულ საკომუნიკაციო სისტემებში ჩვენ შეგვიძლია გამოვიყენოთ როგორც პილოტ-სიგნალები, რომლებითაც სარგებლობენ არხის მდგომარეობის შეფასებისთვის, ასევე მონაცემთა სასარგებლო დატვირთვის სიგნალები ტერაჰერცული ზონდირების ჩასატარებლად. ჩვენ განვიხილავთ მანძილის დიაპაზონის შეფასების სიზუსტეს ტერაჰერცულ ISAC სისტემებში ეტალონური პილოტ-სიგნალების გამოყენებით. გადამტანი სიხშირე დაყენებულია როგორც 0.3 ტკც. გამოყენებულ ქვეგადამტანებს შორის ინტერვალი უდრის 15 მკც-ს. დიაპაზონის შეფასებისთვის ჩვენ განვსაზღვრავთ საშუალო კვადრატულ შეცდომას (RMSE) ერთი სამიზნისთვის SNR-თან დამოკიდებულებაში. ნახ. 3.2-ზე ნაჩვენებია, რომ მანძილის დიაპაზონის შეფასების RMSE-ს შეუძლია მიაღწიოს მინიმუმ სანტიმეტრის დონეს და არის 1 მილიმეტრს ქვემოთ მაღალი SNR-ის რეჟიმებში. გარდა ამისა, ტერაჰერცული ზონდირების სიზუსტე შეიძლება კიდევ უფრო გაუმჯობესდეს მეტი ქვეგადამტანის გამოყენებით, გამოყენებული სიხშირის გატარების ზოლის გაზრდის წყალობით.

ტერაჰერცული UM-MIMO და დინამიკური სხივის ჰიბრიდული ფორმირება: როგორც ნახ. 3.3-ზეა ნაჩვენები, შენობებს გარეთა მრავალზიანი გარემოში LoS მანძილით 60 მ, როდესაც გადამცემი სიმძლავრეა 20 დბმ და გამოყენებულია 1024 ანტენა, სრულად დაკავშირებული (FC) არქიტექტურა აღწევს 2.3 ბიტი/წმ/ჰც-ით და 9.2 ბიტი/წმ/ჰც-ით უფრო მაღალ სპექტრულ ეფექტიანობას, ვიდრე DAoSA და AoSA არქიტექტურები. ამ სამი არქიტექტურის ენერჯის მოხმარება გარკვეული წესით იზრდება,

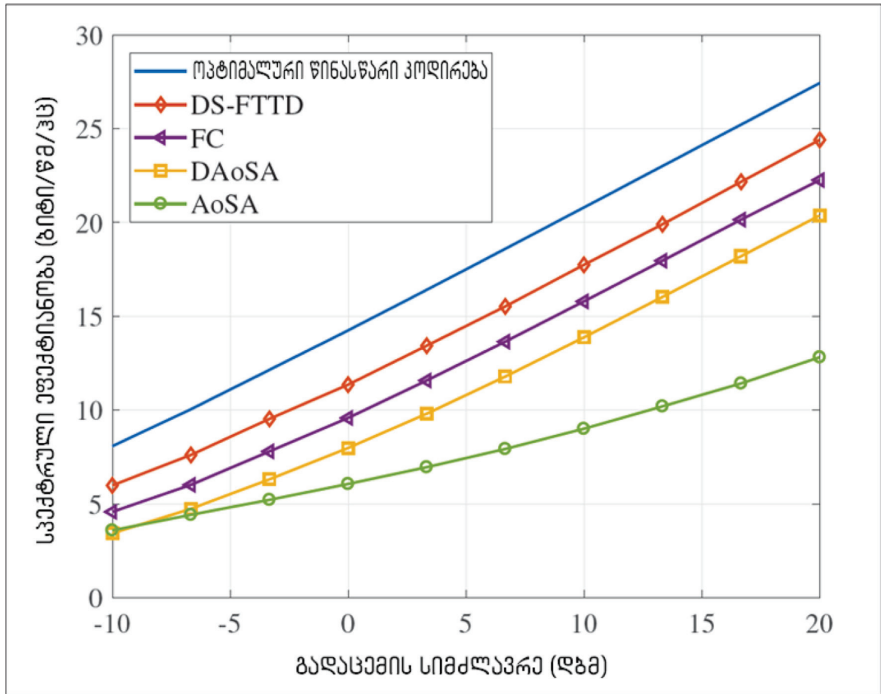
რადგან მათ RF წრედებსა და ანტენებს შორის აპარატურული შეერთებები არის, შესაბამისად, სრულად დაკავშირებული, დინამიკურად დაკავშირებული და ნაწილობრივ დაკავშირებული.



ნახ. 3.2. ტერაჰერცული სიხშირეებისთვის მანძილის დიაპაზონის შეფასების სიზუსტის დამოკიდებულება მოხმარებელთა სხვადასხვა რაოდენობაზე

აქედან გამომდინარე, DAoSA არქიტექტურას შეუძლია მიაღწიოს კომპრომისს FC და AoSA არქიტექტურების სპექტრულ ეფექტიანობასა და ენერჯიის მოხმარებას შორის. თუმცა, სამივე არქიტექტურა, რომელიც დაფუძნებულია ფაზურ წამნაცვლებლებზე, ძნელად უმკლავდება სიხვის მიმართულების ცვლილების ეფექტს და მაინც აქვს დიდი ჩამორჩენა მახასიათებლების კუთხით ოპტიმალურ ციფრულ წინასწარ კოდირებასთან შედარებით. ამის საპირისპიროდ, დინამიკურ ქვემესრზე (DS) დაფუძნებული FTDD (ანუ DS-FTTD) არქიტექტურა იყენებს FTDD-ის

სიხშირის პროპორციულ თვისებას სხივის მიმართულების ცვლილების პრობლემასთან საბრძოლველად და შესაბამისად, მნიშვნელოვნად გაუმჯობესებული სპექტრული ეფექტიანობის მისაღწევად.

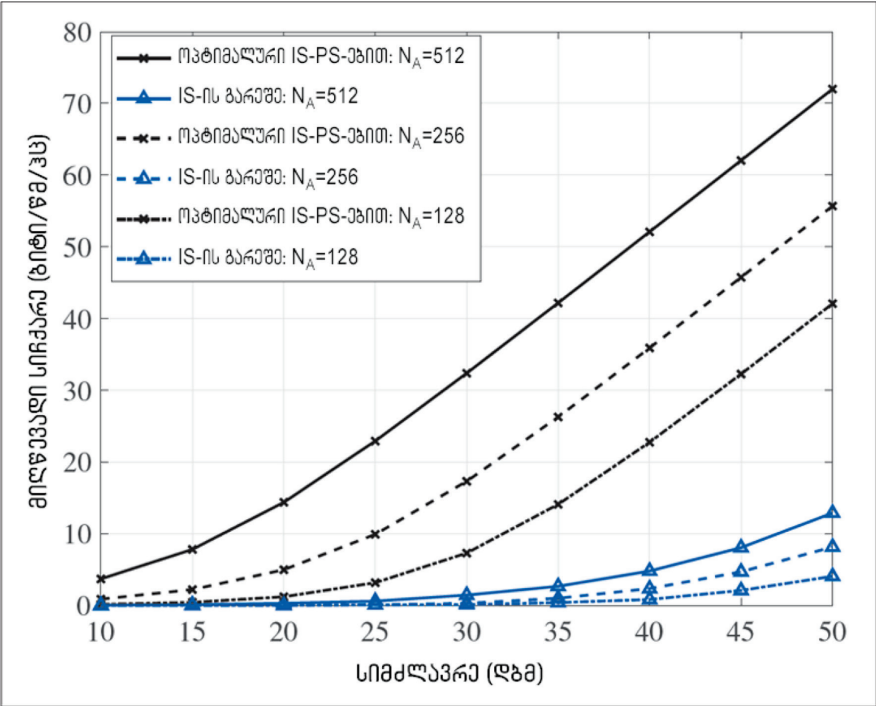


ნახ. 3.3. სხვადასხვა ტერაჰერცული სხივის ჰიბრიდული ფორმირების არქიტექტურისთვის სპექტრული ეფექტიანობის დამოკიდებულება გადაცემის სიმძლავრეზე

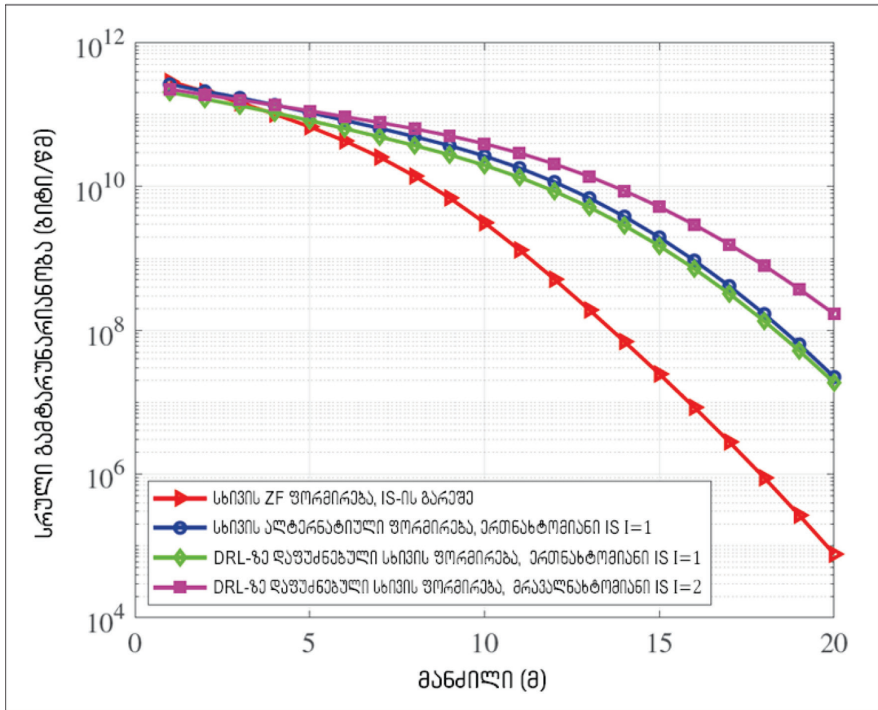
ტერაჰერცული ინტელექტუალური ზედაპირები: ჩვენ ვაფასებთ IS-ის დახმარებით შემუშავებული კომუნიკაციების მიღწეულ ეფექტიანობის გაზრდას, სადაც IS დამონტაჟებულია ოთახის კედელზე. ოპტიმალური IS-PS-ებით, გამოიყენება ოპტიმალური IS ფაზის წამნაცვლებლები და სხივის სრულად ციფრული ფორმირება, ხოლო IS-ის გარეშე ჩვენ განვიხილავთ IS-ს, როგორც შიდა კედელს, რომლის პირველი რიგის არეკვლის დანაკარგები არის 5.8 დბ-დან 19.3 დბ-მდე LoS-თან შედარებით. ჩვენ ვხედავთ, რომ IS-ის დახმარებით ფუნქციონირებადი სქემების მახა-

სიათებლების მოგებები მნიშვნელოვანია IS-ის გარეშე ფუნქციონირებად სქემასთან შედარებით, რადგან IS-ებს შეუძლიათ უზრუნველყონ აპერტურის გაძლიერებები მათი კონტროლირებადი არეკვლის მეშვეობით, რათა გაიზარდოს მიღებული სიმძლავრე მომხმარებლისთვის. გარდა ამისა, როდესაც ანტენების რაოდენობა (N_A) იზრდება 128-დან 512-მდე, IS-ის დახმარებით ფუნქციონირებადი სქემის მიღწევადი სიჩქარე სულ უფრო მნიშვნელოვან გაუმჯობესებას იძლევა (იხ. ნახ. 3.4).

მანქანური/დრმა სწავლება ტერაჰერცული კომუნიკაციებისთვის: ჩვენ ვაფასებთ დრმა განმტკიცებულ სწავლებაზე (DRL) დაფუძნებული სხივის ფორმირების მეთოდის მახასიათებლებს მრავალნახტომიანი IS-ის დახმარებით ფუნქციონირებად უსადენო ტერაჰერცულ საკომუნიკაციო ქსელებში და შევადარებთ მას ლიტერატურიდან კარგად ცნობილ ZF-ით



ნახ. 3.4. IS-ის დახმარებით ფუნქციონირებადი სქემის მიღწევადი სიჩქარის დამოკიდებულება სიმძლავრეზე



ნახ. 3.5. ღრმა განმტკიცებულ სწავლებაზე დაფუძნებული სხივის ფორმირების მეთოდის მახასიათებლები მრავალნახტომიანი, IS-ის დახმარებით ფუნქციონირებადი, უსადენო ტერაჰერცული საკომუნიკაციო ქსელებისათვის

სხივის ფორმირებას და ალტერნატიული ოპტიმიზაციით სხივის ფორმირებას მეთოდებს, როგორც ნაჩვენებია ნახ. 3.5-ზე.

ჩატარებულია კომპიუტერული სიმულაცია ტიპური ტერაჰერცული მრავალნახტომიანი სისტემისთვის, სადაც საბაზო სადგურის ანტენების რაოდენობა 8, IS ელემენტების რიცხვი ტოლია 128-ის და გვყავს 32 მომხმარებელი. სიმულაციის შედეგები აჩვენებს, რომ DRL-ზე დაფუძნებული მეთოდი შედარებადი ტრადიციული ოპტიმიზაციის მეთოდებთან ერთი ნახტომის შემთხვევაში. რაც უფრო მნიშვნელოვანია, ის ცხადყოფს, რომ DRL-ით მხარდაჭერილ სქემას ორი ნახტომით შეუძლია გადაცემის დაფარვის გაფართოება 50 პროცენტზე მეტით, სადაც, მიმდებამდე მისვლის პროცესში, გადაცემული სიგნალი განიცდის IS-ების მიერ ორჯერ არეკვლას.

3.7. მესამე თავის დასკვნა

ტერაჰერცული დიაპაზონი არის პერსპექტიული საშუალება, რათა დააკმაყოფილოს 6G მოთხოვნები 2030 წელს და მის შემდგომ პერიოდში. ამ თავში გამოკვლეულია ოთხი ინტერდისციპლინური მიმართულება მოქმედების დიაპაზონის კუთხით შეზღუდვის დასაძლევად და ტერაჰერცული კომუნიკაციების სპექტრული და ენერგეტიკული ეფექტიანობის გასაუმჯობესებლად, მათ შორის ინტეგრირებული ზონდირება და კომუნიკაცია, UM-MIMO და დინამიური ჰიბრიდული სხივის ფორმირება, ინტელექტუალური ზედაპირები, და მანქანური/ღრმა სწავლება. ტერაჰერცული სიხშირეების სპექტრული მახასიათებლების გათვალისწინებით, საფუძვლიანად არის გაანალიზებული ძირითადი ცნებები და იდეები, განხილულია არსებული გადაუწყვეტელი პრობლემები და მოცემულია ამ ტექნოლოგიების მახასიათებლების შეფასება.

თავი 4. მასობრივად პარალელური, არაწრფივი დამუშავება 6G-სთვის

4.1. შესავალი

5G სისტემების ბოლოდროინდელი განთავსების კვალზე, უსადენო კომუნიკაციების საზოგადოებამ დაიწყო ფოკუსირება შესაძლებლობების, გამოყენების შემთხვევების, მახასიათებლების ძირითადი ინდიკატორებისა და შესაბამისი ძირითადი პოტენციური ტექნოლოგიების განსაზღვრაზე 6G-სთვის. მიუხედავად იმისა, რომ ეს დისკუსია ახლახან დაიწყო, არსებობს 6G-ის ატრიბუტები, რომლებიც, როგორც ჩანს, საყოველთაოდ შეთანხმებულია. მაგალითად, 6G ქსელები, სავარაუდოდ, იქნება უკიდურესად მკვრივი, როგორც ქსელის ინფრასტრუქტურის, ასევე დაკავშირებული მოწყობილობების რაოდენობის თვალსაზრისით. მათ შეუძლიათ ძალიან დიდი რაოდენობის მოწყობილობების დაკავშირების უზრუნველყოფა და ტრაფიკის მხარდაჭერა, რომელიც არ არის აუცილებლად ადამიანური ტიპის (მაგალითად, აუდიო, ვიდეო), არამედ შესაძლებელია იყოს მანქანური ტიპისაც. მოსალოდნელია, რომ ასეთი შესაძლებლობები მნიშვნელოვნად გაზრდის ტრანსფორმაციული გამოყენების შემთხვევების სიმრავლეს, დაწყებული გაუმჯობესებული სამრეწველო ავტომატიზაციიდან და ჭკვიანი ტრანსპორტიდან მრავალსენსორულ გაფართოებულ რეალობამდე. უკიდურესი გამკვრივების მისაღწევად, უფრო მაღალი სიხშირული დიაპაზონების ყოვლისმომცველად შესწავლის გარდა (მაგალითად, მილიმეტრული ტალღების და ტერაჰერცული რეჟიმის), ჩვენ დაგვჭირდება იმ მიდგომების შემდგომი ოპტიმიზაცია, რომლითაც ვიკვლევთ ტრადიციულ, 6 გჰც-ის ქვემოთ განთავსებულ სივრცით, სიხშირულ და დროით რესურსებს. ჩვენ დაგვჭირდება არა მხოლოდ ისეთი გადაწყვეტილებები, რომლებიც გაზრდის სისტემის გამტარუნარიანობას და შესაბამისად, სისტემის შესაძლებლობას მხარი დაუჭიროს მეტ მოწყობილობებს, არამედ ისეთებიც, რომლე-

ბსაც შეუძლიათ ეფექტიანად გარდაქმნან ხელმისაწვდომი ტევადობა მაქსიმალურ გამტარუნარიანობაში, რომელიც ეფექტიანად იქნება გაზიარებული მომხმარებელთა დიდი რაოდენობისთვის.

დღეისათვის ნათელია, რომ მრავალმომხმარებლიანი მასიური MIMO (MU-mMIMO) სისტემები, რომლებსაც შეუძლია გაზარდოს უსადენო ქსელებისთვის მიღწევადი გამტარუნარიანობა და დაკავშირების შესაძლებლობები, ფართოდ იქნება გამოყენებული 5G-ში. არსებული MU-mMIMO განლაგება, როგორც წესი, იყენებს წრფივ წინასწარ კოდირების და დეტექტირების მიდგომებს, რომლებიც უმეტეს შემთხვევებში ეფუძნება ZF-ის ან MMSE-ის პრინციპებს. მიუხედავად იმისა, რომ წრფივ დამუშავებას რეალიზაციის სირთულის კუთხით მნიშვნელოვანი პრაქტიკული სარგებელი გააჩნია, ის ასევე განაპირობებს მნიშვნელოვან შეზღუდვებს, რასაც მივყავართ არასრულად ათვისებულ გამტარუნარიანობამდე და შეერთებების შესაძლებლობებამდე, რაც წრფივ დამუშავებას არაეფექტიანს ხდის (თუ არა შეუსაბამოს) 6G სისტემებისთვის. ასეთი შეზღუდვა იწვევს იმას, რომ უზრუნველყოფილი გამტარუნარიანობა მნიშვნელოვნად მცირდება, როდესაც შესაბამისი MIMO არხის მატრიცა არ არის კარგად განსაზღვრული. ეს მათემატიკური ატრიბუტი ითარგმნება მნიშვნელოვან პრაქტიკულ შეზღუდვებში. მაგალითად, MU-mMIMO პარამეტრებს, მომართულს წრფივი დამუშავებით, როგორც წესი, შეუძლია მხარი დაუჭიროს საინფორმაციო ნაკადების (და შესაბამისად მომხმარებლების) რიცხვს, რაც გაცილებით მცირეა, ვიდრე საბაზო სადგურის ანტენების რაოდენობა. ქსელის დაბალი სიმკვრივის შემთხვევაში, წრფივი დამუშავების მეთოდების მახასიათებლები შეიძლება გაუმჯობესდეს MIMO გადაცემაში მონაწილე ყველა მომხმარებლის მოწყობილობის (UE) ერთდროული იდენტიფიცირებით და დაგეგმვით, რომელთათვისაც მათი შესაბამისი MIMO არხი კარგად არის განსაზღვრული. თუმცა, მიუხედავად დამატებითი სირთულისა და სიგნალიზაციის მიმართ მოთხოვნებისა, როგორც მოგვიანებით იქნება ნაჩვენები, ასეთი მიდგომებით ჯერ კიდევ

ვერ ხერხდება MIMO არხის შესაძლებლობების სრულად გამოყენება. კიდევ ერთი მნიშვნელოვანი შეზღუდვა, რომელიც დაწესებულია სიგნალების წრფივი დამუშავების მიმართ, როგორც საბაზო სადგურზე, ასევე UE მხარეს, არის ის, რომ ეს მეთოდი ხელს უშლის მათ უზრუნველყონ უფრო მეტი ინფორმაციული ნაკადის მხარდაჭერა, ვიდრე ანტენების რაოდენობაა, რაც ზღუდავს ქსელის დაკავშირების შესაძლებლობებს. ანალოგიურად, განაწილებული MU-mMIMO-ს განვითარების შემთხვევაში, სადაც მრავალი საბაზო სადგურის მიერ გადაცემული და/ან მიღებული სიგნალები ერთობლივად მუშავდება სიხშირეთა საბაზისო ზოლში, წრფივი დამუშავება ართულებს ლოკალური და დეცენტრალიზებული (თითო საბაზო სადგურზე) დამუშავების მცდელობას და აწესებს ან მკაცრი სინქრონიზაციის მოთხოვნებს, და/ან იწვევს ინფორმაციის ინტენსიურ გაცვლას განაწილებულ ანტენებს/საბაზო სადგურებს შორის.

კიდევ ერთი მნიშვნელოვანი გამოწვევა, რომლის გადალახვაც 6G სისტემებს დასჭირდება, არის მანქანური ტიპის ტრაფიკის ზრდა, როდესაც მანქანების დიდი რაოდენობა ითხოვს წვდომას ქსელში. ადამიანური ტიპის ინფორმაციისგან განსხვავებით, მანქანურ ტიპს შეიძლება ჰქონდეს დაბალი საინფორმაციო სიჩქარე (მაგალითად, საკონტროლო სიგნალებისთვის). თუმცა, ტრადიციული, მაღალი გამტარუნარიანობის მქონე ლინკების განაწილებამ მოწყობილობებზე, რომლებსაც სურთ ინფორმაციის მიწოდება დაბალი სიჩქარით, შეიძლება გამოიწვიოს სიხშირული და დროითი რესურსების მნიშვნელოვანი დანაკარგები. ამ კონტექსტში, NOMA ტექნიკამ ბოლო დროს დიდი ყურადღება მიიპყრო. თუმცა, ახლახან შემოთავაზებული NOMA სქემების დიზაინი და დაკავშირების შესაძლებლობები, როგორც წესი, განისაზღვრება განზრახ გადაცემული, ურთიერთხელშემშლელი ინფორმაციის ნაკადების ეფექტიანად დეკოდირების უნარით. ასეთი დეკოდირების ტექნიკა არ არის წრფივი და ამასთან, დაფუძნებულია შეტყობინებების გატარების (message-passing) ან მოლოდინის გავრცელების (expectation-propagation)

მიდგომებზე, რომლებიც მოითხოვს დროის და სიხშირულ რესურსებზე წვდომის მეთოდში ერთგვარ გამეჩხერებას, რასაც ამ რესურსების არასაკმარის გამოყენებამდე მივყავართ. გარდა ამისა, NOMA-ს დეტექტირების ტრადიციულ მიდგომებში, დეტექტირების სირთულე და დამუშავების შეყოვნება ექსპონენტურად იზრდება დროით-სიხშირული რესურსის შესაბამისად გამოყოფილ არაორთოგონალური მომხმარებლების რაოდენობასთან ერთად.

ტრანსივერსის არაწრფივი დამუშავება იძლევა ძლიერ პოტენციალს ყველა ზემოაღნიშნული პრობლემის გადასაჭრელად და მომავალი მობილური სისტემების მიღწევადი გამტარუნარიანობის, დაკავშირების შესაძლებლობების არსებითად გაუმჯობესების კუთხით. თუმცა, ცნობილია, რომ ტრადიციული არაწრფივი დამუშავება ძალზე მოთხოვნადია გამოთვლითი რესურსების მიმართ და ბუნებით მიმდევრობითი ხასიათისაა. განსაკუთრებით დიდი რაოდენობით ერთდროულად გადაცემული ინფორმაციული ნაკადების შემთხვევაში, არაწრფივი დამუშავების შეყოვნება შეიძლება აღემატებოდეს არსებული და მომავალი მობილური სისტემების დამუშავების შეყოვნების მოთხოვნებს სიდიდის რამდენიმე რიგით.

დამუშავების ეს მოთხოვნები, მიკროპროცესორების სიჩქარის მატებასთან ერთად, ხელს უშლის პრაქტიკული საკომუნიკაციო სისტემების მიერ არაწრფივი მიდგომების გამოყენებას. ამ კონტექსტში, საჭიროა ახალი მასობრივად პარალელური დამუშავების სტრუქტურა, რომელსაც შეუძლია ეფექტიანად, მოქნილად მოახდინოს არაწრფივი დამუშავების პარალელიზება და შეისწავლოს მრავალბირთვიანი არქიტექტურა, რომელსაც თავის მხრივ შეუძლია ათასობით ლოგიკური ბირთვის განთავსება. იდეალურ შემთხვევაში, ასეთი პარალელიზების სტრუქტურა უნდა იძლეოდეს არა მარტო შესაბამისი გამოთვლითი დატვირთვის ქვეპროცესებად დაყოფის შესაძლებლობას, რომლებიც შეიძლება გამოითვალოს ერთდროულად, მან ასევე უნდა უზრუნველყოს დამუშავების ძალისხმე-

ვის ფოკუსირება იმ პარალელურ ქვეპროცესებზე, რომლებიც ყველაზე მნიშვნელოვანია თითქმის ოპტიმალური მახასიათებლების მისაღწევად. შედეგად, ასეთი სტრუქტურა მისაღები უნდა იყოს სირთულის კუთხით და მას უნდა შეეძლოს უზრუნველყოს დამუშავების შეყოვნება, მსგავსი წრფივი მიდგომებისა, თუნდაც ათობით ერთდროულად გადაცემული ინფორმაციის ნაკადისთვის. როგორც ქვემოთ დეტალურად იქნება განხილული, ასეთი მასობრივად პარალელური არაწრფივი (MPNL) დამუშავების სტრუქტურა უკვე შემოთავაზებულია და მიღებულია რამდენიმე იმედისმომცემი პირველი შედეგი. ამ თავის დანარჩენ ნაწილში განიხილება, თუ როგორ შეიძლება ამგვარმა სტრუქტურამ არსებითად გააუმჯობესოს 6G სისტემების პრაქტიკულობა, მიღწევადი გამტარუნარიანობა და დაკავშირების შესაძლებლობები.

4.2. ტრადიციული და მასობრივად პარალელური არაწრფივი დამუშავება

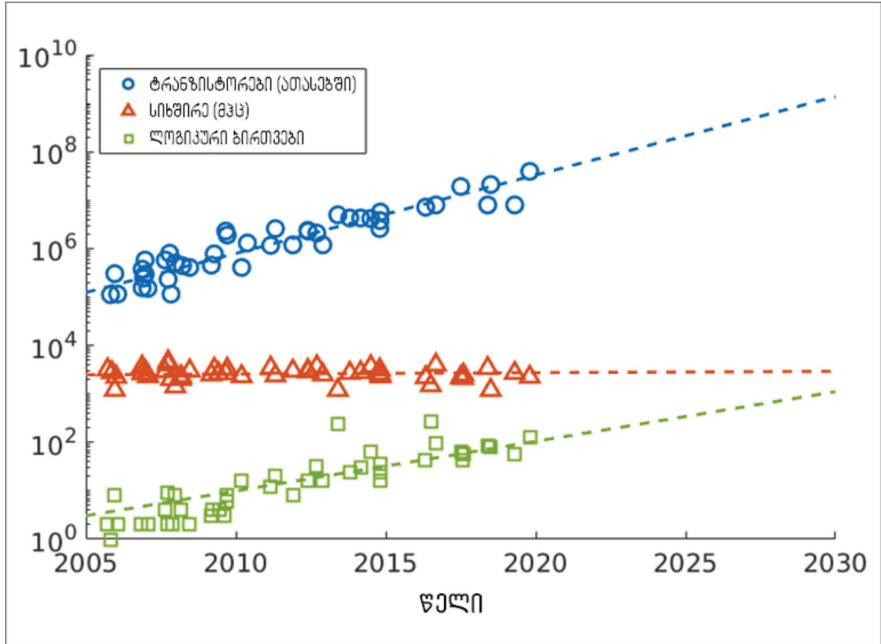
MU-mMIMO სისტემებში, ინფორმაცია თითოეულ მიმღებ ანტენაზე არის რამდენიმე ერთდროულად გადაცემული ინფორმაციული ნაკადის სუპერპოზიცია. MIMO-ს დამუშავების სხვადასხვა მიდგომა ცდილობს გაუმკლავდეს ამ განზრახ შემოტანილ ინტერფერენციებს სხვადასხვა გზით. MIMO-ს წრფივი დამუშავების მიდგომა მიზნად ისახავს MIMO-ს ინტერფერენციული არხის რამდენიმე ინტერფერენციის გარეშე ან მსუბუქი ინტერფერენციის ქვეშ მყოფ არხად გადაქცევას. თუმცა, შედეგად მიღებული MIMO-ს არხი აღარ ინარჩუნებს პირვანდელ მახასიათებლებს და როგორც ქვემოთაა ნაჩვენები, ამან შეიძლება გამოიწვიოს არსებითად შემცირებული როგორც კავშირის შესაძლებლობები, ასევე მიღწევადი „წმინდა“ გამტარუნარიანობა. ამის საპირისპიროდ, დამუშავების არაწრფივი მიდგომები ერთობლივად მართავს ურთიერთინტერფერენციულ ნაკადებს, MIMO-ს არხის მახასიათებლების გათვალისწინებით, მისი თანდაყოლილი შესაძლებლობების გარდაქმნის ან დეგრადაციის გარეშე.

მიუხედავად ამისა, ეს ჩვეულებრივ მოდის ძალიან დიდი დამუშავების, სირთულისა და შეყოვნების ფასად, თუ გამოიყენება ტრადიციული, მიმდევრობითი მიდგომები.

არაწრფივი დამუშავება მოითხოვს ერთი ან რამდენიმე დისკრეტული, მაღალი რიგის უმცირესი კვადრატების ამოცანის ამოხსნას, ყველა დასაშვები გადამცემი ვექტორისთვის. ამომწურავი ძიებით მინიმუზაციის ასეთი პრობლემის გადაჭრის თავიდან ასაცილებლად, შემოთავაზებულია სფეროს დეკოდირებაზე დაფუძნებული ზუსტი და მიახლოებითი მიდგომები, რომლებიც შესაბამის პრობლემას გარდაქმნის ხისმაგვარ დიაგრამაზე ძიებად. და მაინც, ასეთი მიდგომები იწვევს მახასიათებლის მნიშვნელოვან დეგრადაციას ოპტიმალურ არაწრფივ დამუშავებასთან შედარებით; მეორე მხრივ, მათი მიმდევრობითი ხასიათის გამო, ისინი ხასიათდება დამუშავების შეყოვნების მოთხოვნებით, რომლებიც არაპრაქტიკულია. მაგალითად, იმისთვის, რომ მიმდევრობითმა სფერულმა დეკოდერმა შეასრულოს 24 ინფორმაციული ნაკადის ერთობლივი „რბილი“ დეტექტირება, MU-MIMO-ს აპლინკის არხში 32 საბაზო სადგურის ანტენით 17 დბ-ის დონეზე, მას, სფეროს დეკოდირების ალგორითმით, დასჭირდება ხისმაგვარი დიაგრამის დაახლოებით 10^{12} კვანძის მონახულება. ტრადიციულ (ციკლში ერთი კვანძის დამუშავების) არქიტექტურაში, მაშინაც კი, თუ შესაძლებელი იქნება 1 გჰც-ის დამუშავების სიხშირის მიღწევა, ეს გამოიწვევს დეკოდირების დროს – მეოთხედ საათზე მეტს ერთ ანათვალზე.

მაშინ, როდესაც ტრადიციული თანამედროვე პროცესორების სიჩქარე სტაბილიზდება, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 4.1-ზე, ახალ მიკროპროცესორულ არქიტექტურას შეიძლება ჰქონდეს ასობით ან თუნდაც რამდენიმე ათასი ლოგიკური ბირთვი. მიუხედავად ამისა, ფიზიკური ფენის ტრადიციული ალგორითმები, მათ შორის არაწრფივი MIMO-ს დამუშავებისთვის განკუთვნილი, არის მკაცრად მიმდევრობითი ან აქვს შეზღუდული პარალელიზების შესაძლებლობები. შესაბამისად, ისინი

არ არის შესაფერისი ასეთი არქიტექტურის დამუშავების შესაძლებლობების სრულად გამოსაყენებლად. ათასობით ლოგიკური ბირთვის (დამუშავების ელემენტის (PE)) არსებობის პირობებში, გამოწვევაა, როგორ მოვძებნოთ პარალელიზების ახალი მეთოდები, რომლებსაც შეუძლია ეფექტიანად და მოქნილად გამოიკვლიოს ხელმისაწვდომი PE-ების ეს უზომოდ დიდი რაოდენობა.



ნახ. 4.1. მიკროპროცესორების ევოლუცია 2005 წლიდან 2020 წლამდე და პროგნოზირებული 2030 წლამდე, ტრანზისტორების რიცხვის, სამუშაო სიხშირისა და ლოგიკური ბირთვების რაოდენობის მიხედვით

გამოთვლით გარემოში, რომელიც შედგება PE-ების დიდი და მასობრივი რაოდენობისგან, ჩვენ გვჭირდება „იდეალური“ პარალელიზების მიდგომები, რომლებიც იქნება:

- სირთულის მიხედვით ეფექტიანი: მათ თავიდან უნდა აიცილონ არასაკირო გამოთვლები;

- სირთულე-მახასიათებლის მიხედვით „ელასტიკური“: მათ უნდა შეეძლოთ გამოიკვლიონ ნებისმიერი რაოდენობის ხელმისაწვდომი PE-ები, რათა მუდმივად შეამცირონ დამუშავების შეყოვნება და/ან გაზარდონ მიღწევადი მახასიათებელი;
- თითქმის „დამოუკიდებელი პარალელური“: პარალელურად დამუშავებულ ქვეამოცანებს შორის უნდა იყოს მინიმალური დამოკიდებულებები, ვინაიდან ასეთმა დამოკიდებულებებმა შეიძლება არსებითად შეამციროს პარალელური დამუშავების მოგება;
- ადაპტირებადი გადაცემის პირობებზე: მათ უნდა შეეძლოთ დამუშავების პროცესის სწორად განაწილება და ფოკუსირება გადაცემის სცენარის, არხის მახასიათებლებისა და დამუშავების შეყოვნებაზე მიზნობრივი მოთხოვნების გათვალისწინებით;
- განხორციელების ტექნოლოგიით მიხედვით გამჭვირვალე: ისინი უნდა განხორციელდეს სხვადასხვა გამოთვლითი ტექნოლოგიებით (მაგალითად, მომხმარებლის მიერ პროგრამირებადი კარიბჭის მასივებით (FPGA) ან გრაფიკული დამუშავების ბლოკებით (GPU)).

შემოთავაზებულია რამდენიმე მცდელობა, რომელიც საშუალებას იძლევა პარალელურად გადაიჭრას სფერული დეკოდირების პრობლემა (მაგალითად, ფიქსირებული სირთულის სფერული დეკოდერის (FCSD) შემოტანა, რომელიც მასობრივად პარალელიზდება მინიმალური დამოკიდებულებით პარალელურად დამუშავებულ ქვეამოცანებს შორის). არაწრფივი დამუშავების მიდგომების მიზნებია შესაბამისი საძიებო სივრცის შემცირება და დარჩენილი კანდიდატი ვექტორული გადაწყვეტილებების ეფექტიანი დამუშავება ქმედითი გამოთვლითი გზით, ანუ ინტენსიური გამოთვლითი ოპერაციების გამოყენების გარეშე, როგორცაა დახარისხება, რამაც შეიძლება მნიშვნელოვნად შეამციროს დამუშავების ეფექტიანობა. ამის განსახორციელებლად, მეთოდების უმეტესობა იყენებს ევრისტიკულ მიდგომას პერსპექტიული კანდიდატი გადაწყვე-

ტილებების დასადგენად, რომლებიც მოთავსებულია მიღებული სიგნალის გარშემო მრავალგანზომილებიან სფეროში. თუმცა, როგორც ქვემოთაა ნაჩვენები, ასეთი ევრისტიკა ზღუდავს ამ მიდგომების ეფექტიანობას და მათ სირთულეს არაელასტიკურს ხდის.

ევრისტიკული მიდგომის გამოყენების ნაცვლად, მულტისფერო არის ერთადერთი მიდგომა, რომელიც ზუსტად განსაზღვრავს უმცირესი კვადრატების არაწრფივი ამოცანის ყველაზე პერსპექტიულ ვექტორულ ამონახსნებს და რაოდენობრივად აფასებს შესაბამის ალბათობას ახლად შემოდებული ე.წ. „დაპირების მეტრიკის“ საშუალებით, რომელიც ითვალისწინებს გადაცემის პირობებს. ეს იდენტიფიკაცია მიიღწევა გადაცემულ (არაწრფივი წინასწარი კოდირების შემთხვევაში) ან მიღებულ (არაწრფივი დეტექტირების შემთხვევაში) სიგნალთან ფარდობითი მანძილების მიხედვით და პროცესი ხორციელდება ნებისმიერი სიგნალის გადაცემამდე/დეტექტირებამდე. შემდეგ, მულტისფერო ამუშავებს მხოლოდ ამ ყველაზე პერსპექტიულ ვექტორულ გადაწყვეტილებებს, პარალელურ რეჟიმში. მაგალითად, აპლინკის 3x3 MU-MIMO დეტექტირების ამოცანისთვის, UE-ების მიერ 64-სიგნალიანი კვადრატული ამპლიტუდური მოდულაციის (64-QAM) გამოყენებისას, გვაქვს 643 პოტენციური ვექტორული გადაწყვეტა, რომლებიც შეიძლება დამუშავდეს პარალელურად. თუ ვივარაუდებთ, რომ ხელმისაწვდომია მხოლოდ ოთხი PE, დამუშავების შეყოვნების შესამცირებლად და ამავე დროს, დეტექტირების მახასიათებლის მაქსიმიზაციისათვის, ჩვენ უნდა დავამუშაოთ ოთხი ყველაზე პერსპექტიული ვექტორი, რათა განვახორციელოთ არაწრფივი პრობლემის გადაწყვეტა. მულტისფეროს „დაპირების მეტრიკის“ გამოყენებით, ამ ვექტორული გადაწყვეტილებების ადვილად იდენტიფიცირება შესაძლებელია მიღებულ სიგნალთან მათი ფარდობითი მანძილის ფუნქციით. თუ მაგალითად, მესამე ყველაზე პერსპექტიული გადაწყვეტილება მოცემულია ფარდობითი მანძილის ვექტორით $[1, 2, 1]^T$ (T აღნიშნავს ტრანსპონირებას), ეს ნიშნავს, რომ მესამე ყველაზე პერსპექტი-

ული ვექტორული ამოხსნის მოსაძებნად, როდესაც მიღებული სიგნალი ხელმისაწვდომია, ჩვენ უბრალოდ უნდა ვიპოვოთ პირველი უახლოესი სიმბოლო ამ მიღებულ სიგნალთან სფერული დეკოდირების ხისმაგვარი დიაგრამიდან პირველი და მესამე დონისთვის, ხოლო მეორე უახლოესი სიმბოლო ამ მიღებულ სიგნალთან სფერული დეკოდირების ხისმაგვარი დიაგრამიდან მეორე დონისთვის. ეს ფაქტობრივი სიმბოლოები იდენტიფიცირდება და პარალელურად მუშავდება მულტისფეროს, სირთულის მიხედვით ეფექტიანი, უკუასახვის პროცედურის მეშვეობით, რაც თავიდან აგვაცილებს დახარისხების აუცილებლობას.

მულტისფეროს ეფექტიანობა შთამბეჭდავი მოგებებით დადასტურებულია, როგორც FPGA, ასევე GPU ტექნოლოგიებზე. კერძოდ, ნაჩვენებია, რომ არაწრფივი, დროის რეალურ მასშტაბში, 12×12 MIMO-ს წარმატებული დეტექტირების მიღწევა შესაძლებელია Maxwell-ზე დაფუძნებული GTX970 მოწყობილობისთვის, გრძელვადიანი ევოლუციის (LTE-ის) ყველა სიხშირული გატარების ზოლისთვის. მულტისფერო ასევე იქნა რეალიზებული FPGA-ებზე, რაც აჩვენებს, რომ მაღალი რიგის MIMO სისტემებისთვისაც კი, არაწრფივი დამუშავება შეიძლება შესრულდეს შეყოვნების მოთხოვნებით, რომლებიც მსგავსია წრფივი მიდგომების მოთხოვნების და სირთულის მოთხოვნებით, რომლებიც სიდიდის მინიმუმ ერთი რიგით უფრო დაბალია, ვიდრე ეს გააჩნია სხვა არსებულ მიდგომებს, რომლებიც იყენებს პარალელიზებას.

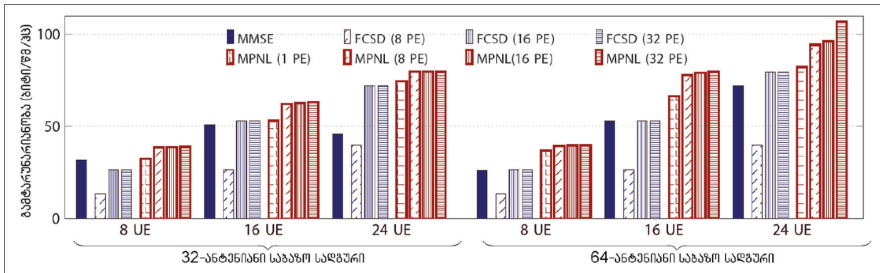
4.3. მასობრივად პარალელური, არაწრფივი დამუშავება, როგორც 6G-ის რეალიზაციის საშუალება

მთავარი კითხვაა, შეუძლია თუ არა MPNL-ს პოტენციურად მოახდინოს რევოლუცია 6G სისტემებში? ქვემოთ განიხილება გადაცემის რამდენიმე სცენარი, რომელიც აჩვენებს, რომ მას ნამდვილად შეუძლია უზრუნველყოს მნიშვნელოვანი უპირატესობები მახასიათებლების კუთხით და ასევე, შეუძლია წარმოადგინოს ფიზიკური ფენის ახალი კონ-

სტრუქციები ისეთი შესაძლებლობებით, რომლებიც არ გააჩნიათ თანამედროვე სისტემებს.

MPNL დამუშავება MU-mMIMO სისტემებისთვის: მე-3 თაობის პარტნიორობის პროექტის (3GPP) კონტექსტში, ცოტა ხნის წინ დადასტურდა, რომ MPNL დამუშავებას შეუძლია უზრუნველყოს გამტარუნარიანობის 57 პროცენტამდე გაზრდა. და მაინც, აუცილებელია კითხვაზე პასუხის გაცემა: შეუძლია თუ არა მულტისფეროს, და ზოგადად, MPNL დამუშავებას, რაიმე მნიშვნელოვანი მოგების მიღწევა mMIMO-ს განვითარების კუთხით, სადაც საბაზო სადგურის მხარეს ხელმისაწვდომია ანტენების ძალიან დიდი რაოდენობა? ნახ. 4.2 გვიჩვენებს მიღწევად გამტარუნარიანობას MU-mMIMO აპლინკის გადაცემისთვის 3GPP-ის მიხედვით, კლასტერული შეყვანების ხაზის - B (CDL-B) არხზე, ერთანტენიანი UE-ების სხვადასხვა რაოდენობისთვის და საბაზო სადგურის ანტენებისთვის, წრფივი (მაგალითად, MMSE) და მულტისფერო MPNL დამუშავებისთვის სხვადასხვა რაოდენობის PE-ების შემთხვევაში. მულტისფერო MPNL დამუშავების მიდგომა ასევე შედარებულია FCSD-თან, რომელიც, როგორც უკვე განვიხილეთ, ავლენს ძალიან კარგ პარალელიზების თვისებებს. ივარაუდება, რომ UE-ები ნაწილდება შემთხვევით წესით, 60 გრადუსიანი კუთხის ფარგლებში საბაზო სადგურიდან. სიჩქარის ადაპტაციის შესაბამისი მეთოდების არარსებობის შემთხვევაში, ნაჩვენებია გამტარუნარიანობა არის მაქსიმალური რამდენიმე ტიპის QAM-სთვის (მაგალითად, გამოიყენება 4-QAM, 16-QAM, 64-QAM) და ხელშეშლამდგრადი კოდისთვის (მაგალითად, გამოიყენება 3GPP-სთან თავსებადი დაბალი სიმკვრივის ლუწობის შემმოწმებელი (LDPC) კოდები ბლოკის სიგრძით 648 და კოდური სიჩქარეებით 1/2, 2/3, 3/4, 5/6), თითოეული მომხმარებლისთვის ერთი და იგივე საშუალო SNR-ით, რომელიც ტოლია 25 დბ-ის. ვივარაუდოთ, რომ ერთ მომხმარებელზე მოსული ერთი და იგივე SNR ამცირებს არხის მატრიცის პირობადადებულობის რიცხვს (condition number) და შესაბამისად, ზღუდავს არაწრფივი დამუშავების

უპირატესობებს. მოსალოდნელია უფრო დიდი მოგება MPNL დამუშავების მიდგომებისთვის, როდესაც მომხმარებლები შეირჩევიან შემთხვევითი წესით. ვინაიდან FCSD-ს შეუძლია გამოიკვლიოს მხოლოდ PE-ების ის რაოდენობა, რომლებიც არის QAM სიგნალური კონსტელაციის რიგის ხარისხი, ნაჩვენები შესაბამისი გამტარუნარიანობა არის მაქსიმალური მნიშვნელობის QAM კონსტელაციებისთვის, კოდური სიჩქარეებისთვის და შესაძლო PE ალოკაციებისთვის, რომელიც დაშვებულია FCSD-დან, ხელმისაწვდომი PE-ების მოცემული რაოდენობისთვის. როგორც ნახ. 4.2-ზეა ნაჩვენები, ვინაიდან FCSD-სგან განსხვავებით, მულტისფერო MPNL მიდგომას აქვს უნარი ზუსტად განსაზღვროს და გამოიყენოს ნებისმიერი ხელმისაწვდომი გამოთვლითი სიმძლავრე (ანუ PE-ები) ყველაზე პერსპექტიულ ვექტორულ გადაწყვეტილებებში, ის სირთულის მიხედვით უფრო ეფექტიანია, ვიდრე FCSD და შეიძლება გამოიწვიოს გამტარუნარიანობის გაზრდა 100 პროცენტამდე რვა PE-სთვის. გარდა ამისა, FCSD-სგან განსხვავებით, რომელიც იყენებს ევრისტიკულ მიდგომას და შესაბამისად, მას არ შეუძლია ზუსტად განსაზღვროს ყველაზე პერსპექტიული გადაწყვეტილებები, მულტისფერო არის ელასტიკური და შეუძლია მუდმივად გააუმჯობესოს მახასიათებლები PE-ების რაოდენობის გაზრდით, სანამ არ მიაღწევს ოპტიმალურ მნიშვნელობას.



ნახ. 4.2. MU-mMIMO-ს აპლინკის მიღწევადი გამტარუნარიანობა წრფივი, MPNL (მულტისფერო) დამუშავებით და FCSD-თი სხვადასხვა რაოდენობის PE-ებით, ასევე სხვადასხვა რაოდენობის საბაზო სადგურების ანტენებით და UE-ებით, 3GPP CDL-B არხისთვის

32-ანტენიანი საბაზო სადგურისთვის, 24 UE-ის წრფივი დამუშავებით მხარდაჭერის მცდელობისას, საშუალო გამტარუნარიანობა ერთ მომხმარებელზე მცირდება. ამის საპირისპიროდ, MPNL დამუშავების პლატფორმას შეუძლია მხარი დაუჭიროს 24 მომხმარებელს და ამასთან, გააუმჯობესოს „წმინდა“ გამტარუნარიანობა, თანაც შესაბამისი გამტარუნარიანობის ზრდა ხდება თითქმის 50 პროცენტით. ერთი და იმავე „წმინდა“ გამტარუნარიანობის მქონე მომხმარებლების ერთი და იგივე რაოდენობის მხარდასაჭერად, ტრადიციულ mMIMO სისტემას წრფივი დამუშავებით დასჭირდება ანტენების ორჯერ მეტი რაოდენობა, მიუხედავად იმისა, რომ ნაკლები ანტენების მქონე საბაზო სადგურს აქვს საანტენო მესრის უფრო მცირე გაძლიერება.

MPNL დეკოდერებისგან განსხვავებით, ტრადიციული, მიმდევრობითი, ერთ ციკლში ერთი კვანძის დამამუშავებელი სფეროს დეკოდერი „რბილი“ გადაწყვეტილებით, არ შეიძლება იყოს მასობრივად პარალელიზებული და 16 UE-ის მხარდასაჭერად დასჭირდება დაახლოებით 10⁷ დამუშავების ციკლი, ხოლო 24 UE-სთვის ეს რიცხვი აიწევს 10¹² ციკლამდე. ეს ნიშნავს, რომ ერთი გიგაჰერცის დამუშავების სიხშირის დაშვებითაც კი, მიღებული ამონარჩევის „რბილი“ დეტექტირება/უკუასახვა მოითხოვს დაახლოებით 10 მწმ-ს 16 UE-სთვის, ხოლო 24 UE-სთვის აღნიშნულს დასჭირდება მეოთხედ საათზე მეტი. ამის საპირისპიროდ, მსგავსი MPNL დამუშავების არქიტექტურის შეყოვნება ციკლებში იქნება UE-ების რაოდენობის რიგის, ისევე როგორც წრფივი მიდგომებისთვის. მაშინ, შესაბამისი დამუშავების დრო 24 UE-სთვის იქნება რამდენიმე ათეული ნანოწამი.

ასევე უნდა აღინიშნოს, რომ წარმოდგენილი შედეგები ეხება MIMO-ს ერთი მიღებული სიგნალის დეტექტირებას, რომელიც სისტემებში მრავალი გადამტანი სიხშირით ხდება ქვეგადამტანის დონეზე. ათასობით ბირთვიანი მიკროპროცესორების გაჩენა (ნახ. 4.1) საშუალებას მოგვცემს შესრულდეს არაპარალელური დეტექტირება, და შეიქმნას ფიზიკური

ფენა, რომელიც მოიცავს ათასობით ქვემგადამტანს პარალელურად, რაც უზრუნველყოფს მხოლოდ ათობით ნანოწამის შეყოვნებებს დამუშავებისას.

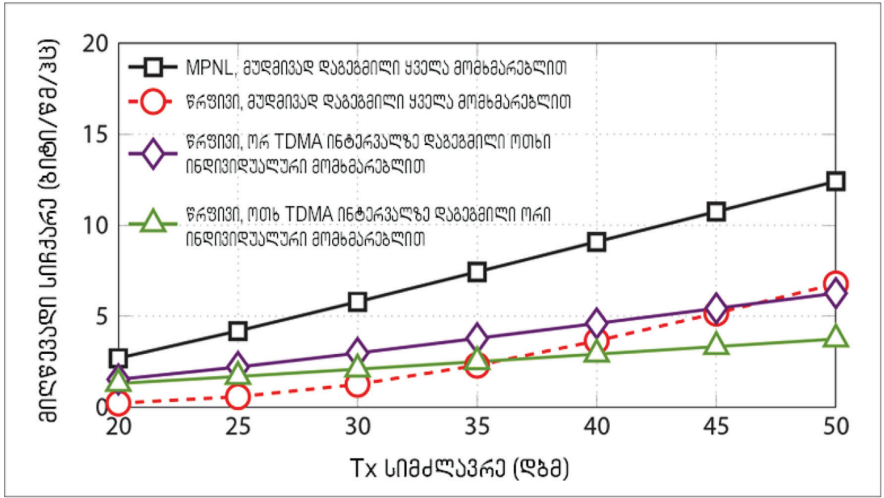
სირთულის თვალსაზრისით, ლიტერატურაში განხილული მიდგომა მოითხოვს კომპლექსური გამრავლებების რაოდენობას, შესაბამისად 10^8 რიგისა 16 UE-სთვის და 10^{13} რიგისა 24 UE-სთვის. ამის საპირისპიროდ, MPNL დამუშავების სირთულე თითო PE-ზე განისაზღვრება, როგორც $K(1+(K+1)/2)$ კომპლექსური გამრავლება (სადაც K არის UE-ების რაოდენობა), რაც 32 PE-ის და 24 UE-ის შემთხვევაში გამოიწვევს სირთულის სიდიდის ცხრა რიგით შემცირებას. წრფივი დეტექტირების დამუშავების სირთულე არის NK კომპლექსური გამრავლების რიგის, სადაც N არის საბაზო სადგურის ანტენების რაოდენობა. ამიტომ, როგორც ნაჩვენებია ნახ. 4.2-ზე, მაშინაც კი, როდესაც MPNL დამუშავება იყენებს მხოლოდ ერთ PE-ის და მისი სირთულე წრფივი მიდგომების მსგავსია, MPNL დამუშავება ყოველთვის უზრუნველყოფს თანაბარ ან უკეთეს გამტარუნარიანობას, ვიდრე წრფივი დამუშავების მიდგომები.

მულტიფერო MPNL დამუშავების 4G კონტექსტში განხორციელებისას, ის მოითხოვს ვატის რიგის ენერგომომხმარებას, როდესაც შემუშავებულია FPGA ტექნოლოგიის გამოყენებით ან ვატზე დაბალ ენერგომომხმარებას, როდესაც შემუშავებულია ძალიან ფართომასშტაბიანი ინტეგრაციის (VLSI) არქიტექტურებზე. ასევე ნაჩვენებია, რომ მისი შესაბამისი ენერგოეფექტიანობა თითქმის 30-ჯერ უკეთესია, ვიდრე FCSD-სი. მიუხედავად ამისა, MPNL დამუშავების სტრუქტურის ერთ-ერთი ყველაზე საინტერესო მახასიათებელია მისი შესაძლებლობა, გაზარდოს სიმძლავრე საბაზო სადგურის მხარეს. როგორც ნახ. 4.2-ზეა ნაჩვენები, MPNL დამუშავების გამოყენებისას ჩვენ შეგვიძლია 24 UE-ის მხარდაჭერა საბაზო სადგურის 32 ანტენით, ნაცვლად 64-ისა, რომლებიც საჭიროა საბაზო სადგურის წრფივი დამუშავების შემთხვევაში. კვლევითი მიზნებისთვის განკუთვნილი, 64-ანტენიანი საბაზო სადგურის ასაგებად Ettus

N310 უნივერსალური პროგრამული რადიოპერიფერიული მოწყობილობების (USRP) გამოყენებით, ჩვენ დაგეგმობთ 16 N310 მოწყობილობა, თითოეული 50 ვტ-ის ტოლი მიახლოებითი მინიმალური მოხმარებული სიმძლავრით. USRP-ების რაოდენობის ორჯერ შემცირება, MPNL დამუშავების გამოყენების პირობებში, გამოიწვევს სიმძლავრის დაზოგვას 400 ვტ-ით.

MPNL დამუშავება ექსტრემალურად დიდი სიმკვრივის უზრუნველსაყოფად: როგორც ადრე განვიხილეთ, წრფივი დამუშავების შეზღუდვების თავიდან აცილების ერთ-ერთი გზა არის მოხმარებლების დაგეგმვა, რაც მოითხოვს მნიშვნელოვან გამოთვლით რესურსებს. არაწრფივ დამუშავებას აქვს ძლიერი პოტენციალი გაამარტივოს ან საერთოდ თავიდან აგვაცილოს ასეთი დაგეგმვა. ეს პოტენციური მიღწევები ნაჩვენებია ნახ. 4.3-ზე მოცემულ საილუსტრაციო შედეგებში, რომელიც ითვალისწინებს რვა ერთანტენიან მოხმარებელს, რომლებსაც სურთ მოემსახურონ რვა ანტენის შემცველ საბაზო სადგურს დაუნლინკზე. არხის გამოყენებული მოდელი არის ფართოდ მიღებული, გამარტივებული და ადვილად რეპროდუცირებადი, რომელიც მოიცავს მცირე და ფართომასშტაბიან მიყუჩებას. პირველი მოდელირებულია როგორც რელიის მიყუჩება, ხოლო მეორე მოდელირებულია გზაში დანაკარგების ექსპონენტის მაჩვენებლით 2.8 და ლოგ-ნორმალური კანონით განაწილებული დაჩრდილვით, სტანდარტული გადახრით 8.3. UE-ები მოთავსებულია ნებისმიერ მანძილზე საბაზო სადგურებიდან, 10-დან 500 მეტრამდე. ხმაურის სიმძლავრეა -101 დბმ. იმის გამო, რომ ტრადიციული წრფივი დამუშავება მოითხოვს ანტენების მცირე რაოდენობის მომსახურებას ერთდროულად, განიხილება ორი შემთხვევა. პირველში, მრავალჯერადი წვდომა დროითი დაყოფით (TDMA) მეთოდის ორი დროითი ინტერვალია ნავარაუდები, და თითოეულ ინტერვალში ხდება ოთხი მოხმარებლის მომსახურება. მეორე შემთხვევაში, ოთხი TDMA დროითი ინტერვალია ნავარაუდები, სადაც თითოეულ ინტერვალში ხდება ორი მოხმარებლის მომსახუ-

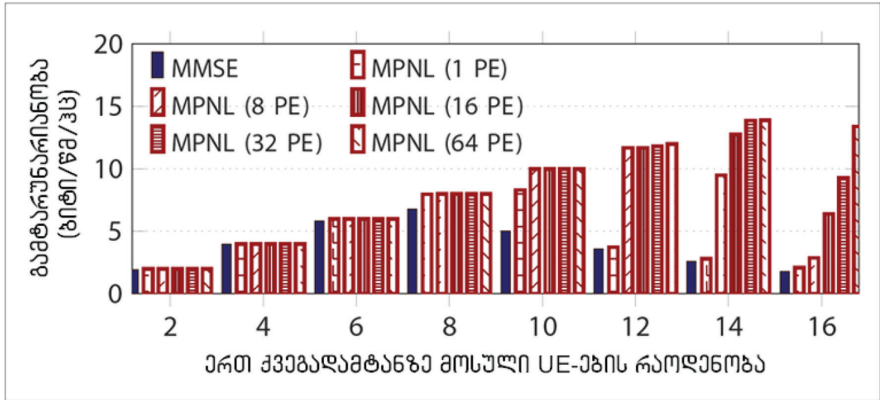
რება. ნაჩვენები გამტარუნარიანობა არის ის, რომელიც ახდენს გასაშუ-
 ალოებული (დროის მიხედვით) მიღწევადი გამტარუნარიანობის მაქ-
 სიმიზაციას დაგეგმვის მიდგომისთვის (სრული გადარჩევის მეთოდის
 გამოყენებისას). იმავე ნახ. 4.3-ზე, ჩვენ ვაჩვენებთ ვექტორულად პე-
 რტურბირებული (vector-perturbed) MPNL-ისა და სხივის ტრადიციული
 წრფივი ფორმირების (ანუ ZF-ის) მიღწევად გამტარუნარიანობას, როდე-
 საც ხდება რვავე მომხმარებელის ერთდროული მომსახურება. MPNL-ის
 მიღწევადი სიჩქარე მიიღება სიმძლავრის ნორმალიზაციის კოეფიციენ-
 ტის ქვედა ზღვრის გამოყენებით. ნახ. 4.3 ადასტურებს, რომ უკიდურე-
 სად მკვრივ სცენარებში, სადაც ჩვენ გვსურს მხარი დავუჭიროთ მომხ-
 მარებელთა დიდ რაოდენობას ერთსა და იმავე დროით-სიხშირულ რე-
 სურსებზე, MPNL დამუშავებას შეუძლია უზრუნველყოს მნიშვნელოვანი
 ზრდა გამტარუნარიანობის კუთხით წრფივ მიდგომებთან შედარებით
 და ამასთან, მომხმარებლების დაგეგმვასთან დაკავშირებული სიმძლე-
 ების გარეშე.



ნახ. 4.3. MPNL-ისა და წრფივი წინასწარი კოდირების მიღწევადი სიჩქარე რვა-
 ანტიენანი საბაზო სადგურის და რვა UE-ს სცენარისთვის, მომხმარებლების და-
 გეგმვით და მის გარეშე

MPNL დამუშავება შეერთებების ექსტრემალური შესაძლებლობების გასააქტიურებლად: როგორც ადრე განვიხილეთ, 6G-ის ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი გამოწვევა არის მანქანური ტიპის ტრაფიკის მნიშვნელოვანი ზრდა. ამ კონტექსტში, ტიპური NOMA-ს მეთოდების ეფექტიანობა განისაზღვრება უნარით, სრულყოფილად მოახდინოს შესაბამისი ურთიერთინტერფერენციაში მყოფი ინფორმაციული ნაკადების დეკოდირება და მოითხოვოს სპეციფიკური, გამეჩხერებული შაბლონები, რათა ჰქონდეს წვდომა დროით-სიხშირულ რესურსებზე. ეს შეზღუდვები შეიძლება აღმოიფხვრას MPNL დამუშავების მიდგომის გამოყენებით. ნახ. 4.4 განიხილავს რამდენიმე დაბალი სიჩქარის (4-QAM-ით მოდულირებული და 1/2 სიჩქარის მქონე LDPC-ით კოდირებული) UE-ებს, რომლებიც ერთდროულად გადასცემს რვანტენიან საბაზო სადგურზე, როდესაც თითო მომხმარებლის SNR ტოლია 15 დბ-ის და ნახ. 4.2-ის მსგავსად გამოიყენება CDL-B არხი. ნაჩვენებია, რომ წრფივი მიდგომებისგან განსხვავებით, MPNL დამუშავებით, 14 UE-მდე შეიძლება იყოს ერთდროულად მხარდაჭერილი, თანაც ამ დროს იზრდება „წმინდა“ გამტარუნარიანობა იმავე დროით-სიხშირულ რესურსზე (მაგალითად, ქვეგადამტანზე), რაიმე დახვეწილი NOMA მიდგომის გამოყენების და გამეჩხერებაზე რაიმე მოთხოვნის გარეშე. ტრადიციული NOMA სქემებისგან განსხვავებით, MPNL დამუშავება არ იღებს მემკვიდრეობით NOMA-ს დეტექტირების ტრადიციული სქემების შეზღუდვებს. კერძოდ, ასეთი სქემები, როგორც წესი, იყენებს შეტყობინებების გატარებაზე ან მოლოდინის გავრცელებაზე დაფუძნებულ დეტექტირებას, რაც მოითხოვს სიხშირის დომენში გამეჩხერებას. ამ მიზეზით, დეკოდირების კარგი მახასიათებლების გონივრული სირთულით მისაღწევად, არსებული NOMA სქემები, როგორც წესი, მხარს უჭერს მომხმარებელთა საშუალო რიცხვს თითო ქვეგადამტანზე, რომელიც შემოიფარგლება 1.5-ით, საბაზო სადგურის ანტენების რაოდენობისგან დამოუკიდებლად. როგორც ნახ. 4.4-ზეა ნაჩვენები, ეს რიცხვი შეიძლება გახდეს 14, თუ გამოყენებული იქნება MPNL და-

მუშავება. გარდა ამისა, ტიპური NOMA-ს დეტექტირების მიდგომების სირთულე ექსპონენტურად იზრდება მულტიპლექსირებული მომხმარებლების რაოდენობასთან ერთად. 14 UE-ის დეკოდირების მცდელობა მოითხოვს სირთულეს, რომელიც 10^6 კომპლექსური გამრავლების რიგისა და ეს სიდიდე სამი რიგით მეტია იმასთან შედარებით, რაც საჭიროა მულტისფერო MPNL დამუშავებისას.



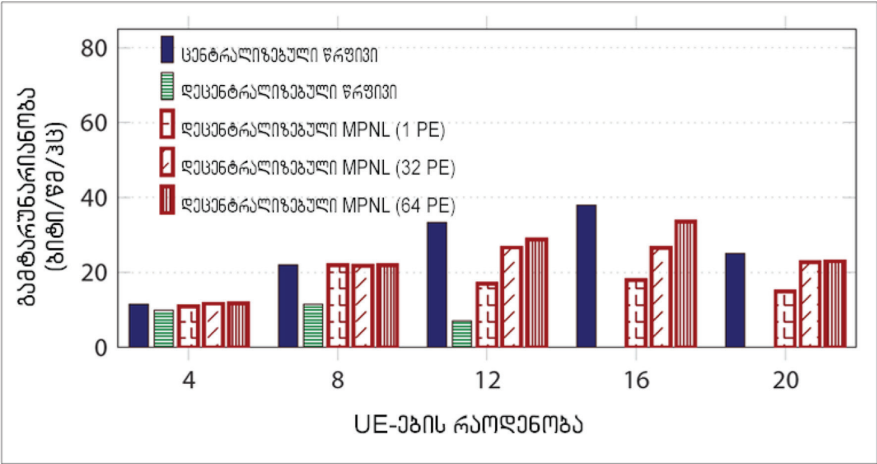
ნახ. 4.4. გამტარუნარიანობა და დაკავშირების შესაძლებლობა MPNL-სთვის და წრფივი დეტექტირებისთვის რამდენიმე დაბალსიჩქარიანი მომხმარებლების შემთხვევაში, რომლებიც გადასცემენ რვანტენიან საბაზო სადგურს SNR-ის საშუალო მნიშვნელობით 15 დბ

MPNL დამუშავება დეცენტრალიზებული MIMO-სთვის: როგორც ადრე განვიხილეთ, პარადიგმის ახალი ცვლილებები ექსტრემალური mMIMO-ს მიმართულებით მოითხოვს უკიდურესად დიდი რაოდენობის ანტენების დაკავშირებას და ერთობლივ დამუშავებას, რომლებიც შეიძლება იყოს ერთსა და იმავე საბაზო სადგურზე ან ეკუთვნოდეს რამდენიმე განაწილებულ საბაზო სადგურს. ყველა შესაბამისი ინფორმაციის ერთობლივი დამუშავება აწესებს მკაცრ მოთხოვნებს სიხშირისა და ფაზის სინქრონიზაციის კუთხით ერთობლივად დამუშავებულ ანტენებს შორის. ის ასევე მოითხოვს ინფორმაციის დიდი რაოდენობით გადაცემას

შესაბამისი ფრონტპოლის ქსელით ან ინფორმაციის ინტენსიურ გაცვლას განაწილებულ ანტენებს/საბაზო სადგურებს შორის.

თუმცა, MPNL დამუშავებას აქვს შესაძლებლობა დაუშვას დიდი რაოდენობის ანტენების (როგორც განაწილებული, ასევე კოლოკაციაში მყოფი) დაყოფა უფრო მცირე ქვეჯგუფებად, რომლებიც შეიძლება დამოუკიდებლად დამუშავდეს, რათა თავიდან აიცილოს მკაცრი მოთხოვნები ფაზურ სინქრონიზაციაზე და მოახდინოს ნებისმიერი ინფორმაციის გაცვლა ანტენების ამ ქვეჯგუფებს შორის. ნახ. 4.5 ასახავს აპლინკის გამტარუნარიანობას (ნახ. 4.2-სთვის გამოყენებული გადაცემის სიჩქარის მიხედვით) განაწილებული MIMO სისტემისთვის ცენტრალიზებული და დეცენტრალიზებული დამუშავებით. გათვალისწინებულია სამი საბაზო სადგურის ბლოკი, თითოეული რვა კოლოკაციური ანტენით. საშუალო SNR თითო მომხმარებლისთვის არის 22 დბ. კომპიუტერული სიმულაციებისას გამოყენებული იყო 5G-სთან მიახლოებული თავისუფალი სივრცის ეტალონური მანძილის მოდელი ურბანული მიკროფჭური სცენარებისთვის. ცენტრალიზებული შემთხვევა ვარაუდობს, რომ ყველა საბაზო სადგური ფაზის მიხედვით მკაცრად არის სინქრონიზებული და რომ ყველა ანტენიდან მიღებული სიგნალები ცენტრალიზებულადაა დამუშავებული. ეს მოითხოვს, რომ ყველა საბაზო სადგურმა გადასცეს ყველა ანტენიდან მიღებული სიგნალი მთავარ ბლოკში ერთობლივად დასამუშავებლად. ვვარაუდობთ, რომ I და Q სიგნალები წარმოდგენილია რვაბიტნიანი სიზუსტით და სიხშირის გატარების ზოლი ტოლია 100 მჰც-ის, ხოლო თითოეულმა საბაზო სადგურმა უნდა გადასცეს ფრონტპოლში საინფორმაციო სიჩქარით 12.8 გბიტ/წმ. ეს ჯამში მოგვცემდა სიჩქარეს 102.4 გბიტ/წმ, თუ თითოეული საბაზო სადგური აღჭურვილი იქნებოდა 64 ანტენით. ცენტრალიზებული დამუშავების სცენარისგან განსხვავებით, განაწილებულში ვვარაუდობთ, რომ „რბილი“ დეტექტირება ხდება ადგილობრივად თითოეულ საბაზო სადგურში და დამოუ-

კიდებლად სხვა საბაზო სადგურებისგან. შემდეგ, ფრონტჰოლში, მხოლოდ ეს დამოუკიდებლად გამოთვლილი „რბილი“ ინფორმაცია გადაეცემა ცენტრალურ ბლოკს, რათა გაერთიანდეს სხვა საბაზო სადგურებზე გამოთვლილი „რბილი“ ინფორმაციასთან. ცენტრალიზებული დამუშავების სცენარისგან განსხვავებით, რვაბიტანი „რბილი“ ინფორმაციის სიზუსტისთვის, ამ მიდგომას დასჭირდება ფრონტჰოლში ინფორმაციის გადაცემის სიჩქარე 800 მბიტ/წმ, საბაზო სადგურის ანტენების რაოდენობისგან დამოუკიდებლად.



ნახ. 4.5. აპლინკის გამტარუნარიანობა, განაწილებული MIMO სისტემისთვის ცენტრალიზებული და დეცენტრალიზებული დამუშავებით. ივარაუდება, რომ ფუნქციონირებს სამი საბაზო სადგური, თითოეული რვა კოლოკაციური ანტენით

ნახ. 4.5 გვიჩვენებს, რომ ტრადიციული წრფივი მიდგომებისგან განსხვავებით, MPNL დამუშავების გამოყენებამ შეიძლება ეფექტიანად უზრუნველყოს ასეთი დეცენტრალიზებული დამუშავება და მიაღწიოს წრფივი ცენტრალიზებული დამუშავების გამტარუნარიანობას, ამავდროულად, შეამსუბუქოს მოთხოვნები ბექჰოლის გამტარუნარიანობაზე

და თავიდან აიცილოს განაწილებულ საბაზო სადგურებს შორის მკაცრი მოთხოვნები ფაზურ სინქრონიზაციაზე.

4.4. მეოთხე თავის დასკვნა და შემდგომი კვლევითი გამოწვევები

მაშინ, როდესაც მიკროპროცესორების მომავალი მიმართულია მრავალბირთვიანი არქიტექტურისკენ რამდენიმე ათასი ხელმისაწვდომი ლოგიკური ბირთვით, ტრადიციული ფიზიკური ფენის ალგორითმები ან მიმდევრობითია, ან აქვს პარალელიზების შეზღუდული შესაძლებლობები. როგორც ამ თავშია ნაჩვენები, MPNL დამუშავება იძლევა ძლიერ პოტენციალს 6G სისტემების არსებითად გაუმჯობესების ან თუნდაც მათში რევოლუციური ცვლილებების შეტანის მიმართულებით. და მაინც, საჭიროა შემდგომი კვლევა, არა მხოლოდ იმიტომ, რომ ასეთი სქემები გახდეს პრაქტიკულად რეალიზებადი, არამედ იმიტომაც, რომ მოხდეს წარმოდგენილი მიდგომის სხვა ალგორითმული მოდულებისადმი განზოგადება. ასეთი ახალი კვლევითი მიმართულებებია:

MPNL ერთობლივი დეტექტირება და დეკოდირება: ლიტერატურულ წყაროებში ნაჩვენებია, რომ MPNL დამუშავება ბევრად ეფექტიანია, როგორც სირთულის, ასევე სხვა ტექნიკური მახასიათებლების თვალსაზრისით, ვიდრე ტრადიციული, „რბილი“ დეტექტირება-დეკოდირების მიდგომები. ამ მიმართულებით შეიძლება შემოთავაზებული იყოს MPNL-სთვის ერთობლივი დეტექტირება/დეკოდირების მეთოდები, რათა მინიმუმამდე იქნას დაყვანილი იტერაციების რაოდენობა აღნიშნული პროცედურის ჩატარების პროცესში.

არაორთოგონალური გადაცემების გაერთიანება: როგორც განვიხილეთ, NOMA-ს ამჟამინდელი დიზაინი შემოიფარგლება არსებული დეტექტორების შესაძლებლობებით, რომლებიც საჭიროებენ გამეჩხერებას. MPNL დეტექტირება აღმოფხვრის ამ პრობლემას და საშუალებას მოგვცემს შემუშავდეს პროექტირებისა და დამუშავების ერთიანი დიზაინი

ყველა ტიპის არაორთოგონალური გადაცემისთვის, მათ შორის ისეთი გადაცემებისთვის, რომლებიც წარმოიქმნება უფიჭო სტრუქტურებიდან.

სიგნალის დამუშავების ახალი მრავალბირთვიანი არქიტექტურები: MPNL დამუშავება იძლევა სიგნალის დამუშავებისას, გამოთვლების ძალიან დიდი რაოდენობისგან შექმნილი დატვირთვის მოქნილ პარალელიზებას. თუმცა, ვინაიდან ყველა ალგორითმული ამოცანა არ არის პარალელიზებადი, საჭიროა ახალი, შესაძლოა ჰეტეროგენული არქიტექტურების შექმნა, რომლებსაც შეუძლია გამოიყენოს ასეთი მიდგომების შესაძლებლობები.

თავი 5. ხელოვნურ ინტელექტზე დაფუძნებული ახალი 6G რადიოინტერფეისი

5.1. შესავალი

მიუხედავად იმისა, რომ 5G ვრცელდება გლობალურად და მიმდინარეობს სტანდარტიზაციასთან დაკავშირებული დისკუსიები მისი სამომავლო ევოლუციის შესახებ, მკვლევრები აკადემიურ წრეებში და მრეწველობაში იწყებენ ფიქრს ხედვებზე, გამოყენების შემთხვევებსა და „გამრღვევ“ საკვანძო ტექნოლოგიებზე შესაძლო 6G სისტემისთვის. სახელმწიფოების მიერ დაფინანსებული 6G კვლევითი პროექტები ამჟამად მიმდინარეობს ევროპაში, ამერიკის შეერთებულ შტატებსა და ჩინეთის სახალხო რესპუბლიკაში. ტელეკომუნიკაციის საერთაშორისო კავშირმა ასევე დაიწყო მუშაობა უსადენო საკომუნიკაციო ქსელებისა და სისტემების მოთხოვნებზე 2030-იანი წლებისთვის. 6G ხედვასთან დაკავშირებულ ბევრ ნაშრომში საერთო თემაა ციფრული „ტყუპი“ სამყაროს შექმნა ფიზიკური და ბიოლოგიური ერთეულების შეუფერხებლად დასაკავშირებლად და მართვისთვის, რათა მოხდეს ახალი, შერეული რეალობის სუპერფიზიკური გამოცდილების უზრუნველყოფა.

თანამედროვე სპექტრული ტექნოლოგიებისა და ერთდროული კომუნიკაციისა და ზონდირების მხარდაჭერის, ასევე დაკავშირებაზე უკიდურესად გაზრდილი მოთხოვნების დაკმაყოფილების პროცესში, მოსალოდნელია, რომ მანქანური სწავლება და ხელოვნური ინტელექტი ითამაშებენ განმსაზღვრელ როლს 6G ქსელების განვითარებაში, გამჭოლი (ერთი ბოლოდან მეორე ბოლომდე) პროექტირების, განთავსების და ფუნქციონირების ყველა ეტაპის განმავლობაში. როდესაც ქსელი ვითარდება პროგრამირებადი და მოქნილი ღრუბლოვანი დანერგვის მიმართულებით, ML/AI-ზე დაფუძნებული ქსელის ავტომატიზაცია გადაწყვეტი იქნება ქსელის მართვისა და ოპტიმიზაციის გასამარტივებლად. ქსელები გახდება „შემეცნებითი“ იმ გაგებით, რომ სხვადასხვა ასპექტები,

როგორცაა ვირტუალიზებული ქსელის ფუნქციების განლაგება, ფენე-ბად დაყოფა, მომსახურების ხარისხი, მობილურობის მენეჯმენტი, რადიორესურსების მართვა და სპექტრის გაზიარება, ყველა დამოკიდებული იქნება ML/AI-ზე სხვადასხვა ხარისხით. ჩვენ ველით, რომ ML/AI უპირველეს ყოვლისა მნიშვნელოვნად იმოქმედებს 6G რადიონტერფეისზე, რასაც მიეძღვნა ეს თავი.

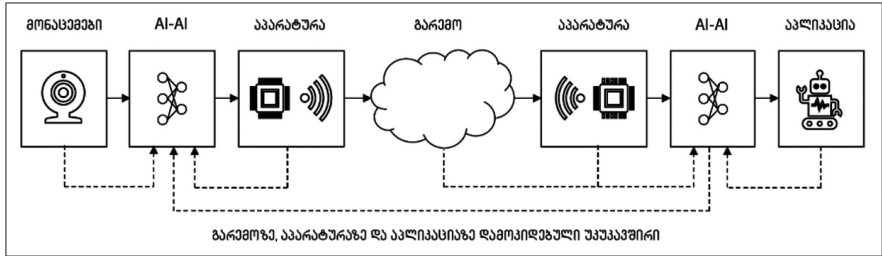
მიუხედავად იმისა, რომ ML იწყებს ფართო გამოყენებას მრეწველობაში, რათა გააძლიეროს ბევრი სხვადასხვა კომპონენტის დანერგვა 5G რადიოწვდომის ქსელში (RAN) და ძირითად ქსელში, სამართლიანად შეიძლება ითქვას, რომ არ არსებობს 5G-ის არც ერთი კომპონენტი, რომელიც შექმნილია ML-ის მიერ. ამრიგად, ამ თავის მიზანია დასვას და განიხილოს კითხვა: რა მოხდება, თუ 6G შეიქმნება ისე, რომ ML/AI-ის შექმნა ფიზიკური (PHY) და გარემოსთან წვდომის მართვის (MAC) ფენების შემადგენელი ნაწილების შეცვლა?

5.2. AI-ზე დაფუძნებული რადიონტერფეისი

დავიწყოთ საუბარი ტექნიკურ ლიტერატურაში მოცემული ხედვისა და მოტივაციის წარმოდგენით AI-ზე დაფუძნებული რადიონტერფეისის (air interface) შესახებ, რომელსაც აღვნიშნავთ, როგორც AI-AI-ის და რომელიც აღწერს „გამრღვევ“ ცვლილებებს ტრადიციული საკომუნიკაციო სისტემების დიზაინის, სტანდარტიზაციის და წარმოების შესახებ. ჩვენ ჯერ წარმოვადგენთ ამგვარი მიდგომის შესაძლო უპირატესობების შეჯამებას, შემდეგ დეტალურად განვიხილავთ სამ მნიშვნელოვან, მაგრამ ასევე აუცილებელ განვითარების ნაბიჯს აღნიშნული ხედვის რეალიზაციისკენ; დაბოლოს, წარმოვადგენთ კონკრეტულ თემატურ კვლევას, რომელიც ასახავს შესაბამის პოტენციურ წარმატებებსა და უპირატესობებს.

როგორც ილუსტრირებულია ნახ. 5.1-ზე, AI-AI-ის მიზანია აპლიკაციისთვის საჭირო მონაცემების მიწოდება ყველაზე ეფექტიანი გზით, ხელმისაწვდომი აპარატურისა და რადიოგარემოს შეზღუდვების გათვა-

ლისწინებით. წინა რადიოინტერფეისებთან შედარებით, ის შექმნილია არა მხოლოდ ბიტების საიმედოდ გადასაცემად, არამედ იმ მიზნითაც, რომ ოპტიმალურად მოემსახუროს აპლიკაციას მისთვის საჭირო მონაცემებით. AI-AI აღარ ჰყოფს ერთმანეთისაგან წყაროსა და არხის კოდირებას, ისევე როგორც მონაცემების გადაცემას და აპლიკაციის მიერ მათ დანიშნულებისამებრ გამოყენებას. შესაბამისად, AI-AI მოიცავს აპარატურულ შეზღუდვებს, საკომუნიკაციო არხის არასასურველ ეფექტებს და არა მათთან ბრძოლის ტექნიკას. მიუხედავად იმისა, რომ ბოლო ათწლეულები გამოიყენებოდა კლოდ შენონისა და ნორბერტ ვინერის (ისევე, როგორც სხვა მრავალის) სამეცნიერო შედეგების დასასაბუთებლად და განსახორციელებლად, ჩვენ ახლა შევდივართ კომუნიკაციების ახალ ეპოქაში, სადაც აუცილებელია კლასიკური მიდგომების გადახედვა და ახალი თეორიების შემუშავება, რათა მივაღწიოთ საჭირო ტექნოლოგიურ მიღწევებს 6G სისტემისთვის. ჩვენ ვფიქრობთ, რომ წარმოდგენილი ხედვა AI-AI-ზე შეიძლება რეალობად იქცეს მიმდინარე ათწლეულის განმავლობაში, რადიოინტერფეისის გამჭოლად ოპტიმიზაციის გზით და კომუნიკაციებისთვის AI სფეროში მიღწევების წყალობით.



ნახ 5.1. AI-ზე დაფუძნებული რადიოინტერფეისი (AI-AI), რომელიც ადაპტირდება სხვადასხვა რადიოგარემოსთან, აპარატურასთან, მონაცემებთან და აპლიკაციებთან

ახლა განვიხილოთ AI-ის გამოყენებით მიღებული პოტენციური სარგებლიანობა:

1. ერთი კლასიკური ტალღის ფორმის არჩევანისგან განსხვავებით, როგორცაა OFDM 5G-ში, AI-AI-ის შეუძლია სხვადასხვა სიხშირისთვის

ინდივიდუალურად ფორმირებული ტალღის ფორმების შესწავლა, რომელიც არა მხოლოდ უფრო ეფექტიანად იყენებს სიხშირულ სპექტრს, არამედ ოპტიმალურადაც ადაპტირებულია ტრანსივერის აპარატურულ და არხის პრაქტიკულ შეზღუდვებზე, როგორცაა სიმულაციის არაწრფივი გამამლიერებლები, ჰიბრიდული ანალოგურ-ციფრული დამუშავება, დაქვანტვის დაბალი გარჩევადობა, არხის კოჰერენტულობის ძალიან მოკლე დრო და ვიწრო სიხშირის გამტარების ზოლი, ფაზური და იმპულსური ხმაური. ასევე, ახალი მოდულაციის სქემების, პილოტ-სიგნალების მიმდევრობებისა და ხელშეშლამდგრადი კოდების შესწავლა ან ოპტიმიზაცია შესაძლებელია ML-ით, რათა კიდევ უფრო უკეთესი ტექნიკური მახასიათებლები იქნას სპექტრიდან მიღებული. რამდენიმე კვლევითმა ჯგუფმა ბოლო პერიოდში აჩვენა ასეთი მიდგომების პრაქტიკული უპირატესობები. ძალიან საინტერესო აპლიკაცია წარმოიქმნება მოკლე შეტყობინებების გადასაცემად, სადაც პრემიუმის კლასიკური ფრეიმის სტრუქტურა, პილოტ-სიგნალები, კოდირებული ბიტები და ციკლურობის შემოწმება ხელშეშლამდგრადი კოდით შეიძლება შეიცვალოს სრულად ნასწავლი რადიოპაკეტით, რომელიც გადასცემს ინფორმაციის რამდენიმე ბიტს. გარდა ამისა, მაღალი პოტენციალი აქვს ახალი ტალღების შესწავლას ერთდროული კომუნიკაციისთვის, მაგალითად, ზონდირებისა და ენერჯის გადაცემისთვის;

2. სრულად შესწავლილ ტრანსივერებს აქვთ ის უპირატესობა, რომ მათ აღარ სჭირდებათ ალგორითმის დიზაინისა და აპარატურული რეალიზაციის ძალიან ძვირი და შრომატევადი ტრადიციული პროცესის გავლა. მათი მომზადება შესაძლებელია უშუალოდ მიზნობრივი აპარატურული პლატფორმისთვის (ან თუნდაც მასზე, შესაძლებლობებიდან გამომდინარე). 6G-ის გამოყენების მოსალოდნელი შემთხვევების მზარდი მრავალფეროვნებითა და მცირე მასშტაბის ქვეყნელების გაჩენით, ეს მრავალფეროვნება არსებითი ხდება იმის უზრუნველსაყოფად, რომ 6G-ის შექმნის საუკეთესოდ მიესადაგოს თითოეული ინდივიდუალური გა-

მოყენების შემთხვევას და განთავსების სცენარს. უფრო მეტიც, თუ გავითვალისწინებთ ML ტექნიკის ამაჩქარებლების სწრაფ განვითარებას, სავარაუდოა, რომ პრაქტიკაში დანერგილი ტრანსივერები ძალიან მალე აჯობებს მათ ტრადიციულ ანალოგებს ენერგეტიკული ეფექტიანობის, შეყოვნებისა და ღირებულების კუთხით. ნეირომორფულ გამოთვლებში ბოლოდროინდელმა მიღწევებმა შეიძლება კიდევ უფრო გააძლიეროს ეს ტენდენცია;

3. რაც უფრო მეტად მივყვებით სწავლებაზე დაფუძნებული დიზაინისა და სპეციფიკაციის AI-AI პრინციპს, მით ნაკლებად საჭირო ხდება სტანდარტიზაცია. ამჟამინდელი 5G სპეციფიკაცია განიხილავს ოპციებისა და პარამეტრების ძალიან მდიდარ ნაკრებს სხვადასხვა სიხშირული დიაპაზონისა და სცენარისთვის, რაც წარმოადგენს რთულ გამოწვევას განხორციელების თვალსაზრისით. არასასურველია ამ მიდგომის მასშტაბირება კიდევ უფრო რთულ და დივერსიფიცირებულ პარამეტრებზე 6G-ში. თუ, მეორე მხრივ, მხოლოდ საკმარისად მოქნილი სტრუქტურა იქნებოდა საკაბელო რადიონტერფეისის სწავლებისთვის სტანდარტიზებული, სისტემას ექნებოდა შესაძლებლობა, ავტომატურად მორგებოდა ნებისმიერ სცენარს. გარკვეულწილად შეიძლება იმედიც ვიქონიოთ, რომ 6G იქნება ბოლო საკომუნიკაციო სისტემა, რომელიც სტანდარტიზებულია;

4. AI-AI იძლევა მონაცემთა და აპლიკაციების ინტეგრაციის საშუალებას და მოიხმარს მათ ერთიან გამჭოლ სწავლების პროცესში. თუ ინფორმაციის თეორიის ფუძემდებელს, კლოდ შენონს დავესესხებით და მის ტერმინოლოგიას გამოვიყენებთ, AI-AI აღარ წყვეტს მხოლოდ ბიტების საიმედო გადაცემის პრობლემას (A დონე), არამედ ერთდროულად აგვარებს კომუნიკაციის სემანტიკის (დონე B) და ეფექტიანობის (დონე C) პრობლემებს. მიუხედავად იმისა, რომ ეს უკანასკნელი ასპექტები შეიძლება არ იყოს გამოყენებული ზოგადი ინტერნეტკომუნიკაციის სცენარში, ისინი რელევანტური ხდება საკომუნიკაციო სისტემებისთვის, რომლებიც მორგებულია კონკრეტულ მიზნებზე და ექვემდებარება ერთი

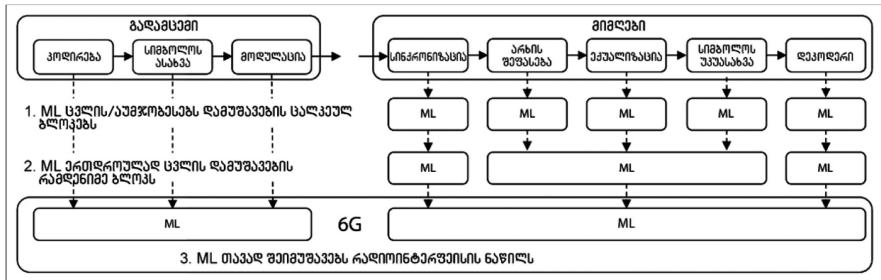
ობიექტის მართვას, როგორცაა სამრეწველო საკომუნიკაციო სისტემები განკუთვნილი ზონდირებისთვის, თვალყურის დევნებისა და რობოტების მართვისთვის;

5. გამჭოლი სწავლების იდეა ბუნებრივად ვრცელდება MAC ფენაზე, სადაც სასურველია შეიქმნას ოპტიმიზებული სასიგნალო სქემები და არხზე წვდომის პოლიტიკა, რომელიც თავისუფლად გადადის კონკურენტულიდან დაგეგმვაზე დაფუძნებულზე, გამოყენების შემთხვევებიდან და არსებული გარემოდან გამომდინარე. პროტოკოლის სწავლებას ასევე შეუძლია გადაჭრას კომუნიკაციისა და ზონდირების რესურსების ოპტიმალურად მულტიპლექსირების პრობლემა (ან სხვა აპლიკაციების პრობლემები, რომლებისთვისაც შესაძლებელია რადიოტალღების გამოყენება). საბოლოო ჯამში, შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ PHY და MAC ფენების ერთობლივად შესწავლა შესაძლებელია.

ამჟამად, განვითარებისა და AI-AI-ზე გადასვლის პროცესში, ჩვენ ვხედავთ სამ მნიშვნელოვან ეტაპს, რომელთაგან თითოეული მოითხოვს მდგრად მრავალდისციპლინურ კვლევას. ეს სქემატურად ნაჩვენებია ნახ. 5.2-ზე. პირველი ორი ეტაპი არ საჭიროებს რაიმე ახალ სიგნალებს ან პროცედურებს, რადგან ისინი გავლენას ახდენენ მხოლოდ ტრანსივერის ალგორითმების რეალიზებაზე. შესაბამისად, პრაქტიკული გამოცდილების შესაგროვებლად, ისინი დღესაც კი შეიძლება დანერგილ იქნას არსებულ 5G სისტემებში, სანამ 6G-ის მიმართულებით კვლევები ჯერ კიდევ საწყის ეტაპზეა.

ML ცვლის დამუშავების ცალკეულ ბლოკებს: პირველ ეტაპზე, რასაც დღეს უკვე ადგილი აქვს მრეწველობაში, ML გამოყენებული იქნება დამუშავების ზოგიერთი ბლოკის გასაუმჯობესებლად ან ჩანაცვლებისთვის, ძირითადად მიმდებში. ამის მაგალითებია შემთხვევითი წვდომის ფიზიკური არხის დეტექტირება, არხის შეფასება ან სიმბოლოების უკუასახვა. ერთი შეხედვით სიმარტივის მიუხედავად, ეს ნაბიჯი წარმოადგენს პარადიგმის ცვლილებას სამრეწველო დიზაინისა და ტრანსივერების გა-

ნთავსების გზაზე. მაშინაც კი, თუ ML მოდელები, სავარაუდოდ, იქნება საკმაოდ მცირე, უნდა გადაიჭრას რამდენიმე მნიშვნელოვანი პრობლემა, როგორცაა მონაცემთა მოპოვება, მოდელების განახლება, ონლაინტრენინგი და ტექნიკის ამაჩქარებლები უნდა იყოს ინტეგრირებული PHY დამუშავების ნაკადში. მიმდების დამუშავება შეიცავს ML-ისა და ტრადიციული ბლოკების ნაზავს.



ნახ. 5.2. სამი ფაზა AI-AI-ზე გადასვლის პროცესში. დამუშავების ბლოკების უმეტესობის თანდათანობით შეცვლის შემდეგ, ML შეიმუშავებს PHY ფენის ნაწილებს

ML ერთდროულად ცვლის დამუშავების რამდენიმე ბლოკს: მეორე ეტაპზე ML მოდელებს ენიჭება მეტი ფუნქციონალური შესაძლებლობები, რომლებიც ასრულებენ რამდენიმე დამუშავების ბლოკის ერთობლივ როლს. ეს შეიძლება იყოს, მაგალითად, არხის ერთობლივი შეფასება, ექვალიზაცია (კორექცია) და უკუასახვა, სადაც ექვალიზაცია წარმოადგენს დამახინჯებული სიგნალის აღდგენის ეფექტიან მეთოდს და შესაბამისად, გამოიყენება ბიტზე შეცდომის ალბათობის შესამცირებლად. გადასვლის ამ ეტაპზე ML მოდელები ზომებში მოიმატებს, აპარატურული წარმოების აჩქარება სულ უფრო მნიშვნელოვანი ხდება და აპარატურის მომწოდებლებმა უნდა დაიცვან „მხოლოდ ML/თავდაპირველად ML“ მიდგომა, ვინაიდან არ არის მიზანშეწონილი ML და სარეზერვო არა-ML გადაწყვეტილებების პარალელურად დანერგვა ერთსა და იმავე დამუშავების პლატფორმაში ენერჯის მოხმარებისა და ღირებულების გაზრდის გამო. ეს ნიშნავს, რომ ML-ს ასევე უფრო მეტად ენდობიან და

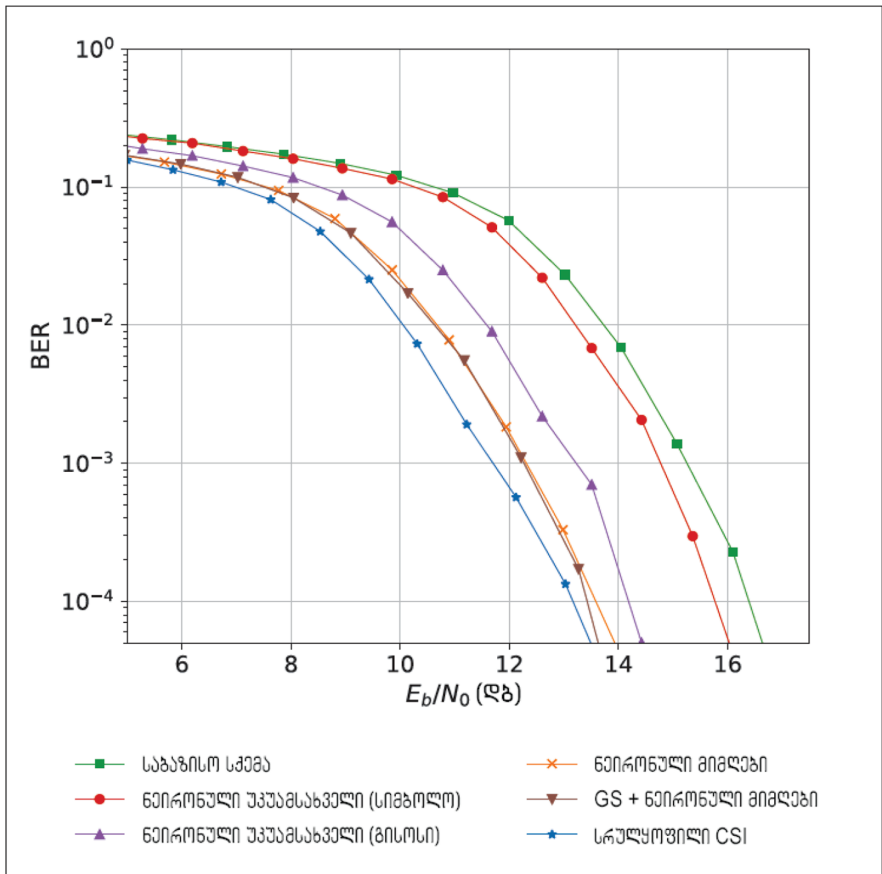
თუმცა დიდი მოდელების შიდა სამუშაოები ნაკლებად ექვემდებარება ინტერპრეტაციას, პოტენციური მოგება მაინც უფრო მაღალია. მაგალითი მოყვანილი იქნება ქვემოთ. ამ ეტაპზე, ჩვენ ასევე ვაცნობიერებთ, თუ რა შესაძლებლობებს ხსნის ასეთი ნასწავლი ტრანსივერის კომპონენტები; მაგალითად, მათ სჭირდებათ ნაკლები პილოტ-სიგნალები, ციკლური პრეფიქსი და ნაკლებად მკაცრი სინქრონიზაცია. სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ, ჩვენ ვსწავლობთ იმას, რისი გაკეთების საშუალებასაც გვაძლევს ML, რასაც აქამდე ვერ ვაკეთებდით (გონივრული ძალისხმევით).

ML აპროექტებს რადიონტერფეისის ნაწილებს: მესამე ეტაპზე ჩვენ კიდევ უფრო მეტ თავისუფლებას ვანიჭებთ ML/AI-ის და ნებას ვაძლევთ თავად შეიმუშაოს ფიზიკური და MAC ფენების ნაწილები. ეს წარმოადგენს პარადიგმის კიდევ ერთ ცვლილებას საკომუნიკაციო სისტემების შემუშავებაში, რადგან PHY და MAC ფენების ყველა ასპექტი შეიძლება წინასწარ არ იყოს დაფიქსირებული. ეს მიდგომა მოითხოვს სიგნალთა ახალ ფორმებს და პროცედურებს, რათა შესაძლებელი გახდეს განაწილებული გამჭოლი ტრენინგი. მაგალითად, მოდულაციის სქემებისა და ტალღების ფორმების დაზუსტების ნაცვლად, საჭიროა დაზუსტდეს პროცედურები, რომლებიც შეიძლება გამოყენებულ იქნას განთავსების პროცესში რადიონტერფეისის ამ ასპექტების ოპტიმიზაციისთვის. ეს აქამდე არავის გაუკეთებია და ის მოითხოვს მასშტაბურ ცვლილებებს საკომუნიკაციო სისტემების სტანდარტიზებაში. რა თქმა უნდა, ასევე შესაძლებელია, რომ დაზუსტდეს ML-ის დიზაინის გადაწყვეტილებები კონკრეტული პრობლემებისთვის, რაც მაგალითად, უკვე განხორციელდა 5G-ში, ხელშემლამდგრადი კოდირების შემუშავების პროცესში.

5.3. AI-AI-ზე გადასვლის ეტაპებთან დაკავშირებული თემატური კვლევა

ქვემოთ, ჩვენ წარმოვადგენთ თემატურ კვლევას, რომელიც ასახავს პროგრესს AI-AI-სკენ განხილული სამი ეტაპის განმავლობაში და აჩვენებს

ნებს მოგებას შესაბამისი მახასიათებლების კუთხით. ჩვენ შევისწავლით ორმაგად სელექციურ ერთშესასვლელიანი და ერთგამოსასვლელიანი (SISO) სისტემის არხს 3.5 გჰც-ის გადამტან სიხშირეზე, „შეყოვნების ხაზი განშტოებით“ (TDL) მოდელით, კერძოდ TDL-A სიმძლავრის შეყოვნების პროფილით და შეყოვნების გავრცელებით, რომელიც ტოლია 100 ნწმ-ის. ივარაუდება, რომ მიმღები მოძრაობს 50 კმ/სთ სიჩქარით და არხი დროში ვითარდება რელეის მიყუჩებასთან დაკავშირებული ჯეიკის მოდელის მიხედვით. ჩვენ განვიხილავთ ციკლურ პრეფიქსზე დაფუძნებულ OFDM-ს 72 ქვეგადამტანით, რომლებიც ერთმანეთისგან დაცილებუ-



ნახ. 5.3. თემატურ კვლევაში განხილული ყველა სქემის BER მახასიათებელი

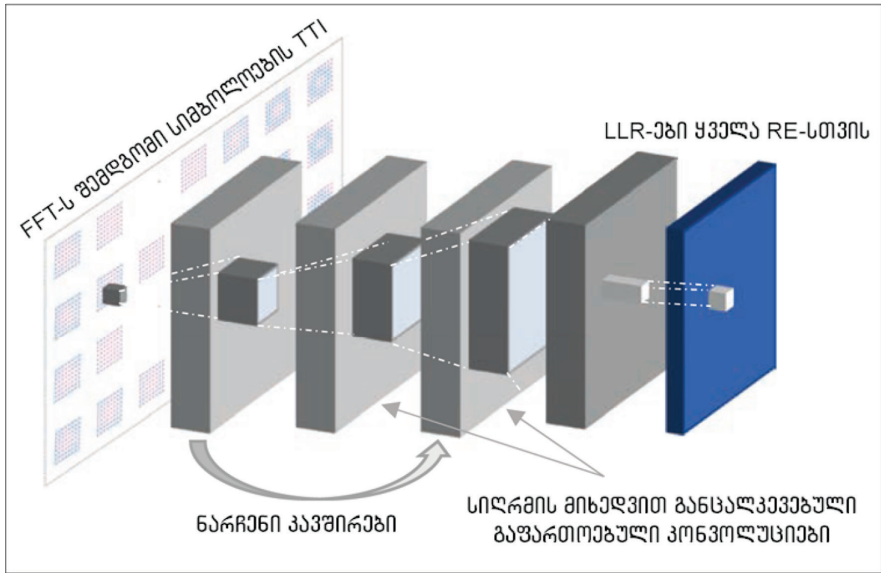
ლია 30 კპც-ით და განვიხილავთ გადაცემის დროის ინტერვალებს (TTI), რომლებიც შედგება 14 მიმდევრობითი OFDM სიმბოლოსგან, სადაც თითოეული მათგანი შეიცავს 1024 ბიტის სიგრძის მქონე კოდურ სიტყვებს 2/3-სიჩქარიანი ხელშეშლამდგრადი კოდირებით, რაც შესაბამისობაშია 5G-ში გამოყენებულ კოდთან.

ჩვენი არა-ML საბაზისო სქემა იყენებს 64-QAM მოდულაციას, პილოტ-სიგნალების გადაცემას ყოველ მეორე ქვეგადამტანზე მე-3 და მე-12 OFDM სიმბოლოში, უმცირესი კვადრატების მეთოდის მიხედვით არხის შეფასებას, უახლოეს პილოტ-სიგნალზე დაფუძნებულ ექვალიზაციას, ზუსტ უკუსასახვას ლოგ-დამაჯერებლობის ფარდობის (LLR) კოეფიციენტებთან, რაც ვარაუდობს გაუსის არხს შემდგომი ექვალიზაციით, ისევე როგორც სტანდარტულ დაჯერებულობის გავრცელების (BP) დეკოდერს.

საბაზისო სქემის და შემდგომში შემოტანილი ყველა სხვა სქემის ბიტზე შეცდომის ალბათობა (BER) ნაჩვენებია ნახ. 5.3-ზე. შეიძლება დავინახოთ, რომ არის დაახლოებით 3 დბ-ის ტოლი სხვაობა საბაზისო სქემასა და მიმღებს შორის, რომელიც ვარაუდობს სრულყოფილ CSI-ის. ჩვენ ახლა აღვწერთ ამ სხვაობის განულების რამდენიმე საშუალებას ML-ით მხარდაჭერილი მიმღების გამოყენებით.

არხის „დაბერების“ და მისი არასრულყოფილი შეფასების გამო, ექვალიზაციის შემდეგ კორექტირებული სიმბოლოების ხარისხი (რომლებიც მიეწოდება უკუამსახველ ბლოკს), იცვლება არსებული რესურს-ელემენტების (RE) გისოსზე TTI-ის ფარგლებში. ამ პრობლემის გადასაჭრელად პირველი შესაძლებლობა არის თითოეული RE-სთვის ინდივიდუალური ნეირონული უკუამსახველის შესწავლა (ეტაპი 1). ასეთი სქემის BER მახასიათებელი ნაჩვენებია წითელი ფერის მრუდით წერტილოვანი მარკერებით ნახ. 5.3-ზე. როგორც მოსალოდნელი იყო, ის უზრუნველყოფს 0.5 დბ მოგებას საბაზისო სქემასთან შედარებით LLR-ების უკეთესი გამოთვლის გამო, მაგრამ ვერ ანაზღაურებს არხის დაბერებას, რაც იწვევს კორექტირებული კონსტელაციის ბრუნვას და მასშტაბირებას.

ამ ხარვეზების აღმოსაფხვრელად, შეიძლება გამოვიყენოთ უფრო დიდი ნეირონული უკუამსახველი, რომელიც მუშაობს არა „სიმბოლო სიმბოლოს შემდეგ“ პრინციპით, არამედ აგენერირებს LLR-ებს სრული TTI-სთვის. ნაჩვენებია, რომ სრულად კონვოლუციური „ნარჩენი ნეირონული ქსელის“ არქიტექტურა განცალკევებული გაფართოებული კონვოლუციებით აღწევს ამ ამოცანისთვის შესანიშნავ მახასიათებელს (ნახ. 5.4). ექვალისაგან შემდგომ სიმბოლოების სრულ TTI-ზე წვდომით, ნასწავლ უკუამსახველს შეუძლია არხის შემფასებლისა და ექვალისაგან მიერ დაშვებული ზოგიერთი შეცდომისთვის კომპენსირება მოახდინოს, რათა უზრუნველყოს 2 დბ გაუმჯობესება საბაზისო სქემასთან შედარებით (იხ. მეწამული ფერის მრუდი, სამკუთხა მარკერებით ნახ. 5.3-ზე). იგივე არქიტექტურა ასევე შეიძლება გამოყენებულ იქნას როგორც ნეირონული



სურათი 5.4. ნეირონული მიმღები აგენერირებს LLR-ებს FFT-ს შემდგომი სიმბოლოების სრული TTI-სთვის. ძირითადი არქიტექტურული კომპონენტებია სიღრმის მიხედვით განცალკევებული გაფართოებული კონვოლუციები და ნარჩენი კავშირები. იგივე არქიტექტურა შეიძლება ასევე გამოყენებულ იქნას, როგორც ნეირონული უკუამსახველი, რომელიც ოპერირებს კორექტირებული სიმბოლოების TTI-ზე

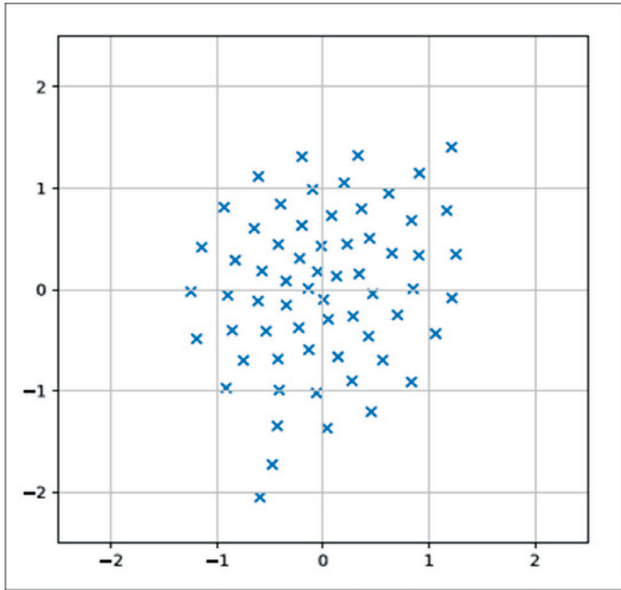
უკუამსახველი, რომელიც მუშაობს ექვალიზაციის შემდეგ მიღებული სიმბოლოების TTI-ზე.

უნდა აღინიშნოს, რომ არხის შეფასების, ექვალიზაციის და უკუამსახვის ერთობლივი დავალება შეიძლება მივცეთ მსგავსი არქიტექტურის მქონე ნეირონულ ქსელს (ეტაპი 2). მას TTI-ის პერიოდში მიეწოდება ფურიეს სწრაფი გარდაქმნის (FFT) შემდეგ მიღებული სიგნალები, საიდანაც იგი პირდაპირ ითვლის LLR-ებს ყველა ბიტისთვის. გარდა ნასწავლი უკუამსახველის ენერგეტიკული მოგებისა, ამ ნეირონულ მიმღებს მონაცემთა დახმარებით შეუძლია განახორციელოს არხის შეფასება და დეტექტირება, რაც გამოიწვევს დამატებით 0.5 დბ მოგებას. მოდელის სირთულის და შემავალ მონაცემთა რაოდენობის გაზრდით (მეტი ქვე-გადამტანები და OFDM სიმბოლოები), მახასიათებელი შეიძლება გახდეს სრულყოფილ CSI-ზე დაფუძნებული სისტემის მახასიათებელთან ძალიან მიახლოებული.

დაბოლოს, ჩვენ გვსურს გამოვიკვლიოთ ნასწავლი კონსტელაციის (ანუ გეომეტრიული ფორმირების (GS)) უპირატესობები გადამცემის მხარეს (ეტაპი 3), რომელიც ერთობლივად ოპტიმიზებულია ნეირონულ მიმღებთან ერთად. ნახ. 5.5 გვიჩვენებს ამ კონსტელაციას, რომელიც გამოიყენება ყველა RE-ზე პილოტ-სიგნალების და 64-QAM სიმბოლოების ნაზავის ნაცვლად, რომელიც გაგზავნილია საბაზისო სქემით. როგორც ნახ. 5.3-დან ჩანს, ეს სისტემა აღწევს იმავე BER-ს, როგორც ნეირონული მიმღები 64-QAM-ით, მაგრამ აქვს ის დამატებითი უპირატესობა, რომ პილოტ-სიგნალები არ გადაიცემა. ამგვარად, გამჭოლ (ბოლოების დამაკავშირებელ) სწავლებას შეუძლია მოხსნას ოვერჰედის საჭიროება და მართვა დემოდულაციის საყრდენი სიგნალებისთვის.

ეს თემატური კვლევა მხოლოდ ოდნავ შეეხო იმას, რაც მომავალში იქნება შესაძლებელი. მომავალი კვლევისთვის საინტერესო მიმართულებები მოიცავს ახალი ტალღების ფორმების გამჭოლ შესწავლას, შეზღუდულ აპარატურას, ძალიან მოკლე შეტყობინებებს, ასევე კონკრე-

ტული აპლიკაციისთვის ერთობლივ წყაროსა და არხის კოდირებას (რომელიც ასევე სწავლებას დაქვემდებარებულია). მეტა, ტრანსფერული და ფედერაციული სწავლება არის ის ძირითადი ფაქტორები, რაც უზრუნველყოფს ასეთი სქემების პრაქტიკულობას.



ნახ. 5.5. ნასწავლი კონსტელაცია, რომელიც უზრუნველყოფს უპილოტო გადაცემას ნეირონულ მიმღების გამოყენებასთან ერთად. მას აქვს ნულოვანი საშუალო მნიშვნელობა, ერთეულოვანი სიმძლავრე და სიმეტრიის ერთი ღერძი. ბიტების ოპტიმალური მარკირება ასევე შესწავლილია, მაგრამ არ არის ნაჩვენები მოუხერხებელი კითხვადობის გამო

5.4. პროტოკოლის სწავლება MAC-სთვის

PHY ფენის ზემოთ არსებული პროტოკოლები განიხილავს სიმბოლო სიმბოლოს შემდეგ გადაცემას, რათა შეიმუშავოს რთული სასიგნალო სქემები და მოახდინოს დახვეწილი პროცედურების ორგანიზება ქსელის კვანძებში. შედეგად, რადიოები ჰარმონიულად უწევს კოორდინაციას თავის ქმედებებს და უფრო მძლავრ სერვისებს გვთავაზობს, ვიდრე „წერტილი-წერტილი“ არქიტექტურის საკომუნიკაციო ლინკები.

სატელეკომუნიკაციო მრეწველობა ამ პროცედურებს განსაზღვრავს მნიშვნელოვან საერთაშორისო შეხვედრებზე შეთანხმებული პროტოკოლის სტანდარტების მეშვეობით, სადაც ყოველწლიურად განიხილება კონკურენტი ტექნიკური და ეკონომიკური ინტერესები. ამ ძალისხმევას აქვს მაღალი ღირებულება და ზოგჯერ იწვევს არაცალსახად განსაზღვრულ ტექნიკურ სპეციფიკაციებს (TS). TS-ის გამოქვეყნების შემდეგ იწყება იმპლემენტაციისა და ტესტირების ეტაპი, რაც კიდევ უფრო ძვირია. ამ მიზეზის გამო, იბადება კითხვა: შეიძლება თუ არა, რომ ეს გართულებული პროექტები როგორმე ავტომატიზებული იყოს და ასეთ შემთხვევაში, იქნება კი მიღებული შედეგი უკეთესი, ვიდრე ადამიანის მიერ შემუშავებული პროტოკოლებისთვის?

უსადენო პროტოკოლები არის შეტყობინებების მიმდევრობები, რომელთა გაცვლაც ხორციელდება რადიოკვანძებს შორის მონაცემთა მომსახურების ერთეულების (SDU) გადასაცემად. ამგვარად, პროტოკოლები ასევე შეიძლება განვიხილოთ, როგორც ენა კოლაბორაციულ მანქანებს შორის. ენის სწავლა არის ის, რისი გაკეთებაც არა მხოლოდ ადამიანებს, არამედ მანქანებსაც შეუძლიათ. ფაქტობრივად, კომუნიკაციის სწავლების (L2C) სფერო სწრაფად იზრდება ღრმა მულტიაგენტური განმტკიცებული სწავლების (MARL) მიმართულებით ბოლო დროს მიღებული შედეგების წყალობით. მიუხედავად იმისა, რომ ამ სფეროში კვლევების უმეტესობა მიმართულია ბუნებრივ ენებზე, ჩვენ გვჯერა, რომ ეს ტექნიკა ასევე შეიძლება გამოვიყენოთ უსადენო მოწყობილობების ტრენინგისთვის საკომუნიკაციო პროტოკოლების შესასწავლად. AI-AI-ის 6G პროტოკოლები შეიძლება შეიქმნას ამ გზით, რის მისაღწევადაც ორი მეთოდი არსებობს:

მეთოდი 1. არსებული პროტოკოლის შესწავლა

ინტელექტუალური პროგრამული უზრუნველყოფის აგენტები შეიძლება ისე დატრენინგდეს, რომ წინასწარ ცნობილი პროტოკოლის შესაბამისად მოიქცეს. სტანდარტის კოდირების ნაცვლად, აგენტები

შეიძლება იყოს დატრენინგებული ML-ის საშუალებით. საუკეთესო შემთხვევაში, ასეთი ტრენინგი შეიძლება ჩატარდეს მხოლოდ ერთხელ, ქარხნული წარმოების დროს. აღნიშნულს მივყავართ პროტოკოლის იმპლემენტაციამდე და მიუხედავად იმისა, რომ ის არ ცვლის პროტოკოლის სტანდარტიზაციას, მან შეიძლება შეცვალოს პროტოკოლის ინტერპრეტაცია, რეალიზაცია და ტესტირების ძალისხმევა. ამ გზით შემუშავებული 6G კვანძებისთვის ხარჯების დაზოგვა და მათი ბაზარზე განთავსების დროის შემცირების პოტენციური შესაძლოა მნიშვნელოვანი იყოს.

უკვე დღეს, მომხმარებლის მოწყობილობებმა შეიძლება გაიაროს ტრენინგი 5G ახალი რადიოს (5G NR) MAC პროტოკოლის შესასწავლად. ეს მოიცავს BS-დან მიღებული სხვადასხვა საკონტროლო შეტყობინების ინტერპრეტაციის სწავლებას (წყვეტილი მიღება, დროითი წინსწრება და ა.შ.), ასევე იმის სწავლებას, თუ რა უნდა გაიგზავნოს აპლიკაში, რაც შეიძლება მოიცავდეს ანგარიშს ბუფერის მდგომარეობის შესახებ, ანგარიშს ენერჯის მარაგის შესახებ და სხვა. სწავლება შეიძლება ჩამოყალიბდეს როგორც MARL პრობლემა, სადაც UE-ების MAC-ები ღრმა განმტკიცებული სწავლების აგენტებია, რომელთაც გააჩნიათ ორი სამოქმედო სივრცე:

- აპლიკაციის სასიგნალო სამოქმედო სივრცე: აპლიკაციის ყველა შესაძლო მმართველი შეტყობინება, რომელიც UE-მ შეიძლება ოდესმე გააგზავნოს;
- PHY-ს სამოქმედო სივრცე: არხზე წვდომის ყველა ბრძანება, რომელიც MAC-ს შეუძლია გამოიძახოს PHY-ს გამოყენებითი პროგრამირების ინტერფეისის (PHY API) მეშვეობით.

ამ გზით დატრენინგებულმა პროტოკოლის იმპლემენტაციებმა შეიძლება აჯობოს ექსპერტულ სისტემებს მორგებული სასიგნალო და არხების წვდომის პოლიტიკის წყალობით. სასიგნალო სქემა არის კვანძების შეტყობინებების ლექსიკონი, ასევე მათი გამოყენების წესები. არხზე წვდომის პოლიტიკა წყვეტს, თუ როგორ გამოიყენოს PHY API, იმ ინ-

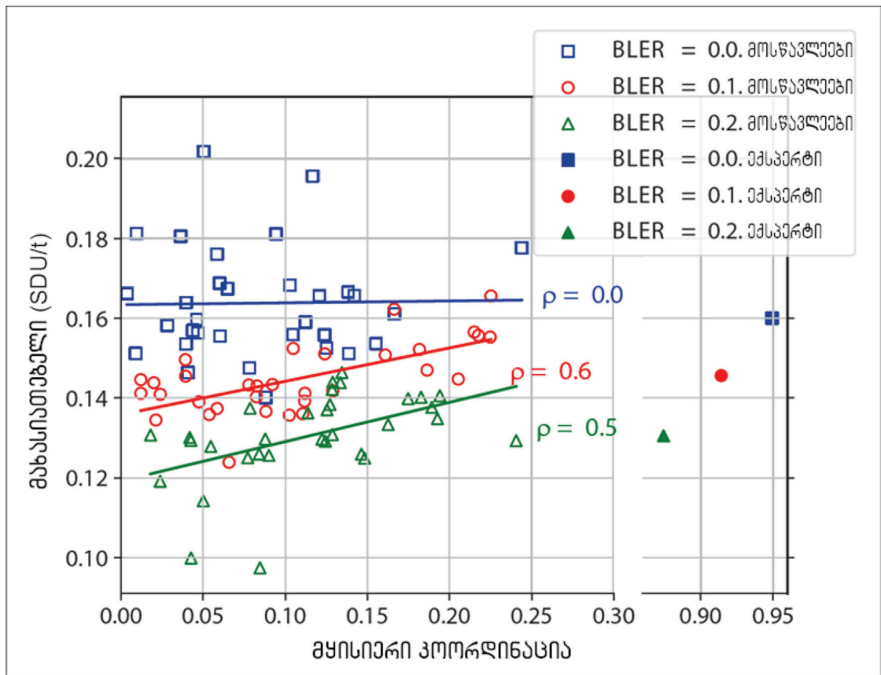
ფორმაციის საფუძველზე, რომელიც მას აქვს სასიგნალო სქემის წყალობით. აქედან გამომდინარე, სამართლიანია კითხვა, არის თუ არა ეს სარგებლიანობა დაკავშირებული ნასწავლ სასიგნალო სქემასთან, ან არხზე წვდომის პოლიტიკასთან, თუ ორივესთან ერთად? სასიგნალო სქემის ზემოქმედება UE-ების ფუნქციონირებებზე შეიძლება რაოდენობრივად განისაზღვროს ისეთი მახასიათებლით, როგორცაა მყისიერი კოორდინაცია, რომელიც წარმოადგენს ორმხრივ ინფორმაციას დაუნლინკის სასიგნალო შეტყობინებებსა და არხზე წვდომასთან დაკავშირებულ შემდგომ ქმედებებს შორის. ეს ილუსტრირებულია ნახ. 5.6-ზე, რომელიც გვიჩვენებს, რომ არასაიმედო არხებში კოორდინაციის უფრო მაღალი დონე იწვევს ეფექტიანობის ზრდას (ყურადღება უნდა მიექცეს პირსონის კორელაციის დადებით კ კოეფიციენტებს). MAC შეტყობინებების სემანტიკა, რომლებიც გამოიყენება ნახ. 5.6-ზე ფიქსირებულია და ცნობილია BS-სთვის. მიუხედავად ამისა, ML ტრენინგს შეუძლია მიგვიყვანოს იქამდე, რომ UE-ებს ექნებათ ამ შეტყობინებების ფართოდ განსხვავებული ინტერპრეტაციები და შესაბამისად, ასევე ძალიან განსხვავებული პოლიტიკა და ეფექტიანობა (ყურადღების მისაქცევია ნახ. 5.6-ზე წარმოდგენილი შედეგების მაღალი დისპერსია). ეს განსხვავება არის გადაწყვეტილებების სივრცის დიდი ზომის შედეგი, რაც აძლიერებს არგუმენტებს პროტოკოლების ოპტიმიზაციას სასარგებლოდ, რომლებსაც ჩვენი რადიოსადგურები იყენებენ.

მეთოდი 2. ახალი პროტოკოლის შემუშავება

ვინაიდან არსებობს მრავალი შესაძლო საშუალება, რომლითაც UE-ს შეუძლია დაუკავშირდეს BS-ის და რითაც ხდება მოცემული პროტოკოლის რეალიზაცია, ჩნდება კითხვა, რატომ უნდა შემოვიფარგლოთ მხოლოდ ადამიანის მიერ შექმნილი პროტოკოლებით? პროტოკოლის შესწავლის შემდეგი ეტაპი არის UE-ებისა და BS-ებისთვის ნების დართვა, რათა გამოიკვლიოს შესაძლო პროტოკოლების მთელი სივრცე. ეს რთულია, რადგან ორი რადიოსადგურის კოორდინაციისთვის, მათ ჯერ უნდა

იპოვონ მდგომარეობა, სადაც შეუძლიათ ერთმანეთის შეტყობინებების ინტერპრეტაცია. L2C-ის ბოლოდროინდელი კვლევა ვარაუდობს, რომ ენის აღმოჩენის ეს პრობლემა შეიძლება დაიძლიოს კვანძების თავდაპირველი ტრენინგით ზედამხედველობითი სწავლების გამოყენებით. არსებითად, რადიოსადგურებს ეს ანიჭებს საწყის პროტოკოლს, რომელიც მოგვიანებით შეიძლება განვითარდეს თვითთამაშის საშუალებით.

ამ გზით წარმოქმნილი საკომუნიკაციო პროტოკოლები შეიძლება რთული იყოს ინტერპრეტაციისთვის, რაც აუცილებელია მტყუნებების აღმოსაჩენად ან მახასიათებლების მონიტორინგისთვის. ამ მიზეზით,



ნახ. 5.6. ურთიერთდამოკიდებულება მახასიათებლებსა და სიგნალზე დაფუძნებულ კოორდინაციას შორის. თითოეული წერტილი ასახავს SDU-ს საშუალო მაჩვენებელს და სხვადასხვა ნასწავლი UE MAC-ების მყისიერ კოორდინაციას. დატრენინგებული იყო ორი UE ორი შემთხვევით შემოსული SDU-ის BS-ზე გადასაცემად, კონფლიქტის ან არხში დანაკარგების გარეშე, პროტოკოლის მეშვეობით, რომელიც ცნობილია BS-სთვის და უცნობია UE-ებისთვის (ანუ UE-ებს არ აქვთ ასახვა პროტოკოლის შეტყობინებებსა და PHY მოქმედებებს შორის). BLER – ბლოკზე შეცდომის ალბათობა

ზოგიერთი გამოყენების შემთხვევაში შეიძლება უპირატესობა მიანიჭოს ცნობილ პროტოკოლებს. ამისათვის საჭიროა მეტრიკები, რომელიც ზომავს მანძილს ორ პროტოკოლს შორის. ამ მანძილის მინიმიზაციის ტრენინგის მეთოდში შეიძლება შეამციროს გაურკვეველობა.

ახალი საკომუნიკაციო პროტოკოლების შესწავლის შესაძლებლობა ხსნის კარს რადიოკავშირის სისტემებისთვის, რომლებიც მორგებულია მათი განთავსების გარემოზე, რაც გაზრდის 6G-ის შესაძლებლობებს არსებული ნიშებისა და ვერტიკალური ბაზრებისთვის. AI-AI არა მხოლოდ შეამცირებს დღევანდელ ზედნადებ სასიგნალო ხარჯებს, არამედ სტანდარტიზაციისა და განვითარების ძალისხმევასაც, მომდევნო ათწლეულების უაღრესად რთული რადიოტექნოლოგიებისთვის. შესაბამისად, იგეგმება ისეთი 6G მომავალი, სადაც რადიოს სტეკის განვითარების ციკლის ნაწილები შეიძლება დილაკის ერთი დაჭერით შეიცვალოს.

5.5. მეხუთე თავის დასკვნა

მიუხედავად იმისა, რომ მიმდინარე ათწლეული გამოავლენს, უზრუნველყოფს თუ არა ხელოვნურ ინტელექტზე დაფუძნებული რადიოინტერფეისის შესახებ ამ თავში წარმოდგენილი ხედვა საკმარისად დამაჯერებელ უპირატესობას მის 6G-ში გადასაყვანად, დარწმუნებული ვართ, რომ მომავალში AI/ML ძირეულად შეცვლის კომუნიკაციის სისტემების დიზაინსა და განთავსებას. მიგვაჩნია, რომ ასეთი მიდგომა ქსელებს შესაძლებლობას მისცემს, გახდეს ინტელექტუალური, განაწილებული, მასშტაბირებადი და პროგრამირებადი პლატფორმები მონაცემთა მიწოდების კონტინუუმზე, რაც მოაგვარებს მუდმივად მზარდი სერვისის მოთხოვნებს და განთავსების სირთულესთან დაკავშირებულ პრობლემებს.

თავი 6. უპილოტო საფრენი აპარატების გამოყენება 6G-ში

6.1. შესავალი

მე-6 თავის უსადენო ქსელი გათვალისწინებულია ინტელექტუალური, უსაფრთხო, საიმედო და შეუზღუდავი კავშირის შესაქმნელად. მოსალოდნელია, რომ 6G შემოიტანს სრულფასოვან სტრუქტურას, სადაც ინტეგრირებული იქნება ტერესტრიალური/არატერესტრიალური ქსელებით დაკავშირებული საგნები და ავტომატიზაციის სისტემები, ავტონომიური მანქანებიდან UAV-მდე. ამასთან, უნდა დაკმაყოფილდეს მკაცრი და მრავალფეროვანი მოთხოვნები საიმედოობის, შეფერხების, მონაცემთა გადაცემის სიჩქარისა და ენერგოეფექტიანობის თვალსაზრისით. UAV-ები, რომლებიც საყოველთაოდ ცნობილია, როგორც დრონები, ასრულებს მთავარ როლს გამოყენების შემთხვევებისა და სცენარების ფართო სპექტრში, რომელიც შეიძლება სცდებოდეს 6G-საკვი. UAV-ების გამოყენების მაგალითები მოიცავს ამანათების მიწოდებას, მედიასაშუალებების ფუნქციონირებას, დროის რეალურ მასშტაბში თვალყურის დევნებას და დისტანციურ მშენებლობას. UAV-ების განთავსება მუდმივად იზრდება და ამერიკის შეერთებული შტატების ფედერალური საავიაციო ადმინისტრაციის (FAA) პროგნოზით, კომერციული UAV-ების საერთო რაოდენობამ 2024 წლისთვის შესაძლოა 1.6 მილიონს მიაღწიოს. იმავდროულად, უპილოტო საავიაციო სისტემის (UAS) ტრაფიკის უპილოტო მართვის (UTM) სისტემები მუშავდება დაბალ სიმაღლეზე UAV-ების უსაფრთხო და საიმედო მუშაობის მხარდასაჭერად, მათი ტრაფიკის პოტენციურად მაღალი სიმკვრივის გათვალისწინებით.

UAV-ების ფართომასშტაბიანი განთავსების მხარდაჭერა მოითხოვს საიმედო და უსაფრთხო უსადენო კომუნიკაციებს, რომლებიც უზრუნველყოფს UAV-ების უსაფრთხო მართვას და მუშაობას. ეს მოითხოვს უსადენო კომუნიკაციის ეფექტიან დიზაინს, ინტელექტუალურ გამოთ-

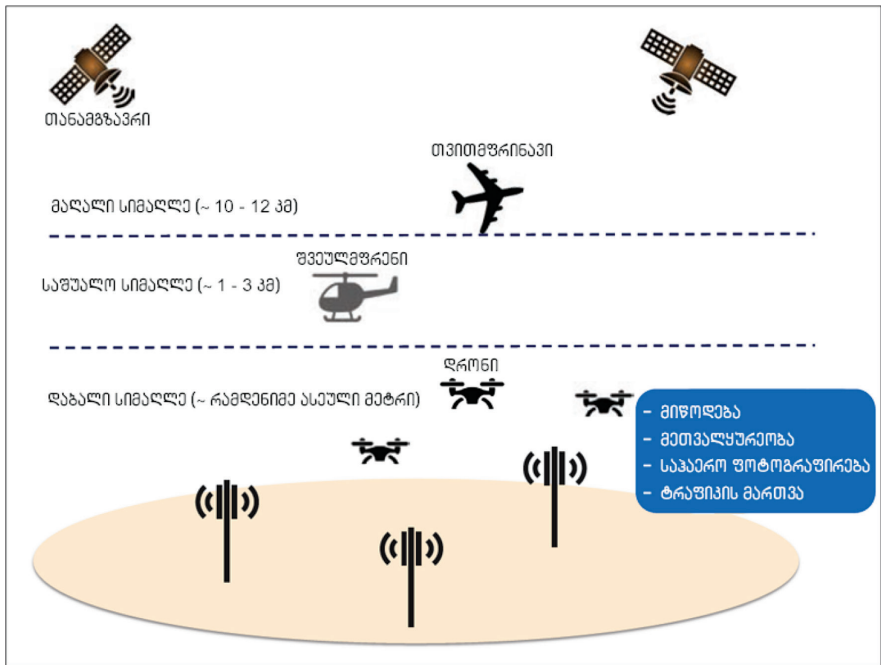
ვლებს და კონტროლის საიმედო მექანიზმებს. კერძოდ, შესაძლებელია შემდეგი ასპექტების რეალიზება:

- საიმედო სამგანზომილებიანი უსადენო კავშირი, გაუმჯობესებული ფიჭური ქსელებით და ტერესტრიალური და არატერესტრიალური ქსელების (NTN) ინტეგრირებით;
- ხელოვნური ინტელექტი (AI) საზღვარზე, რომელიც გამოიყენება UAV-ების გამოსახულების დასამუშავებლად ისეთ სცენარებში, როგორცაა ძებნისა და სამაშველო ოპერაციები, კონფლიქტების თავიდან აცილება და ინსპექტირება;
- საიმედო მართვა და UAV-ებს შორის კავშირი საფრენი ინფორმაციის ურთიერთგაცვლელად და კოოპერატიული ოპერაციებისათვის.

NTN-ებთან ინტეგრირებულ ტერესტრიალურ ფიჭურ ქსელებს პოტენციურად შეუძლიათ უზრუნველყოს ულტრასაიმედო და ულიმიტო უსადენო კავშირი UAV-ებისთვის, რომლებიც დაფრინავს სხვადასხვა სიმაღლეზე (ნახ. 6.1).

ფიჭურ სისტემებს შეუძლია მოემსახუროს UAV-ებს ფართო არეალის, ეკონომიური და საიმედო უსადენო კავშირის მიწოდებით. თუმცა, არსებული ფიჭური ინფრასტრუქტურა, ძირითადად, ოპტიმიზებულია მომხმარებელთა მოწყობილობების მომსახურებისთვის მიწასთან ახლოს. ამასთან დაკავშირებით, საჰაერო UE-ების ეფექტიანი მხარდაჭერა, განსაკუთრებით შემდეგი თაობის უსადენო ქსელებში, რომლებსაც სჭირდება შეუზღუდავი კავშირის უზრუნველყოფა, ახალი გამოწვევების წინაშე დგას მათი შედარებით მაღალ სიმაღლეზე მუშაობის, მობილურობის, მასობრივი განლაგებისა და ფრენის უსაფრთხოების მოთხოვნების გამო. ზემოთქმულიდან გამომდინარე, ფიჭურ კავშირთან შერწყმული UAV სისტემების დიზაინმა, მფრინავი UE-ების მხარდაჭერისთვის, მნიშვნელოვანი ყურადღება მიიპყრო როგორც აკადემიურ, ასევე მრეწველობასთან დაკავშირებულ წრეებში. ფიჭურ სისტემებთან შერწყმულ UAV-ებზე კვლევები

ფოკუსირებულია სხვადასხვა სფეროზე, მათ შორის სტანდარტიზაციაზე, მობილურობის მხარდაჭერაზე, განთავსების ოპტიმიზაციაზე და მახასიათებლების შეფასებებზე. იმავდროულად, მე-3 თაობის პარტნიორობის პროექტის მიხედვით დაიწყო სტანდარტიზაციის კუთხით აქტივობები საჰაერო UE-ების მხარდაჭერისთვის მე-15 გამოშვებაში, რასაც მოჰყვა შემდგომი ფუნდამენტური სამუშაოები 3GPP-ის შემდგომ გამოშვებებში.



ნახ. 6.1. ფიჭურად დაკავშირებული UAV-ები და პილოტის მიერ მართული საჰაერო გადაადგილებადი საშუალებები სხვადასხვა სიმაღლეზე

აღსანიშნავია, რომ UAV კომუნიკაციამ ახლახან მიიპყრო ყურადღება 6G-ის კონტექსტშიც და ამ მხრივ მიღებულია ბევრი საინტერესო შედეგი: შემუშავდა ინტეგრირებული ტერესტრიალური და არატერესტრიალური 6G ქსელის მოდელი, რათა მიღწეულ იქნას ყოვლისმომცველი 3D დაკავშირება ძალიან მაღალი სიჩქარით, მაღალი საიმედოობით, დაბალი შეყოვნებითა და მაღალი ენერგოეფექტიანობით; წარმოადგინეს იერ-

არქიული 3D ქსელის არქიტექტურის მიმოხილვა, რომელშიც საჰაერო და ტერესტრიალური ქსელების ინტეგრაცია გთავაზობს გლობალურ კომუნიკაციას, გამოთვლებსა და ქეშირების სერვისებს; შემუშავდა სასწავლო დოკუმენტი დრონის გამოყენების მიმდინარე და მომავალ შემთხვევებზე, მოთხოვნებსა და მხარდამჭერ ტექნოლოგიებზე; შეფასდა NTN-ების გამოყენება 6G მოთხოვნების დასაკმაყოფილებლად.

ზემოაღნიშნული კვლევები წარმოგვიდგენს ფართო მიმოხილვას არატერესტრიალური კომუნიკაციების შესახებ სხვადასხვა გამოყენების შემთხვევებისთვის. ამ თავში ჩვენ, პირველ რიგში, ყურადღებას გავამახვილებთ ფიჭურთან დაკავშირებულ UAV-ების ქსელების ევოლუციაზე 6G-ის მიმართულებით, მნიშვნელოვან ტექნიკურ გამოწვევებზე, რომლებიც დაკავშირებულია UAV-ების ფართო კომერციულ გამოყენებასთან დედამიწის ზედაპირიდან სხვადასხვა სიმაღლეზე (ანუ დაბალიდან მაღალ სიმაღლეზე) და 6G-სთვის წარმოდგენილ მნიშვნელოვან ტექნოლოგიებსა და გადაწყვეტილებებზე. კონკრეტულად, ჩვენ ყურადღებას ვამახვილებთ საიმედოობის, ტრაფიკის კონტროლისა და უსაფრთხოების ასპექტებზე, რომლებიც საჭიროა UAV-ების მხარდასაჭერად. შემდეგ ჩვენ განვიხილავთ არსებული 5G ფიჭურ სისტემებთან დაკავშირებული UAV ქსელების გამოწვევებს, შესაძლებლობებსა და 3GPP სტანდარტიზაციის აქტივობებს. ჩვენ ასევე ვიკვლევთ პერსპექტიულ ტექნოლოგიებს 5G-ის შემდგომ და 6G ქსელებში ფუნქციონირებადი UAV-ების ეფექტიანი მხარდაჭერისთვის. დაბოლოს, განვიხილავთ ხელოვნური ინტელექტისა და NTN ქსელების როლს UAV-ების დაკავშირების პროცესში.

6.2. ძირითადი ბარიერები UAV-ების ფართო კომერციული გამოყენებისთვის და შესაბამისი გადაწყვეტილებები

ქვემოთ ჩვენ განვიხილავთ სამ ძირითად ბარიერს UAV-ების ფართომასშტაბიანი განთავსების კუთხით და ვაჩვენებთ, თუ როგორ შეიძლება მათი გადალახვა ფიჭური ტექნოლოგიების გამოყენებით.

UAV-ების საიმედოობა: საავიაციო საზოგადოებას აქვს ფრენების საიმედოობასთან დაკავშირებული შესანიშნავი შედეგები. გასაგებია, რომ მას სურს უზრუნველყოს UAV-ების დაცულად ექსპლუატაცია, რადგან ისინი უფრო და უფრო დიდ მასშტაბებს იღებს. თვითმფრინავის მიმართ მთავარი მოთხოვნა ყოველთვის იყო ის, რომ პილოტი ნებისმიერ შემთხვევაში უნდა აკონტროლებდეს საფრენ აპარატს. როდესაც პილოტი არ არის ბორტზე, პილოტსა და UAV-ს შორის საკომუნიკაციო კავშირის საიმედოობა გადამწყვეტი ხდება.

პრინციპში, საჭირო საიმედოობის დონე შეიძლება დამოკიდებული იყოს ისეთ მეთოდოლოგიაზე, როგორიცაა კონკრეტული ოპერაციების რისკის შეფასება. იმის დამტკიცება, რომ ქსელს და UAV-ს გააჩნია საჭირო საიმედოობა და ხელმისაწვდომობა საოპერაციო არეალზე დაგეგმილ სიმაღლეებზე, რთული ამოცანაა. დაცულმა ექსპლუატაციამ ასევე უნდა გაითვალისწინოს რთულ ან მტრულ გარემოში მუშაობის აუცილებლობა, სადაც UAV-ებზე შეიძლება განხორციელდეს ისეთი შეტევები, როგორიცაა ინტერფერენცია, გაყალბება და ჩახშობა. მართლაც, საიმედოობა არის გადამწყვეტი მეტრიკა UAV-ების ოპერირებისთვის, რომელიც შეიძლება წარმოდგენილი იყოს მტყუნებებს შორის საშუალო დროის მიხედვით. კომერციული ავიაციის საიმედოობის (ანუ მტყუნებების სიხშირის მაჩვენებლის) მოთხოვნა არის დაახლოებით 1 მტყუნება ფრენის 105 საათზე. დრონის სისტემებისთვის საიმედოობა არის დაახლოებით 1 მტყუნება ფრენის 1000 საათზე.

ამ პრობლემის გადასაჭრელად, გლობალური UTM ასოციაცია (GUTMA) და მობილური კომუნიკაციების გლობალური სისტემის ასოციაცია (GSMA) ავითარებენ LTE-ის საჰაერო პროფილს. ეს პროფილი განსაზღვრავს LTE ქსელებსა და მოწყობილობებში სერვისის საჭირო დონეებსა და შესაძლებლობებს დრონების საიმედოდ მუშაობისთვის. მიმდინარეობს დამატებითი სამუშაოები UAV-ების მოდულების მინიმალური მახასიათებლების სპეციფიკაციების შემუშავებაზე, ტესტირების

მეთოდოლოგიებზე და ასეთი სამუშაოები დაგეგმილია 5G NR-სთვისაც 3GPP-ის მიერ მახასიათებლების საჭირო გაუმჯობესების განსაზღვრის შემდეგ.

3GPP სისტემები უზრუნველყოფს QoS-ის რამდენიმე კლასს, შესაბამისი საჭიროებების დასაკმაყოფილებლად. თუმცა, სხვადასხვა ტიპის QoS მოთხოვნების ქონა, როგორცაა მაღალი საიმედოობა და მაღალი გამტარუნარიანობა, მოითხოვს საკუთარ საფასურს. ამიტომ UAS-ის ბევრმა მწარმოებელმა თავის დრონებში დანერგა საბორტო ინტელექტი, რათა QoS მოთხოვნების დაკმაყოფილების პროცესში თავიდან აეცილებინა კონფლიქტები და განახორციელებინა ძირითადი ოპერაციები. ყოველივე ეს ამცირებს კომუნიკაციების დეტალიზაციას და შესაძლებლობას იძლევა წარმატებით განხორციელდეს კომუნიკაციების ხანმოკლე შეფერხებებთან გამკლავება.

UAV-ების უსაფრთხოება: აღწერილია მრავალი ინციდენტი, როდესაც UAV-ები იმყოფებოდა ისეთ ადგილებში, სადაც არ უნდა ყოფილიყო, ზოგჯერ შემთხვევით და ზოგჯერ ბოროტი მიზნებისთვის, როგორცაა მკვლელობის მცდელობა. UAV-ების სათანადო გამოყენების განხორციელების მთავარი ნაბიჯი არის დრონების იდენტიფიცირება. უფრო დიდი თვითმფრინავების მსგავსად, UAV-ები ჩვეულებრივ უნდა იყოს რეგისტრირებული. მაგალითად, ამერიკის შეერთებულ შტატებში უნდა დარეგისტრირდეს ყველა თვითმფრინავი, რომლის წონა აღემატება 0.55 ფუნტს. ეს სარეგისტრაციო იდენტიფიკატორი (ID) უნდა იყოს UAV-ის კორპუსზე. თუმცა, სარეგისტრაციო სტიკერი შეიძლება საკმაოდ პატარა და ძნელად წასაკითხი გახლდეთ მიწიდან. ამ მიზეზით, FAA-მ მოითხოვა, რომ UAV-მა, რომლის წონაც აღემატება 0.55 ფუნტს, მხარი დაუჭიროს დისტანციურ ID-ს. ამჟამად საჭირო დისტანციური ID-ის ფორმა არის სამაუწყებლო შუქურის პერიოდული სიგნალი, რომელიც გადაცემულია WiFi-ით ან Bluetooth-ით. მათი მიღება შესაძლებელია სათანადოდ კონფიგურირებული სმარტფონით. ამ გადაწყვეტას

აქვს შეზღუდვები, რადგან იმის გამო, რომ სიგნალების გადაცემა ხორციელდება არალიცენზირებულ სიხშირულ დიაპაზონებში, არ არის ნათელი, რომ ის საკმარისად საიმედო იქნება გადატვირთულ ურბანულ გარემოში. ასევე მნიშვნელოვანია, რომ ადამიანი, შესაბამისი მოწყობილობით, იმყოფებოდეს UAV-თან ახლოს, რათა მიიღოს ეს სიგნალები. ამ შეზღუდვების დასაძლევად შეიქმნა დისტანციური ID-ის მეორე ფორმა. ეს არის მობილურ ქსელზე დაფუძნებული დისტანციური ID, სადაც UAV პერიოდულად გადასცემს დისტანციურ მონაცემთა ბაზას თავის მდებარეობას, ვექტორს, სტატუსს და ა.შ. ამ მონაცემთა ბაზის მოძიება შესაძლებელია იმის გასარკვევად, თუ რომელი UAV-ები იმყოფება ამ ტერიტორიაზე და მასთან დაკავშირებული ინფორმაცია, როგორცაა, ვის ეკუთვნის დრონი და რა არის მისი მისია. თუმცა, ეს გადაწყვეტილება ეყრდნობა მონაცემთა ბაზების ფედერაციას, შექმნილს ამ თუ სხვა დაკავშირებული მოთხოვნების დასამუშავებლად. ეს ფედერაცია ჯერ არ არსებობს, რაც არის მეორე დისტანციური იდენტიფიკაციის მეთოდის გადადების ერთ-ერთი მიზეზი. ამასთან დაკავშირებით, 5G და მისი შემდგომი ვერსიები არის მთავარი კანდიდატები, რომლებმაც ეფექტიანად უნდა გადაიტანონ ასეთი თვალყურის დევნების ინფორმაცია დისტანციურ მონაცემთა ბაზაში.

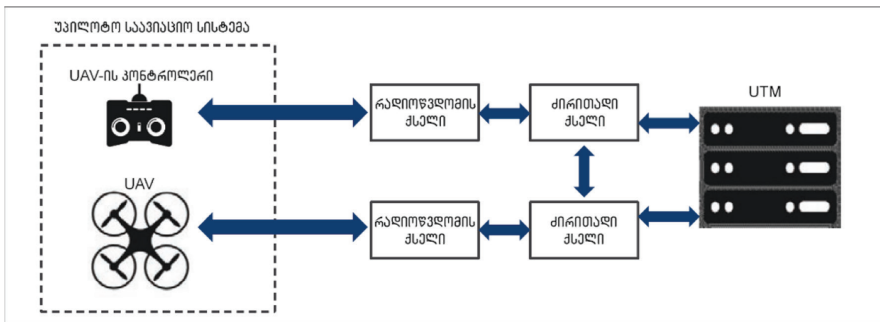
UAV-ები და საჰაერო სივრცის კონტროლი: საჰაერო სივრცის კონტროლის თვალსაზრისით, არსებობს ვრცელი პროცედურები, რომლებიც არეგულირებს მათ ოპერაციებს, ასევე ფრენის გეგმებს და UAV-ების პოზიციების კოორდინაციას საჰაერო სივრცეში. საავიაციო საზოგადოება, შემფოთებულია იმით, რომ დიდი რაოდენობით UAV დაფრინავს ისეთ ადგილებში, სადაც იმყოფებიან მკაცრი მეთვალყურეობის გარეშე. თუმცა, UAV-ების რაოდენობის გამო, ეს პროცესი უნდა იყოს ავტომატიზებული. როგორც უკვე აღვნიშნეთ, დრონების საჰაერო მოძრაობის მართვის სისტემას უწოდებენ UTM-ს. ამასთან, UTM არ არის ერთიანი სისტემა, არამედ ის არის გათვალისწინებული, როგორც სისტემების ფე-

დერაცია, რომელიც ავტორიზაციას უკეთებს და აკონტროლებს UAV-ების ტრაფიკს. UTM უზრუნველყოფს ფრენებთან დაკავშირებულ მრავალფეროვან ფუნქციებს UAV-ებისა და UAV-ების ოპერატორებისთვის. მაგალითად, ადრე ნახსენები, ქსელზე დაფუძნებული დისტანციური ID პერიოდულად აქვეყნებს მდებარეობის შესახებ ინფორმაციას UTM-ში.

UAS შედგება UAV-სა და UAV-ის კონტროლერისგან, რომელსაც იყენებს უნიკალური უფლებამოსილებებისა და საადრიცხო მონაცემების მქონე ოპერატორი. მობილურ ქსელებს შეუძლია უზრუნველყოს UAV-სა და მის კონტროლერს შორის საიმედო დაკავშირება, ხოლო UTM-ს შეუძლია დაუკავშირდეს UAV-ს და UAV-ს კონტროლერს ძირითადი ქსელის და რადიოწვდომის ქსელის მეშვეობით, როგორც ილუსტრირებულია ნახ. 6.2-ზე.

იმ შემთხვევაში, როდესაც UAV დაკავშირებისთვის იყენებს ფიჭურ ქსელებს, მომგებიანია UTM კომუნიკაციების ქსელთან ინტეგრირება და ამით დამატებითი შესაძლებლობების უზრუნველყოფა. ასეთი დამატებითი შესაძლებლობების მაგალითებია:

- ფრენის ავტორიზაციისა და საკომუნიკაციო რესურსების განაწილების დაკავშირება;
- ფრენის გეგმის მთლიანობის შემოწმება ქსელზე დაფუძნებული პოზიციონირების ინფორმაციის გამოყენებით;
- სხვადასხვა იდენტიფიკატორს შორის შესატყვისობის დადგენა.



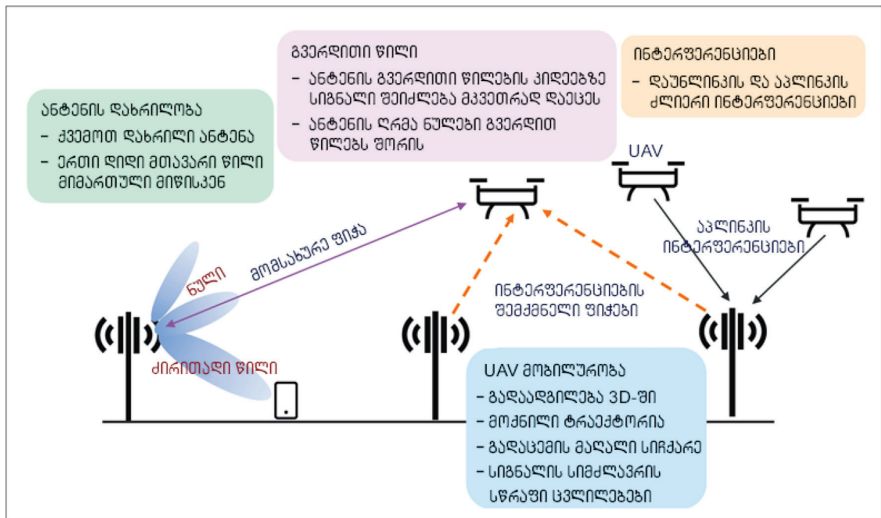
ნახ. 6.2. უპილოტო საავიაციო სისტემის UTM-თან კავშირის ილუსტრაცია

6.3. ფიჭური ქსელის გაფართოებული შესაძლებლობები UAV-ებისთვის

ამ პარაგრაფში ჩვენ განვიხილავთ ძირითად განსხვავებებს მფრინავ UE-ებსა და ტერესტრიალურ UE-ებს შორის და აღვწერთ ფიჭური ქსელე-ბის არსებულ მახასიათებლებს UAV-ების მხარდაჭერისთვის.

თავდაპირველად შევადაროთ UAV-ების UE-ები ტერესტრიალური ქსელების UE-ებს. ტერესტრიალურ UE-ებთან შედარებით, მფრინავი UAV-ების მოწყობილობების დაკავშირების ეფექტიანი მხარდაჭერა მო-ითხოვს რამდენიმე გამოწვევასთან გამკლავებას, როგორც ეს შეჯამებუ-ლია ქვემოთ და ილუსტრირებულია ნახ. 6.3-ზე.

3D მობილურობა: UAV-ებს შეუძლია გადაადგილება 3D სივრცეში და პოტენციურად მაღალი სიჩქარით. ასეთი 3D მობილურობა, რომელიც მოიცავს UAV-ების ფუნქციონირების სიმაღლის ცვლილებას, მნიშვნე-ლოვნად მოქმედებს არხის გავრცელების მახასიათებლებზე UAV-ებსა და ტერესტრიალურ BS-ებს შორის. ამან, თავის მხრივ, შეიძლება გამო-იწვიოს მიღებული სიგნალის სიმძლავრის სწრაფი ცვალებადობა და ფი-



ნახ. 6.3. ფიჭურთან დაკავშირებული UAV-ების გამოწვევები

ჭურ ქსელთან დაკავშირებული UAV-ების საკომუნიკაციო ლინკის ხარისხის ცვლილება.

BS ანტენის დახრილობა და გასხივების გვერდითი წილები: ტერესტრიალური BS-ები განკუთვნილია მიწასთან ახლოს მდებარე UE-ებთან დასაკავშირებლად. მაშასადამე, BS-ების ანტენების გასხივების ძირითადი წილები მიწისკენ არის მიმართული, ხოლო შედარებით მაღალ სიმაღლეზე UAV-ების მომსახურება, როგორც წესი, ხდება ერთი ან რამდენიმე გვერდითი წილით, უფრო მცირე სხივის სიგანით და ანტენის გაძლიერებით. გარდა ამისა, BS-ის ანტენის მიმართულობის დიაგრამაში არის რამდენიმე ნული, რომელიც ხელს უშლის BS-ის მიერ უწყვეტი დაფარვის უზრუნველყოფას ცაში.

ძლიერი ინტერფერენციები: BS-დან UAV-მდე კომუნიკაციის პროცესში, LoS-ის მდგომარეობის გათვალისწინებით, UAV-ები შეიძლება განიცდიდეს ძლიერ ინტერფერენციებს მეზობელი ფიჭებიდან. ანალოგიურად, აპლინკის მიმართულებით კომუნიკაციებში, დომინანტურმა LoS არხმა UAV-ებსა და BS-ებს შორის შეიძლება გამოიწვიოს ძლიერი ინტერფერენციები.

UAV-UE-ების დაკავშირების უზრუნველყოფის კუთხით არსებული პრობლემების მიუხედავად, მათ აქვთ რამდენიმე უპირატესობა ჩვეულებრივ ტერესტრიალურ UE-ებთან შედარებით, რომლებიც შეჯამებულია ქვემოთ.

პროგნოზირებადი გზა: UAV-ების მარშრუტები, როგორც წესი, პროგნოზირებადია მათი მისიებიდან გამომდინარე. პროგნოზირებადი გზები საშუალებას იძლევა შექმნან ცის დერეფნები, რათა ეფექტიანად ადევნონ თვალყური და მოემსახურონ UAV-ებს.

მრავალი აბონენტის იდენტიფიკაციის მოდული (Multi-SIM): Multi-SIM საშუალებას აძლევს მოწყობილობას ჰქონდეს მომსახურება მრავალი მობილური ქსელის ოპერატორისგან. ეს განსაკუთრებით სასარგებლოა ცაში მფრინავი UAV-ებისთვის, რომლებსაც შეიძლება დასჭირდეთ სხვა

ოპერატორის ქსელზე გადართვა, როდესაც ოპერატორის მოცემული ქსელი ვერ უზრუნველყოფს საჭირო დაფარვას. Multi-SIM ტექნოლოგია ხელს უწყობს UAV-ების უწყვეტ კავშირს და აძლიერებს მათ მიერ განხორციელებული ოპერაციების დაფარვას, უსაფრთხოებასა და დაცულობას.

კონტროლირებადი სიმკვრივე: UAV-ები, როგორც წესი, არის კონტროლირებადი სიმკვრივის კუთხით, რადგან UTM ახორციელებს ფრენის სპეციფიკურ განცალკევებას. ასეთი კონტროლირებადი სიმკვრივე სასარგებლოა ტრაფიკის მართვისთვის, ინტერფერენციების თავიდან აცილებისთვის და ქსელის ოპტიმიზაციისთვის.

5G ახალ რადიოში (5G NR) პირველად გამოჩნდა ფიჭურთან დაკავშირებული UAV-ები. 3GPP-ში, მათი კვლევა დაიწყო მე-15 გამოშვებაში, რათა შეფასებულიყო LTE ქსელი UAV-UE-ების მხარდაჭერი შესაძლებლობების კუთხით. ფიჭურთან დაკავშირებული UAV-ების ქსელი კიდევ უფრო ვითარდება 5G NR UAV-ებისკენ. გარდა LTE-ში დანერგილი ფუნქციებისა და ტექნიკის პოტენციური გამოყენებისა, 5G NR-ს აქვს სხვა მოწინავე შესაძლებლობებიც, რაც UAV-ების მტკიცე მხარდაჭერას იძლევა. კონკრეტულად, 5G NR შესაძლებლობები მოიცავს მოქნილ ნუმეროლოგიას (მაგალითად, ქვეგადამტანთა დაშორებას), ანტენის მოწინავე ტექნოლოგიებს და სხივის ფორმირების შესაძლებლობებს, უფრო დახვეწილ ქვეგადამტანთა აგრეგაციის სქემას და ფართო სიხშირის გატარების ზოლთან დაკავშირებულ ოპერაციებს. 5G NR-ის ეს ფუნქციები და შესაძლებლობები არის ძირითადი ფაქტორები, რომლებიც უზრუნველყოფს UAV-ების დაკავშირების საუკეთესო მახასიათებლებს 3D დაფარვის, მონაცემთა გადაცემის სიჩქარის, შეყოვნებისა და საიმედოობის კუთხით. იმავდროულად, 3GPP-ის მე-17 გამოშვების 2020 წლის სექტემბერის TS 22.125 დოკუმენტში, შესწავლილია 5G გაუმჯობესება UAV-ებისთვის. ამ ნაშრომში იდენტიფიცირებულია ახალი KPI-ები და კომუნიკაციის მოთხოვნები UAV-ებისთვის 3GPP-ის მიხედვით, რომელიც მოიცავს KPI-ებს საკომუნიკაციო სერვისისთვის, ტრაფიკის მართვისა და

კონტროლისთვის. ასევე, 3GPP-ის მე-17 გამოშვება სწავლობს UAS-ის გამოყენების ფენის მხარდაჭერას, მათ შორის UTM-თან მხარდაჭერისა და ურთიერთქმედების ფუნქციონალურ შესაძლებლობებს.

5G შესაძლებლობები და მოწინავე ფუნქციები იძლევა UAV კომუნიკაციების ეფექტიან მხარდაჭერას. უფრო კონკრეტულად, ეს ფუნქციებია:

- სპექტრის მოქნილობა: 5G მხარს უჭერს მოქნილ ნუმეროლოგიას, ფართო სიხშირის გატარების ზოლს, 400 მჰც-მდე მაღალ სიხშირულ დიაპაზონში (24 გჰც-ის ზემოთ) და სიხშირული გადამტანების აგრეგაციას (16-მდე კომპონენტით), რაც უზრუნველყოფს მონაცემთა მაღალი სიჩქარით კომუნიკაციას. VR აპლიკაციებში გამოყენებული UAV-ებისთვის, მაღალი ხარისხის სურათებისა და ვიდეოების გადასაცემად საჭიროა მონაცემთა გადაცემის მაღალი სიჩქარე და დაბალი შეყოვნების უსადენო კომუნიკაცია;
- მოწინავე საანტენო ტექნოლოგიები: 5G ეყრდნობა მოწინავე საანტენო ტექნოლოგიებს, როგორცაა სხივის გაუმჯობესებული ფორმირება და mMIMO-ს სქემები; თანაც მხარს უჭერს როგორც ერთმომხმარებლიან, ასევე მრავალმომხმარებლიან MIMO-ს, რაც ზრდის ფიჭურთან დაკავშირებულ UAV სისტემების გამტარუნარიანობას. გარდა ამისა, 5G იყენებს სხივების მართვისა და სხივების გაშლის ფუნქციებს ვიწრო სხივის ოპერაციებით, რამაც შეიძლება გაზარდოს დაფარვა, გამტარუნარიანობა და ამასთან, შეამციროს ინტერფერენციები მხარდაჭერილი UAV-ებისთვის;
- ქსელის დანაწევრება: ეს მრავალ ლოგიკურ ქსელს საშუალებას აძლევს ეფექტიანად იმუშაოს საერთო ფიზიკური ინფრასტრუქტურის გამოყენებით სხვადასხვა სერვისის მიწოდებისას. ამასთან, ის უზრუნველყოფს ქსელის ოპტიმიზაციის საშუალებას UAV-ების მართვისა და კონტროლის სხვადასხვა მოთხოვნის დასაკმაყოფილებლად და ასევე, მონაცემთა გადაცემის შესაძლებლობას სხვადასხვა აპლიკაციაში.

6.4. ფიჭურთან დაკავშირებული UAV ქსელების გამოყენება 6G-ში

მოსალოდნელია, რომ 6G გააფართოვებს 5G-ის შესაძლებლობებს და მომხმარებლებს შესთავაზებს მნიშვნელოვან გაუმჯობესებას მონაცემთა გადაცემის სიჩქარის, საიმედოობის, შეყოვნების, ენერგოეფექტიანობის, კავშირის სიმკვრივის, უფრო სწრაფი მობილურობის და ქსელის ინტელექტის თვალსაზრისით. ამ პარაგრაფში ჩვენ განვიხილავთ, თუ როგორ შეუძლიათ ფიჭურთან დაკავშირებულ UAV ქსელებს გამოიყენონ 5G-ის შემდგომი და 6G-ის ძირითადი ტექნოლოგიები, რათა გაუმჯობესდეს მათი მახასიათებლები. უფრო მეტიც, ჩვენ აღვწერთ AI-ის როლს ფიჭურთან დაკავშირებული რთული UAV ქსელების მოდელირებისა და ოპტიმიზაციისთვის.

mMIMO: დიდი საანტენო მესრების გამოყენებით, მიწის ზედაპირზე განლაგებულ BS-ებს შეუძლია შეასრულოს ადაპტიური 3D სხივის ფორმირება ვიწრო სხივებით, რათა ეფექტიანად დაუჭიროს მხარი UAV-ებს ცაში და ტერესტრიალურ მომხმარებლებს. mMIMO-ს შეუძლია მნიშვნელოვნად გაზარდოს ფიჭურთან დაკავშირებული UAV ქსელების სპექტრული ეფექტიანობა და დაფარვის მახასიათებელი. mMIMO-ს, მაქსიმალურად გაზრდილი თვალყურის დევნების შესაძლებლობით, შეუძლია მნიშვნელოვნად შეამციროს ფიჭებს შორის ინტერფერენციები ფიჭურთან დაკავშირებულ UAV ქსელებში. კერძოდ, ანტენის ფიქსირებული დახრის მიდგომასთან შედარებით, 3D mMIMO-ს აქვს უპირატესობა, მოქნილად აკონტროლოს სხივები 3D-ში და დინამიკურად ჩაახშოს ფიჭებს შორის წარმოქმნილი ინტერფერენციები. თუმცა, მისი მახასიათებელი შეიძლება შეიზღუდოს, რადგან UAV-ების რაოდენობა იზრდება და ასევე, საჭიროა ფართოზოლოვანი სერვისების მიწოდება მაღალ ორბიტაზე ფუნქციონირებადი UAV-ებისთვის. ამ შემთხვევაში, შესაძლოა საჭირო გახდეს სპეციალური, ზემოთ მიმართული და დახრილი BS ანტენების გამოყენება UAV-ების მოთხოვნების დასაკმაყოფილებლად და ტერესტრიალურ UE-ებთან ეფექტიანი თანაარსებობის უზრუნველ-

საყოფად. გარდა ამისა, 3D mMIMO და ანტენის დახრის ოპტიმიზაცია შეიძლება ერთობლივად იქნას გამოყენებული ფიჭურთან დაკავშირებული UAV-ების მუშაობის მახასიათებლების გასაუმჯობესებლად. კიდევ ერთი პერსპექტიული ტექნოლოგია არის უფიჭო mMIMO, რომელშიც დიდი რაოდენობით განაწილებული ანტენის გამოყენება შესაძლებელია UAV-ების საიმედო, ფართომასშტაბიანი და ეკონომიური მხარდაჭერის უზრუნველსაყოფად. თუმცა, mMIMO-ს უპირატესობების მისაღებად საჭიროა რამდენიმე, უფიჭო ტექნოლოგიასთან დაკავშირებული პრობლემის გადაწყვეტა, რომელიც მოიცავს 3D სხივის თვალყურის დევნებას, არხის საიმედო შეფასებას, სიგნალის ოვერჰედის შემცირებას და ინტერფერენციების მენეჯმენტს ტერესტრიალურ UE-ებთან თანაარსებობის პირობებში.

მაღალ სიხშირეებზე მუშაობა: მმტ და ტ3ც კომუნიკაციები არის პერსპექტიული გადაწყვეტილებები მონაცემთა მაღალი სიჩქარის სერვისების შეთავაზებისთვის. ასეთ მაღალ სიხშირეებზე ოპერირება გვთავაზობს ფართო სიხშირის გატარების ზოლზე ხელმისაწვდომობას და საშუალებას იძლევა გამოყენებულ იქნას პატარა ანტენები mMIMO სისტემებში, რომლებიც წარმოადგენს UAV-ებისთვის მონაცემთა მაღალი სიჩქარით გადაცემის მოთხოვნების დაკმაყოფილების ძირითად საშუალებას. მიუხედავად ამისა, ასეთ მაღალ სიხშირეებზე მუშაობისას, გადაცემის სიშორე მცირეა. საკომუნიკაციო დიაპაზონის გასაუმჯობესებლად, UAV ქსელებს შეუძლია დაეყრდნოს ვიწრო სხივებს გამლიერების მაღალი კოეფიციენტით, მრავალნახტომიან კომუნიკაციებს, UAV-ების მობილურობის და დაგეგმვის ერთობლივ ოპტიმიზაციას LoS ლინკების უზრუნველსაყოფად და დაჩრდილვის ეფექტის შესამცირებლად.

RIS: როგორც ამ წიგნის მეორე თავში იყო წარმოდგენილი, რეკონფიგურირებადი ინტელექტუალური ზედაპირები იძლევა ელექტრომაგნიტური სიგნალების ჭკვიანურად არეკვლის შესაძლებლობას სასურველი მიმართულებით, გავრცელების მდგომარეობისა და საკომუნიკაციო კა-

ვშორის ხარისხის გასაუმჯობესებლად. კერძოდ, RIS იძლევა მიღებული სიგნალების ფაზის და ამპლიტუდის მართვის, სიგნალის საერთო ხარისხის ენერგოეფექტიანი გზით გაზრდის საშუალებას. ამასთან დაკავშირებით, RIS-სა და UAV-ებს შორის ურთიერთქმედებამ, მათი მოქნილობიდან და გამოყენებული LoS არხებიდან გამომდინარე, შეიძლება მნიშვნელოვნად გაზარდოს ენერგოეფექტიანობა 6G ქსელებში. იმავედროულად, ფიქურთან დაკავშირებულ UAV სისტემებს ასევე შეუძლია გამოიყენოს RIS-ები, დახრილი BS ანტენების პრობლემის გადასაჭრელად ცაში UAV მიმართულებით გადაცემული სიგნალების ოპტიმალურად ასახვით და დაუნლინკში ინტერფერენციების შესამცირებლად, რითაც გაიზრდება UAV-ების დაფარვა. ამ შემთხვევაში, შესაძლებელია ერთობლივად მოვახდინოთ RIS-ების პოზიციების და მათი სხივის ფორმირების პარამეტრების ოპტიმიზაცია, ტერესტრიალური BS-ების მდებარეობის, UAV-ების და არსებული დაბრკოლებების მიხედვით.

ენერჯის შეგროვება, ენერჯის უსადენო გადაცემა და გაღვიძების რადიო: ტექნოლოგიის წინსვლა 6G-მდე, ენერჯის დაგროვება და ენერჯის უსადენო გადაცემა მიმზიდველი ხდება ბატარეით შეზღუდული მოწყობილობების მუშაობის გასაუმჯობესებლად. ანალოგიურად, UAV-ებისთვის ბატარეის შეზღუდვით, ენერჯის შეგროვება (მაგალითად, მზის, ქარის) და ენერჯის უსადენო გადაცემა ტერესტრიალური BS-ების გამოყენებით შეიძლება იყოს პერსპექტიული გადაწყვეტილებები UAV-ების მუშაობის გასახანგრძლივებლად. გარდა ამისა, თითქმის ნულოვანი სიმძლავრის მოხმარების მქონე გაღვიძების რადიოტექნოლოგიები შეიძლება გამოყენებულ იქნას UAV-ებში მათი კომუნიკაციასთან დაკავშირებული ენერჯის მოხმარების მინიმუმამდე შესამცირებლად. თუმცა, არსებობს დიზაინის პრობლემები UAV-ების მუშაობის გათვალისწინებით და ისინი დაკავშირებულია ენერჯის შეგროვების სტოქასტურ ბუნებასთან, მაღალი სიჩქარით გადაადგილებადი UAV-ებისთვის შორ მანძილზე ენერჯის საიმედო გადაცემასთან და მაღალი მგრძობე-

ლობის გაღვიძების რადიოებთან UAV-ების შორ მანძილზე კომუნიკაცი-
ისას.

3D ფიჭური ქსელები: 6G-ის მიმართულებით მოძრაობისას, დრო-
ნებზე ან აეროსტატებზე დამონტაჟებული საჰაერო BS-ების გამოყენება
არის მიმზიდველი გადაწყვეტა 3D კავშირის უზრუნველსაყოფად. კერ-
ძოდ, ეს საშუალებას იძლევა შემუშავდეს 3D ფიჭური ქსელის არქი-
ტექტურა, რომელიც მოიცავს სხვადასხვა საჰაერო პლატფორმებს, როგო-
რიცაა მფრინავი BS, საჰაერო ბექჰოლის კვანძები და მფრინავი UAV-UE-
ები. ასეთ 3D ფიჭურ ქსელს შეუძლია შემოგვთავაზოს საიმედო, დაბალი
შეყოვნების და მონაცემთა მაღალსიჩქარიანი გადაცემის სერვისები ცაში
მფრინავი UAV-UE-ებისათვის.

ISAC: კიდევ ერთი მნიშვნელოვანი ტექნოლოგია, რომელიც უზრუნვე-
ლყოფს 6G-ზე გადასვლას, არის ISAC, სადაც კომუნიკაციისა და ზონდირე-
ბის ფუნქციების ჩართვა შესაძლებელია საერთო სპექტრისა და აპარატუ-
რული პლატფორმის გამოყენებით. ISAC-ს შეუძლია ხელი შეუწყოს UAV-ე-
ბის მონიტორინგს და მართვას, რაც რთულია ამ მოწყობილობების დედამი-
წიდან დაბალ სიმაღლეზე ფუნქციონირების, მაღალი მობილურობისა და
მცირე ზომის გათვალისწინებით, რომლებიც შეიძლება არ იყოს გამოვლე-
ნილი რადარებისა და სათვალთვალო სისტემების მიერ. ამასთან დაკავში-
რებით, ფიჭურზე დაფუძნებულ ISAC გადაწყვეტილებებს შეუძლია UAV-ე-
ბის გამოვლენის, მაღალი სიზუსტით ლოკალიზაციის და მონიტორინგის
მხარდაჭერა, ამავე დროს საიმედო უსადენო კავშირის უზრუნველყოფა.
გარდა ამისა, ISAC ტექნოლოგიის გამოყენება შესაძლებელია ფიჭურთან
დაკავშირებულ UAV-ებში დაბრკოლებების აღმოსაჩენად, რათა მოხდეს
UAV-ების ნავიგაციის და მარშრუტის დაგეგმვის ეფექტიანი მხარდაჭერა.

AI-ის გამოყენება: ფიჭურთან დაკავშირებული UAV-ების ქსელების
მახასიათებლები შეიძლება კიდევ უფრო გაუმჯობესდეს ხელოვნური
ინტელექტის, განსაკუთრებით ML ტექნიკის ინსტრუმენტების გამო-
ყენებით. ქსელურ ინტელექტს, რომელიც გათვალისწინებულია 6G-ის

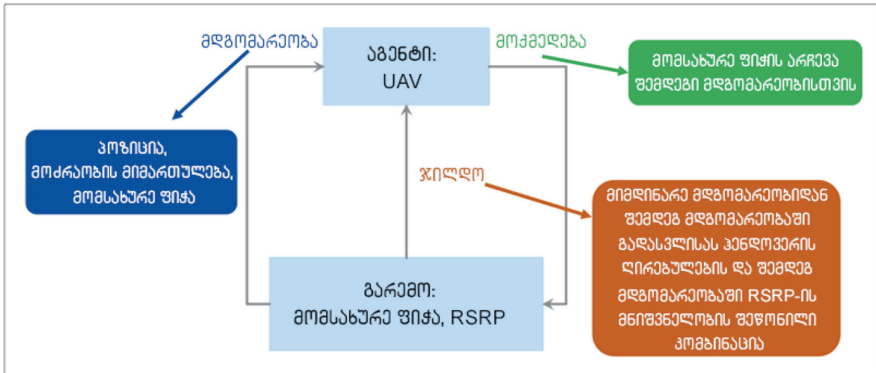
მთავარ მამოძრავებელ ძალად, შეუძლია მნიშვნელოვანი როლი ითამაშოს UAV-ების დაკავშირებაში. კონკრეტულად, AI-ზე დაფუძნებული გადაწყვეტილებები შეიძლება გამოყენებულ იქნას UAV-ების ეფექტიანი იდენტიფიკაციის, ტრაფიკის მართვის, ფრენის მარშრუტის დაგეგმვისა და კონფლიქტების თავიდან ასაცილებლად. გარდა ამისა, ML-ს შეუძლია დახმარება გასწიოს ქსელის განთავსების ოპტიმიზაციის, რესურსების მართვის, რესურსების ოპტიმიზაციის და ცაში მობილურობის მხარდაჭერის მიმართულებით. UAV-ების ეფექტიანი მხარდაჭერა აუცილებელია ამ თავში ადრე აღწერილი ქსელების გამოწვევებთან გასამკლავებლად. კერძოდ, UAV-ების უწყვეტი კავშირის უზრუნველყოფა ცაში მოითხოვს ჰენდოვერის საიმედო მექანიზმების გამოყენებას. ამასთან დაკავშირებით, განმტკიცებულ სწავლებას (RL) შეუძლია გადამწყვეტი როლი ითამაშოს ჰენდოვერის ოპტიმალური წესების შემუშავებაში, რომლებიც უზრუნველყოფს საიმედო კავშირის ჰენდოვერზე გათვალისწინებული მინიმალური დანახარჯებით. ლიტერატურაში შედარებულია RL-ზე დაფუძნებული ჰენდოვერის სქემის მახასიათებელი ხარბი ალგორითმის (greedy algorithm) მიდგომასთან, რომელშიც UAV ყოველთვის უერთდება უძლიერეს BS-ის, ანუ რომელსაც აქვს რეფერენსული სიგნალის მიღებული სიმძლავრის (RSRP) უდიდესი მნიშვნელობა. ცაში ფიჭების ასოციაციის ფრაგმენტული მოდელის გათვალისწინებით, ხარბი სქემა იწვევს ჰენდოვერის მნიშვნელოვან რაოდენობას. თუმცა, RL-ზე დაფუძნებულ სქემას შეუძლია RSRP-სა და ჰენდოვერის რაოდენობას შორის კომპრომისის დაფიქსირება ჯილდოს ფუნქციის გამოყენებით, რომელიც დაფუძნებულია RSRP მნიშვნელობებისა და ჰენდოვერის ღირებულების შეწონილ კომბინაციაზე. RL სქემაში აგენტი (მაგალითად, UAV) ურთიერთქმედებს გარემოსთან, ასრულებს მოქმედებას გარკვეულ მდგომარეობაში, იღებს ჯილდოს/უკუკავშირის მისი მოქმედების საფუძველზე და გადადის ახალ მდგომარეობაში. RL-ზე დაფუძნებული ჰენდოვერის მექანიზმის ილუსტრაცია ნაჩვენებია ნახ. 6.4-ზე. RL-ზე დაფუძნებულ სქე-

მას შეუძლია მნიშვნელოვნად შეამციროს მფრინავი UAV-ის მომსახურებისთვის საჭირო ჰენდოვერების რაოდენობა და სასიგნალო ოვერჰედი. მაგალითად, UAV-სთვის, რომელიც დაფრინავს 50 მ სიმაღლეზე გეოგრაფიულ არეალზე 21 ფიჭით (ანუ BS-ით), RSRP მნიშვნელობების თანაბარი წონისა და ჰენდოვერის ღირებულების გათვალისწინებით, RL-ზე დაფუძნებულ სქემას შეუძლია დაახლოებით 10-ჯერ ნაკლები ჰენდოვერის განხორციელება, ვიდრე ხარბ ალგორითმზე დაფუძნებულ მიდგომას.

6.5. დაბალ სიმაღლეზე ფუნქციონირებადი UAV-ების მიღმა

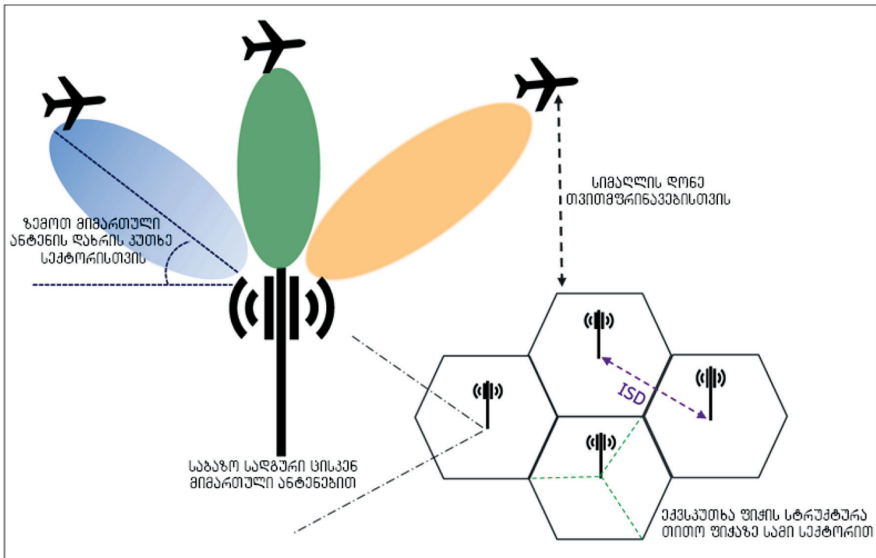
წინა პარაგრაფებში ჩვენ ძირითადად ორიენტირებული ვიყავით დაბალ სიმაღლეზე ფუნქციონირებადი UAV-ების დაკავშირებაზე. მიუხედავად ამისა, ულიმიტო კავშირის საჭიროება მუდმივად იზრდება და სცილდება დაბალ სიმაღლეზე განთავსებულ UAV-ებს. აქ ჩვენ განვიხილავთ ორ ასპექტს მომავალი „დაკავშირებული ცის“ მიმართულებით.

დაბალ სიმაღლეზე განლაგებული UAV-ების გარდა, ფიჭურ ქსელებს შეუძლია აგრეთვე უზრუნველყოს UAV-ების და/ან პილოტირებული თვითმფრინავების დაკავშირება, რომლებიც დაფრინავს მაღალ სიმაღლეზე (მაგალითად, რამდენიმე კილომეტრში). პირდაპირ, ჰაერი-მიწა (A2G) კომუნიკაციას, ფიჭური ინფრასტრუქტურის გამოყენებით შეუძლია მიაწოდოს საიმედო, მონაცემთა გადაცემის მაღალი სიჩქარის და დაბალი შეყოვნების სერვისები მაღალ სიმაღლეებზე. აღსანიშნავია, რომ ასეთ ფიჭურზე დაფუძნებულ A2G კომუნიკაციას, თუ ის სწორად არის დაპროექტებული, შეუძლია ფრენის დროს შესთავაზოს ფართოზოლოვანი კავშირი თვითმფრინავს, რომელიც დაფრინავს დაახლოებით 10 კმ სიმაღლეზე. ოპტიმიზებული მახასიათებლების მისაღწევად, A2G კომუნიკაციებს შეიძლება გამოყოფილი ჰქონდეს ფიჭური ანძების მსგავსი ტერესტრიალური BS-ები, მაგრამ განლაგების განსხვავებული პარამეტრებით, მაგალითად, ანტენის დახრილობის, საიტებს შორის მანძილის (ISD) და სექტორების რაოდენობის მიხედვით ერთ კვანძზე (ნახ. 6.5).



ნახ. 6.4. RL-ზე დაფუძნებული ჰენდოვერის მუშაობის მექანიზმი

A2G ქსელების ეფექტიანი განლაგება მოითხოვს რთული 5G სისტემების ქცევის მოდელირებას და ურთიერთდამოკიდებული პარამეტრების ფართო სპექტრის ოპტიმიზაციას. ამასთან დაკავშირებით, ML ინსტრუმენტებს შეუძლია მნიშვნელოვანი როლი შეასრულოს გამოყოფილი A2G ქსელების მოდელირებასა და ოპტიმიზაციაში 5G-ში და მის ფარგლებს გარეთ. ამის საჩვენებლად, ჩვენ განვიხილავთ A2G ქსელის განთავსების



ნახ. 6.5. გამოყოფილი A2G ქსელის საილუსტრაციო მაგალითი

ოპტიმიზაციის მაგალითს ღრმა სწავლების გამოყენებით. აქ ჩვენ განვიხილავთ BS-ის ანტენის დახრის კუთხის ოპტიმიზაციის პრობლემას მომხმარებლის გამტარუნარიანობის მაქსიმალურად გაზრდის მიზნით ცაში. ამ პრობლემის მოგვარება შესაძლებელია ლიტერატურაში აღწერილი ორმაგი სიღრმის ნეირონული ქსელის (bi-DNN) არქიტექტურის გამოყენებით. bi-DNN შედგება ორი DNN-ისგან: პირველი DNN შემუშავებულია A2G ქსელის ქცევის აპროქსიმაციისთვის, ხოლო მეორე DNN შექმნილია, როგორც ფუნქციის ოპტიმიზატორი, რათა განსაზღვროს ქსელის ოპტიმალური აწყობა სხვადასხვა პარამეტრის მიხედვით, რომელიც შეიცავს BS-ების ანტენების დახრილობებს. ანტენის ოპტიმალური დახრილობები დამოკიდებულია ISD-ზე, სექტორების რაოდენობაზე, თვითმფრინავის ფრენის სიმაღლეზე, BS-ების ადგილმდებარეობასა და ტრაფიკის დატვირთვაზე.

სექტორების რაოდენობა	ჯამით მიმართული ანტენის დახრის კუთხეები სხვადასხვა სექტორისთვის (ISD=20 კმ)	ჯამით მიმართული ანტენის დახრის კუთხეები სხვადასხვა სექტორისთვის (ISD=80 კმ)
1	78	35
3	[57, 58, 57]	[29, 32, 27]
4	[90, 58, 62, 61]	[26, 35, 36, 37]

ცხრილი 6.1. A2G ქსელისთვის ანტენების ოპტიმიზებული დახრილობები (გრადუსებში) სხვადასხვა რაოდენობის სექტორებისა და ISD-ს ორი მნიშვნელობისთვის

ცხრილში 6.1 ჩვენ წარმოვადგენთ რეპრეზენტაციულ შედეგებს ანტენის დახრის ოპტიმალური კუთხეებისთვის სექტორების სხვადასხვა რაოდენობისა და ISD მნიშვნელობებისთვის. ეს შედეგები ეფუძნება თვითმფრინავის მდებარეობას 12 კმ სიმაღლეზე, BS-ის 35 მ სიმაღლეზე და 3.5 გჰც გადამტან სიხშირეს. გარდა ამისა, მახასიათებლის მეტრიკა არის ცაში მომხმარებლის გამტარუნარიანობის 50-ე რიგის პროცენტილი. დაკვირვების შედეგი არის ის, რომ ანტენის დახრის ოპტიმალური კუთხეები მცირდება ISD-ის მატებასთან ერთად, რათა უზრუნველყოს საკმარისი დაფარვა

მთელი ფიჭის მიხედვით. მაგალითად, სამსექტორიანი შემთხვევისთვის, დახრის ოპტიმალური კუთხეები შესაბამისად მცირდება [57°, 58° , 57°]-დან [29°, 32°, 27°]-მდე, როდესაც ISD იზრდება 20 კმ-დან 80 კმ-მდე.

ტერესტრიალური ფიჭური ქსელების შევსება NTN-ებით ძალიან მნიშვნელოვანია „დაკავშირებული ცის“ კონცეფციის სრულად რეალიზებისთვის. კერძოდ, თანამგზავრული კავშირებით ტერესტრიალური ლინკების შევსება მნიშვნელოვანია შორეულ ადგილებში ოპერირების შესაძლებლობისთვის. გათვალისწინებულია, რომ 6G სავარაუდოდ უზრუნველყოფს ინტეგრირებულ გადაწყვეტილებებს ისეთი შესაძლებლობებით, როგორცაა ჰენდოვერი ან ტერესტრიალური და თანამგზავრული კავშირის ერთდროული გამოყენება ერთი მოდემის ფარგლებში. ეს თემატიკა განხილული იქნება შემდეგ თავში.

მიუხედავად იმისა, რომ ტერესტრიალური ფიჭური ქსელები სულ უფრო ფართოდ არის განთავსებული, არის შორეული ადგილები, სადაც პრაქტიკულად შეუძლებელია ტერესტრიალური ფიჭური ქსელების ამენება. იმავდროულად, არ არის იშვიათი UAV-ების გამოყენების შემთხვევები შორეულ ადგილებში. გამოყენების ერთ-ერთი მაგალითია მილსადენის ინსპექტირება და მონიტორინგი, რომლის დროსაც ინსპექტორები ეყრდნობიან იმ UAV-ებს, რომლებიც იღებს მილსადენების ფოტოებსა და ვიდეოებს შორეული, ძნელად მისაწვდომი ადგილებიდან და მონაცემებს დასამუშავებლად აგზავნის. UAV-ებს ასევე იყენებენ სატყეო აპლიკაციებში, რადგან მათ დახმარების გაწევა შეუძლია ტყის ხანძრის ან ტყის მდგომარეობის მონიტორინგისას, ველურ ბუნებაზე თვალყურის დევნებისას და ა.შ. შორეულ რაიონებში მფრინავი UAV-ების დაკავშირების უზრუნველსაყოფად, აუცილებელია ტერესტრიალური ფიჭური ქსელების შევსება NTN ქსელებით მაღალი სიმაღლის პლატფორმებზე განლაგებული სადგურებისა და თანამგზავრული ტექნოლოგიის გამოყენებით.

UAV-ები მნიშვნელოვან როლს ასრულებს კრიტიკულად მნიშვნელოვან გამოყენებებში, როგორებიცაა კატასტროფის შემდგომი აღდგენითი სამუშაოები და საზოგადოებრივი უსაფრთხოების უზრუნველყოფა. კრი-

ტიკულად მნიშვნელოვანი ამოცანების გადაჭრის პროცესში, ტერესტრიალურ ფიჭურზე დაფუძნებული ქსელები არის მთავარი საშუალება, რომ უზრუნველყოფილი იყოს უსაფრთხო, მდგრადი და მაღალი ხარისხის დაკავშირება კრიტიკული სერვისების მხარდასაჭერად, მათ შორის UAV-ების ჩართვით ამ პროცესში. როდესაც ტერესტრიალური ფიჭური ქსელები ირღვევა კატასტროფების დროს, NTN არის სიცოცხლისუნარიანი სარეზერვო ალტერნატივა UAV-ების დასაკავშირებლად, სამაშველო და დახმარების აღმომჩენი ძალისხმევის მხარდასაჭერად.

6.6. მეექვსე თავის დასკვნა

ამ თავში ჩვენ განვიხილეთ თანამედროვე მიდგომები UAV-ებთან დაკავშირებული ძირითადი ბარიერებისა და მათი პოტენციური გადაწყვეტილებების შესახებ, მფრინავი UAV-ების ფართო კომერციული განთავსებისთვის 5G-ის შემდგომი და 6G უსადენო სისტემებისთვის. გარდა ამისა, ჩვენ აღვწერეთ ფიჭური ქსელების შესაძლებლობა UAV-ებისთვის უმტყუნო შეერთებების, საიმედოობის, უსაფრთხოებისა და დაცულობის შეთავაზების კუთხით, მათ მოწინავე მახასიათებლებზე და ასევე, UTM მხარდაჭერაზე დაყრდნობით. ჩვენ ასევე წარმოვადგინეთ ლიტერატურაში არსებული მიდგომები იმის შესახებ, თუ როგორ შეიძლება ხელოვნური ინტელექტის გამოყენება ფიჭურთან დაკავშირებული UAV ქსელების დიზაინისა და ოპტიმიზაციისთვის.

„დაკავშირებული ცის“ მომავალი პერსპექტიულია, მიუხედავად გამოწვევებისა, რომელიც უნდა გადავლახოთ 6G-ის გზაზე. არსებობს მრავალი ნაყოფიერი მიმართულება მომავალი კვლევისთვის და ეს თავი ხაზს უსვამს ორ პერსპექტიულ სფეროს: უსადენო კავშირის შეთავაზება მაღალ სიმაღლეებზე A2G კომუნიკაციებით და NTN-ების ინტეგრაცია ტერესტრიალურ ქსელებთან UAV-ების დაკავშირების მდგრადობის გასაუმჯობესებლად. მფრინავი UAV-ების ფართო კომერციული განთავსებისთვის გზის გასახსნელად, საშუალო და ფართომასშტაბიანი ექსპერიმენტების, ცდების ჩატარება იქნება კიდევ ერთი ძირითადი კვლევის მიმართულება.

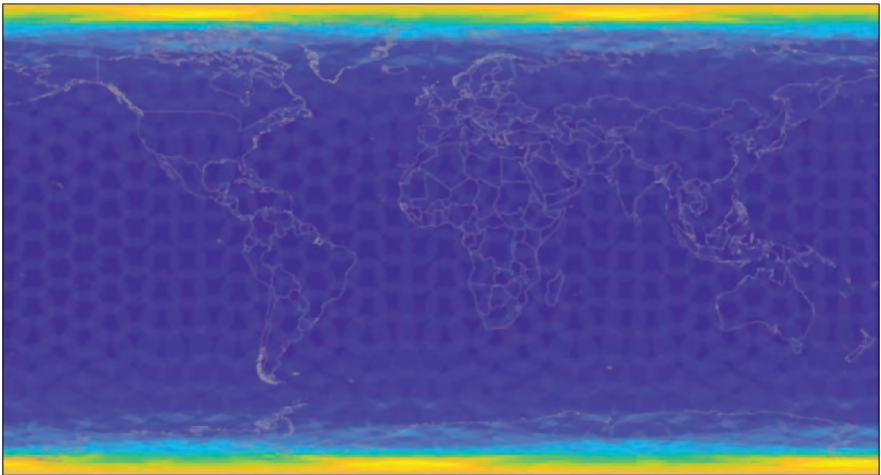
თავი 7. დედამიწის დაბალი ორბიტის თანამგზავრების გამოყენება 6G-ში

7.1. შესავალი

5G კომერციული სისტემების მთელ მსოფლიოში გავრცელებასთან ერთად, მკვლევართა ყურადღება, სხვადასხვა ტექნოლოგიური მიმართულებით, თანდათანობით გადადის 6G სისტემებისკენ. ჩვენ ველით, რომ LEO თანამგზავრების მეგათანავარსკვლავედებთან კომუნიკაცია იქნება კავშირის ერთ-ერთი ახალი გადასალახი რუბიკონი 6G-სკენ მიმავალ გზაზე, რომელიც შეავსებს ტერესტრიალურ ქსელებს ყოვლისმომცველი შეუზღუდავი კავშირის უზრუნველსაყოფად, რაც თავის მხრივ ხელს შეუწყობს „ციფრული უთანასწორობის“ გადალახვას.

LEO არის დედამიწაზე ორიენტირებული ორბიტა, რომლის სიმაღლე ზღვის დონიდან 350-დან 2000 კმ-მდეა. დედამიწის საშუალო ორბიტასთან (MEO) და დედამიწის გეოსტაციონალურ ორბიტასთან (GEO) შედარებით, LEO-ს დედამიწასთან სიახლოვე იწვევს LEO-ს თანამგზავრებთან წვდომის პროცესში ნაკლებ შეყოვნებას, მათი გაშვებისთვის დახარჯულ ნაკლებ ენერგიას და ნაკლებ სიმძლავრეებს სიგნალის გადაცემისთვის თანამგზავრებიდან და თანამგზავრებზე. თუმცა, LEO თანამგზავრები 600 კმ სიმაღლეზე მოძრაობს საკმაოდ მაღალი, დაახლოებით 7.8 კმ/წმ სიჩქარით. LEO თანამგზავრების სწრაფი მოძრაობა და ცალკეული LEO თანამგზავრის შედარებით შეზღუდული დაფარვის არეალი მოითხოვს თანამგზავრების დიდ რაოდენობას, რათა უზრუნველყოფილ იქნას სერვისის მიწოდების უწყვეტობა მოცემული დაფარვის ზონაში. ნახ. 7.1 ასახავს გლობალურ დაფარვას, რომელსაც გვთავაზობს ასობით თანამგზავრისგან შექმნილი LEO თანავარსკვლავედი 600 კმ სიმაღლეზე. ბოლო რამდენიმე წლის განმავლობაში, მსოფლიო მოწმე გახდა კოსმოსური ინტერნეტსერვისებისადმი მზარდი ინტერესის, განსაკუთრებით LEO თანამგზავრების მეგათანავარსკვლავედების მიმართ, როგორცაა SpaceX

Starlink, Amazon Kuiper და OneWeb. ეს ინიციატივები ამზიციურია, მოიცავს ათასობით და ათიათასობით თანამგზავრს და განპირობებულია არატრადიციული, მდიდარი, მაღალტექნოლოგიური მოთამაშეებით. LEO თანამგზავრული წვდომისადმი ინტერესი ადრეც შეიმჩნეოდა. კოსმოსიდან კავშირის უზრუნველყოფის წინადადებების სერია გაიზარდა 1990-იან წლებში, მაგრამ მათი უმეტესობა ვერ განხორციელდა და მხოლოდ რამდენიმეს (მაგალითად, Iridium და Globalstar) ჰქონდა სხვადასხვა დონის წარმატება.



ნახ. 7.1. LEO თანავარსკვლავედის გლობალური დაფარვა ასობით თანამგზავრით 600 კმ სიმაღლეზე (ფერები მიუთითებს დედამიწის თითოეული წერტილისთვის თანამგზავრების რაოდენობაზე მხედველობის არეში. მუქი ლურჯი ფერი აღნიშნავს მხოლოდ ერთ თანამგზავრს მხედველობის არეში. რაც უფრო ღიაა შეფერილობა, მით მეტია თანამგზავრების რაოდენობა მხედველობის არეში)

რამდენიმე ფაქტორმა ხელი შეუწყო LEO თანამგზავრული წვდომისადმი ინტერესის განახლებას. მთავარი ფაქტორია თანამგზავრის გაშვების ღირებულების მნიშვნელოვანი შემცირება, თანამედროვე გამშვები მოწყობილობების შემუშავებასთან ერთად, რომლებიც ხელმეორედ იყენებს რაკეტების ნაწილებს, როგორც ეს გათვალისწინებულია, მაგალითად, SpaceX-ის მიერ. იმავდროულად, უკვე მზა კომერციული

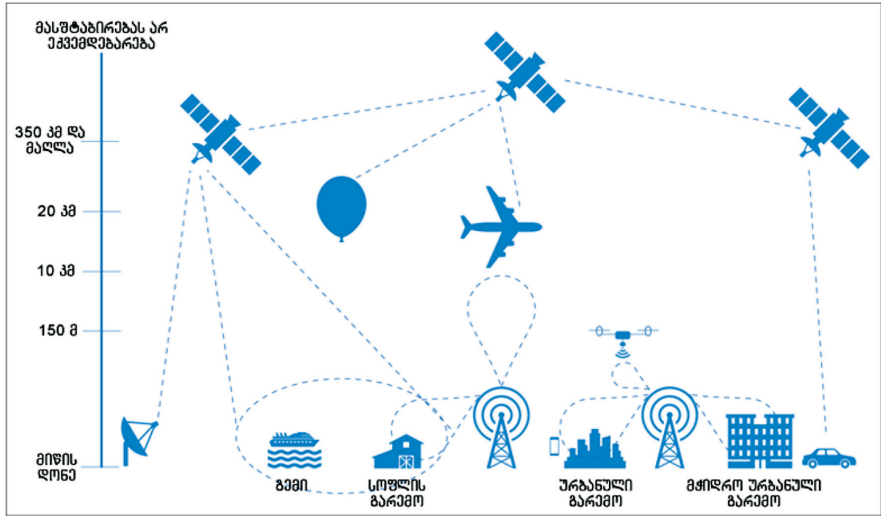
კომპონენტების გამოყენება და თანამგზავრის დიზაინსა და წარმოებაში თანხების დამზოგველი პრინციპების გამოყენება საშუალებას იძლევა დაიწყოს მათი მასობრივი წარმოება უფრო ეფექტიანი სამუშაო ციკლით და შემცირებული დანახარჯებით. ასევე კომერციულად შესაძლებელი გახდა თანამგზავრული კომუნიკაციების მოწინავე ტექნოლოგიების გამოყენება, როგორცაა მრავალწერტილოვანი სხივის ტექნოლოგიები და დახვეწილი ციფრული დამუშავება ბორტზე. კიდევ ერთი მთავარი მამოდრავებელი ძალაა, LEO თანამგზავრულ წვდომაში ინვესტიციების გაზრდის სურვილი, რაც საზოგადოებას დაეხმარება „დააკავშიროს აქამდე დაუკავშირებელი“ და აღმოფხვრას „ციფრული უთანასწორობა“, რაც თავის მხრივ მოტივირებულია კომერციული პოტენციალით, ეკონომიკური განვითარებითა და ჰუმანიტარული მოსაზრებებით.

მე-3 თაობის პარტნიორობის პროექტი მუშაობდა და აგრძელებს მუშაობას 5G სისტემების ადაპტაციაზე თანამგზავრული კომუნიკაციების მხარდასაჭერად. LEO თანამგზავრული წვდომის მხარდასაჭერად მოწინავე 5G იყენებს სისტემების თანდაყოლილ მოქნილობას. პირველი დიზაინის მიზანია 5G ტელეფონების მოწყობილობების დაკავშირება 3GPP-ზე დაფუძნებული თანამგზავრული წვდომის ქსელებით 6 გჰცმდე სიხშირული სპექტრით, რათა 5G კავშირი იყოს უზრუნველყოფილი იმ ადგილებში, სადაც ტერესტრიალური 5G ქსელები მიუწვდომელია. მეორე დიზაინის მიზანია უზრუნველყოს ფართოზოლოვანი კავშირი უფრო მოწინავე მოწყობილობებთან, როგორცაა ძალიან მცირე აპერტურის ტერმინალი (VSAT) ან დედამიწის სადგური მოძრაობაში (ESIM), განსაკუთრებით მაღალ სიხშირეებზე (მაგალითად, Ku/Ka სიხშირულ დიაპაზონებში). პირდაპირი თანამგზავრული წვდომის გარდა, 3GPP ასევე მუშაობდა 5G თანამგზავრული ბექჰოლის ქსელზეც, რამაც შეიძლება ხელი შეუწყოს ფიჭური სერვისების შეთავაზებას ისეთ ადგილებში, სადაც ტერესტრიალური ბექჰოლის საშუალებები არ არის ხელმისაწვდომი ან მათი აშენება ძალიან ძვირი ჯდება.

5G თავდაპირველად მუშავდებოდა მხოლოდ ტერესტრიალური კომუნიკაციებისთვის, LEO თანამგზავრული წვდომის გათვალისწინების გარეშე. ჩვენ ველით, რომ იქნება მხოლოდ სპეციფიკაციების ზომიერი გაუმჯობესებები, რაც მართალია, 5G-ის საშუალებას მისცემს მხარი დაუჭიროს LEO თანამგზავრულ წვდომას, მაგრამ ვერ შეძლებს უზრუნველყოს ფუნქციონირების ოპტიმალური მახასიათებლები. გარდა ამისა, 5G-ის გაფართოებული ფუნქციების უმეტესობა, სავარაუდოდ, მიუწვდომელი იქნება LEO თანამგზავრული წვდომისთვის 5G ეპოქაში. 5G ტერესტრიალური ქსელების ინტეგრაცია LEO თანამგზავრულ წვდომასთან იქნება არასრულყოფილი. ამის საპირისპიროდ, ჩვენ მოველით, რომ ინტეგრაცია უფრო მჭიდრო გახდება 6G-ში, რაც უზრუნველყოფს უწყვეტ მობილურობას ტერესტრიალურ და LEO თანამგზავრული წვდომის ქსელებს შორის. როგორც ნახ. 7.2-ზე ილუსტრირებული, ტერესტრიალური ქსელების მჭიდრო ინტეგრაცია LEO თანამგზავრულ წვდომასთან არსებითი იქნება 6G ეპოქაში გლობალური დაფარვის მისაღწევად. ნახ. 7.2 ასევე ასახავს LEO თანამგზავრული წვდომის ქსელის მთლიან არქიტექტურას, რომელიც შედგება შლიუზისა და თანამგზავრის დამაკავშირებელი ფიდერული ლინკისგან, თანამგზავრისა და ტერმინალის დამაკავშირებელი მომსახურების ლინკისგან, ასევე თანამგზავრებს შორის დამაკავშირებელი ლინკისგან (ISL).

კოსმოსზე დაფუძნებული ინტერნეტსერვისების გარშემო ატეხილი აჟიოტაჟი ხშირად მითებითა და გაუგებრობებით არის გამოწვეული. არსებობს გამოწვევები, დაწყებული ტექნოლოგიებიდან ბიზნესმოდელამდე, მეგათანავარსკვლავედებზე დაფუძნებული LEO თანამგზავრული წვდომის განვითარების მიმართ. ამ თავის მიზანია მიმოიხილოს LEO თანამგზავრული წვდომის კრიტიკული ასპექტები, რათა ნათელი მოჰფინოს ამ სფეროში კვლევებსა და განვითარებას 6G-ის გზაზე. ჩვენ ყურადღებას ვამახვილებთ კონკრეტულად LEO თანავარსკვლავედებზე, მაგრამ უნდა აღინიშნოს, რომ GEO და MEO თანამგზავრულ სისტემებს

(მაგალითად, O3b-ის) ასევე შეუძლიათ არსებითი როლი შეასრულონ კოსმოსური ინტერნეტსერვისების მიწოდებაში სხვადასხვა ტექნიკური შეზღუდვით და კონსტრუქციული კომპრომისით.



ნახ. 7.2. საყოველთაო 6G დაფარვა უზრუნველყოფილი ტერესტრიალური ქსელების მჭიდროდ ინტეგრირებით LEO თანამგზავრულ წვდომასთან

7.2. LEO თანამგზავრული თანავარსკვლავედის ევოლუცია და შესაძლებლობები

აღრეული LEO-ს სამაგალითო სისტემები მოიცავს Iridium-ს და Globalstar-ს, რომელთაგან პირველი თაობები ექსპლუატაციაში შევიდა 1990-იანი წლებიდან. Iridium-ის თანავარსკვლავედი შედგებოდა 780 კმ სიმაღლეზე განთავსებული 77 თანამგზავრისგან (აქედან გამომდინარეობს სახელწოდება Iridium, პერიოდული სისტემის ქიმიური ელემენტი, რომლის ატომური ნომერია 77). Globalstar-ის თანავარსკვლავედი შედგება 48 თანამგზავრისგან, რომლებიც განთავსებულია დაახლოებით 1400 კმ სიმაღლეზე. ორივე თანამგზავრული სისტემა შექმნილია იმისთვის, რომ მოემსახუროს ტელეფონის სპეციფიკურ ტერმინალებს მეორე თაობის (2G) მობილური სერვისებით, როგორცაა სატელეფონო ზარები

და მონაცემთა მოკლე შეტყობინებები, მონაცემთა გადაცემის სიჩქარით 14.4 კბიტი/წმ-მდე. საინტერესოა, რომ თანამგზავრების საბორტო შესაძლებლობები საკმაოდ განვითარებული იყო იმ პერიოდისთვის, განსაკუთრებით Iridium-სთვის, რადგან თითოეული კოსმოსური ხომალდი აღჭურვილი გახლდათ ოთხი ISL-ით, რომლებიც მხარს უჭერდა კომუნიკაციას მეზობელ თანამგზავრებთან მონაცემთა გადაცემის სიჩქარით 10 მბიტი/წმ, მაღალსიჩქარიანი პროცესორებით ხმოვანი და მონაცემთა კავშირების მარშრუტიზაციისთვის.

მრავალი მიზეზის გამო (როგორც ტექნიკური, ასევე კომერციული), 1990-იან წლებში გამოშვებული LEO სისტემები არ იყო ისეთი წარმატებული, როგორც ეს მოსალოდნელი გახლდათ, რადგან ისინი უზრუნველყოფდა მხოლოდ ხმოვან და მონაცემთა კავშირს UE-ების შეზღუდულ რაოდენობასთან. მაგრამ ცვლილებების ქარმა დაუბერა 5G გამოყენების შემთხვევების ფართო სპექტრისა და ბაზრის ახალი შესაძლებლობების წყალობით. აღორძინდა ინტერესი LEO თანამგზავრების მეგათანავარსკვლავედების გამოყენებასთან დაკავშირებით, კოსმოსიდან კავშირის უზრუნველსაყოფად. ზოგიერთი ახალი თანავარსკვლავედი, როგორცაა: OneWeb, Starlink, AST SpaceMobile, Amazon Kuiper და TeleSat გეგმავს ასობით ან ათასობით კოსმოსური ხომალდის გაშვებას გლობალური კავშირის უზრუნველსაყოფად და არსებული ტერესტრიალური ქსელის ინფრასტრუქტურის შესავსებად.

ამ ახალი მეგათანავარსკვლავედების დიზაინი განპირობებულია მათი მიზნობრივი გამოყენების დანიშნულებით და ბაზრის შესაბამისი სეგმენტით. მობილური თანამგზავრული სერვისებისთვის 6 გჰც-ის ქვემოთ გამოყოფილი ხელმისაწვდომი სპექტრის შესაბამისად, LEO თანამგზავრული სისტემა ძირითადად ფოკუსირებული იქნება IoT მოწყობილობებსა და მომსახურებებზე მონაცემთა გადაცემის დაბალი და საშუალო სიჩქარით პირდაპირ პორტატიულ ტერმინალებზე. რაც შეეხება თანამგზავრულ სპექტრს მაღალ სიხშირეებზე (მაგალითად, Ku/Ka დია-

პაზონებში), ახალი LEO თანამგზავრული თანავარსკვლავედები მიზნად ისახავს ფართოზოლოვან კავშირს უფრო მოწინავე მოწყობილობებთან, როგორცაა VSAT ან ESIM.

LEO-ს თანამგზავრის სასარგებლო დატვირთვის მნიშვნელობა გაზომილი უნდა იყოს საშუალო მიზნობრივი ტრაფიკის მიხედვით, მაგრამ პლატფორმის ხელმისაწვდომი სიმძლავრე ხშირად ქმნის შეზღუდვას. ეს მოითხოვს აკუმულატორის შემუშავების გონივრული საშუალებების გამოყენებას, როდესაც ტრაფიკი დაბალია (მაგალითად, ოპერაციული ფუნქციების უმეტესობის გამორთვას პოლუსებზე და ოკეანეებზე, მზის პანელებით შემუშავების ფაზის მაქსიმალურად გაზრდის მიზნით). ISL-ების დანერგვამ შეიძლება შეამციროს შლიუხების საერთო რაოდენობა მიწაზე, მინიმუმამდე დაიყვანოს ინფრასტრუქტურული და საექსპლუატაციო ხარჯები და მოემსახუროს ოკეანეებს.

ტექნოლოგიური შეზღუდვები და დიზაინის პარამეტრები ორ განსხვავებულ სპექტრულ დიაპაზონში (ანუ 6 გჰც-მდე და უფრო მაღალი სიხშირეებზე, მაგალითად, Ku/Ka დიაპაზონებში) განსხვავებულია. თანამგზავრის სასარგებლო დატვირთვის დაპროექტება, რომელიც მოიცავს ორივე სპექტრულ დიაპაზონს, უახლოეს მომავალში განიხილება არამიზანშეწონილად. შემდგომში, ჩვენ აღვწერთ თანამგზავრის სასარგებლო დატვირთვის დაპროექტების უფრო კონკრეტულ ასპექტებს, როგორც დამოკიდებულს არჩეულ სიხშირულ დიაპაზონზე.

6 გჰც-ზე დაბალი სიხშირეების გამოყენების შემთხვევაში, UE-ზე ზემოქმედების მინიმუმამდე შემცირების მიზნით, კოსმოსში შედარებით დიდი საანტენო სისტემის გამოყენება არის პირველი მნიშვნელოვანი ტექნოლოგია, რაც საშუალებას იძლევა შემოგვთავაზოს აპლინკისა და დაუნლიკის შესადარებელი მიღებული სიმძლავრეები მიზნობრივი მოწყობილობებისთვის. მეორე მხრივ, მიუხედავად იმისა, რომ VSAT და ESIM მოწყობილობებს შეუძლია უზრუნველყოს უფრო მაღალი გადაცემის სიმძლავრე და ანტენის გაძლიერების კოეფიციენტი უფრო მაღალ სიხში-

რეებზე, ვიდრე ეს შეეძლო ჩვეულებრივ მასობრივი მოხმარების პორტატიულ მოწყობილობებს, გამოწვევები კოსმოსში არ მცირდება. კერძოდ, მიწაზე დივერსიფიცირებული, არაერთგვაროვანი ტრაფიკის მოთხოვნის დასაკმაყოფილებლად და მოძრავ პლატფორმაზე (მაგალითად, გემები, თვითმფრინავები) ან სახურავზე დამაგრებული მოწყობილობების (მაგალითად, საყოფაცხოვრებო) უკეთ ფუნქციონირების მიზნით, თანამგზავრის სასარგებლო დატვირთვამ გარანტირებულად უნდა უზრუნველყოს კოსმოსური რესურსების ეფექტიანი და მოქნილი გამოყენება, ისევე როგორც ეკონომიურობა, წარმოებისა და ინტეგრაციის მცირე ხარჯები.

ტექნოლოგიური მზადყოფნის დონე მრავალი ტექნოლოგიის განმხორციელებლისთვის საკმაოდ მაღალია. მართლაც, Starlink-ს უკვე აქვს 1600-ზე მეტი LEO თანამგზავრი ორბიტაზე და ის მზადაა კონკრეტული საპროექტო მოთხოვნებისთვის. მაგალითად, ბორტზე გამოყენებადი აქტიური ანტენების ტექნოლოგიები (რითაც აღჭურვილია Starlink-ის თანამგზავრი) ახლა ხელმისაწვდომია და მათ აქვთ ინდივიდუალურად ფორმირებადი, მართვადი სხივები. Starlink-ის თანამგზავრზე სხივების რაოდენობა კონფიგურირებადია და შეიძლება მერყეობდეს 8-დან 32-მდე. მაგრამ შემდეგი თაობის LEO მეგათანავარსკვლავედებმა შესაძლოა მოითხოვოს უფრო დიდი საანტენო მესრები ან ანტენების ელემენტების შედარებით დიდი რაოდენობა, რაც თავის მხრივ მოითხოვს შემდგომ ოპტიმიზაციას და ინტეგრაციას სასარგებლო დატვირთვაში.

ცოტა ხნის წინ, ჩატარდა 5G მოთხოვნების დეტალური ანალიზი სამომავლო თანამგზავრული სისტემების დიზაინის კუთხით. ზოგიერთი ძირითადი ხელშემწყობი ტექნოლოგიური ასპექტი დაკავშირებულია ისეთი ახალი კოსმოსური დანიშნულების რადიოსიხშირული და მიკროტალღური კომპონენტების მიწოდებასთან, როგორიცაა გალიუმ-ნიტრიდის (GaN) და სილიციუმ-გერმანიუმის (SiGe) ტექნოლოგიებზე დაფუძნებული მაღალი ეფექტიანობის სიმძლავრის გამაძლიერებლები, რომლებმაც RF სტრუქტურების ხარჯების მიხედვით ეფექტიანი ინტეგრაცია

უნდა უზრუნველყოს. სხვა მოწინავე ტექნიკა, როგორცაა სრულად ციფრული სხივის ფორმირება და სხივის ნახტომისებრი გადართვის სქემები, ასევე მნიშვნელოვანი ფაქტორებია, რომლებიც გასათვალისწინებელია თანამგზავრული სასარგებლო დატვირთვის დაპროექტების ოპტიმიზაციისთვის, როგორც სიმძლავრის, მასის და ხელმისაწვდომი ღირებულების ბიუჯეტის ფუნქცია კონკრეტული მიზნობრივი მომსახურებისა და ტრაფიკის მოთხოვნისთვის.

შემდეგი თაობის სასარგებლო დატვირთვის არქიტექტურები გამოიყენებენ აქტიურ ანტენებსა და საბორტო ციფრულ პროცესორებს, რათა უზრუნველყოფილ იქნას უაღრესად დინამიკური მოქნილობა გადამტანი სიხშირეების, თითოეულ გადამტანზე სიხშირის გატარების ზოლის და თითოეულ სხივზე გამოყოფილი სიმძლავრეების შესაცვლელად, და გათვალისწინებულია სხივების განლაგების შეცვლაც კი, როგორც თითქმის მყისიერად, ისევე ერთობლივად, სხივის გადახტომის მეთოდებთან ერთად. ეს ნიშნავს, რომ რადიორესურსების მართვის სისტემა უნდა გაუმკლავდეს თავისუფლების მრავალ ხარისხს უაღრესად შეზღუდულ გარემოში, რათა სისტემურ დონეზე აღმოაჩინოს რესურსების შესაძლო საუკეთესო განაწილება. გასათვალისწინებელია, რომ თანამგზავრებისგან შედგენილი სისტემის დინამიკურობის გამო, რომლებიც მოძრაობს დედამიწის და ერთმანეთის მიმართ, ყოველი განაწილების სქემა საჭიროებს ხელმეორე გამოთვლას თითქმის ყოველ ჯერზე. შესაბამისად, რადიორესურსების მართვის ახალი ალგორითმები მნიშვნელოვან როლს ასრულებს LEO თანავარსკვლავედის ეფექტიანობაში.

7.3. LEO თანამგზავრული წვდომის ძირითადი ტექნიკური გამოწვევები და გადაწყვეტილებები

LEO თანამგზავრული წვდომის ძირითადი გამოწვევები წარმოიქმნება გამოდინარე LEO თანამგზავრების სწრაფი გადაადგილებიდან, რაც იწვევს გავრცელებისას დროში ცვალებად შეფერხებებს, დროში

ცვალებად დოპლერის დიდ წანაცვლებებს და ფიჭების სპეციფიკურ სტრუქტურებს (კვაზი-დედამიწური ფიქსირებული ან მოძრავი ფიჭები). ამ პარაგრაფში ჩვენ განვიხილავთ ამ გამოწვევების მთავარ გადაწყვეტილებებს.

დასაწყისისთვის, ცხრილში 7.1, ჩვენ ვაჯამებთ პარამეტრებს LEO თანამგზავრებისთვის, რომლებიც მუშაობს S სიხშირულ დიაპაზონში (ანუ 2 გჰც სიხშირეებზე) და 600 კმ სიმაღლეზე, 3GPP-ის ტექნიკური ანგარიშების TR 38.821-ის და TR 36.673-ის მიხედვით. ჩვენ ვხედავთ, რომ LEO თანამგზავრს, რომელიც მიმართულია პორტატიულ UE-ებზე (მაგალითად, სმარტფონებზე) აქვს ეფექტიანი იზოტროპულად გასხივებული სიმძლავრის (EIRP) სიმკვრივის და ანტენის გაძლიერების კოეფიციენტის და ხმაურის ტემპერატურის ფარდობის (G/T) შედარებით მაღალი მნიშვნელობები. LEO თანამგზავრის სწრაფმა მოძრაობამ 600 კმ სიმაღლეზე შეიძლება გამოიწვიოს 24 ppm-ის (ანუ 24 ნაწილის მილიონზე) რიგის დოპლერის დიდი წანაცვლება. ეს შეესაბამება ± 48 კჰც-ს 2 გჰც გადამტან სიხშირეზე. დოპლერის წანაცვლება უფრო დიდია, ვიდრე ტიპური UE ოსცილატორის საწყისი უზუსტობა, რომელიც დაახლოებით ტოლია 10 ppm-ის. სიხშირული შეცდომა, რომელსაც UE აღიქვამს დაუნლინკში, არის დოპლერის წანაცვლების და სიხშირის წანაცვლების კომბინაცია (კრისტალური/კვარცული ოსცილატორის შეუსაბამობის გამო). სინქრონიზაციის სიგნალების გამოყენებით, UE-ს შეუძლია დაუნლინკში მიიღოს დროითი და სიხშირული სინქრონიზაცია, მიუხედავად კომბინირებული სიხშირული შეცდომისა. თუმცა, ერთსა და იმავე ფიჭაში UE-ებს შეიძლება ჰქონდეს თავისი ადგილობრივი საყრდენი სიხშირეები მნიშვნელოვნად განსხვავებულ სიხშირეებზე დოპლერის სხვადასხვა წანაცვლებების გამო. თუ დაუნლინკის სიგნალის სიხშირე გამოიყენება, როგორც საყრდენი სიხშირე აპლინკისათვის, სხვადასხვა UE-ის აპლინკის სიგნალები იქნება სიხშირის მიხედვით წანაცვლებული მიმდებ ქსელურ კვანძში. სიხშირის ეს წანაცვლება გამოიწვევს აპლინკის ორთოგონალურ-

რობის დაკარგვას რადიოწვდომის სისტემაში, რომელიც იყენებს მრავალჯერად წვდომას ორთოგონალური სიხშირული დაყოფით (OFDMA) და რომელიც წარმოადგენს უმეტესად გამოყენებულ მრავალჯერადი წვდომის სქემას თანამედროვე უსადენო სისტემებში.

დაინტერესებულ მკითხველებს მივუთითებთ 3GPP TR 38.821 და TR 36.673 დოკუმენტებზე, სადაც მოყვანილია ლინკის ბიუჯეტის ყოვლისმომცველი ანალიზის და სხვადასხვა სცენარში სხვადასხვა ტიპის თანამგზავრისთვის (რომლებიც განსხვავდება გადაცემის სიმძლავრით, ანტენის გაძლიერების კოეფიციენტით და ა.შ.) მიღებული შედეგები სხვადასხვა ტიპის მოწყობილობებისთვის, სხვადასხვა სიხშირული დიაპაზონისთვის, სხვადასხვა სიმაღლისთვის და ა.შ.

თანამგზავრის პარამეტრების მაგალითი	LEO თანამგზავრი დამიზნებულსა IoT მოწყობილობაზე	LEO თანამგზავრი დამიზნებულს აორბიტარულ UE-ებზე
თანამგზავრული ანტენის აპერტურის ეკვივალენტური დიამეტრი	0.4 მ	2 მ
თანამგზავრის EIRP-ის სიმკვეთე	28.3 დბტ/მკვ	34 დბტ/მკვ
თანამგზავრის Tx/Rx მძს. ანტენის გაძლიერება	16.2 დბი	30 დბი
3 დბ სხივის სიგანე	22.1 გრადუსი	4.4 გრადუსი
G/T	-12.8 დბ/კ	1.1 დბ/კ
სხივის დიამეტრი ნადირზე ¹	234 კმ	46 კმ

¹ სხივის დიამეტრი გამოითვლება 3 დბ სხივის სიგანის დაშვებით

ცხრილი 7.1. პარამეტრების მაგალითი LEO თანამგზავრებისთვის, რომლებიც ფუნქციონირებენ S სიხშირულ დიაპაზონში და 600 კმ სიმაღლეზე

აპლინკში სიხშირის მიმართ წანაცვლებული გადაცემებით შექმნილი პრობლემის გადასაჭრელად, საჭიროა სიხშირის კორექციის სხვადასხვა მნიშვნელობები სხვადასხვა UE-სთვის, რათა კომპენსირდეს მათი შესაბამისი დოპლერის წანაცვლებები თანამგზავრის მოძრაობის გამო. ანალოგიურად, საჭიროა აპლინკის გადაცემის დროების გათანაბრება სხვადასხვა UE-ში დროითი წინსწრების მნიშვნელობების გამოყენებით,

რათა კომპენსირდეს მათი გავრცელების სხვადასხვა შეფერხება (რამდენიმე მილიწამიდან ათეულ მილიწამამდე LEO თანამგზავრული წვდომისთვის) საწყისი შემთხვევითი წვდომის დროს, ასევე დაკავშირებულ რეჟიმში აპლინკში მონაცემთა გადაცემისას. შემდეგ მთავარი კითხვაა, როგორ განვსაზღვროთ შესაბამისი სიხშირული კორექცია და დროითი წინსწრება UE-ში?

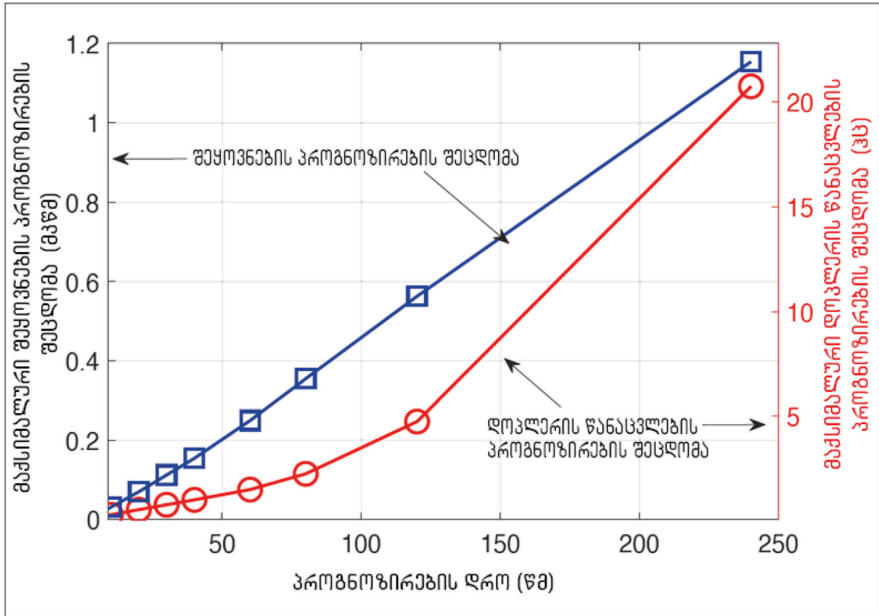
ერთ-ერთი გამოსავალი, რომელიც სტანდარტიზებულია 3GPP-ში, არის UE-ის აღჭურვა გლობალური სანავიგაციო თანამგზავრული სისტემის (GNSS) მიკროსქემების კომპლექტით. ამრიგად, UE-ს შეუძლია განსაზღვროს თავისი პოზიცია, სიჩქარე და გადაადგილების მიმართულება. LEO თანამგზავრული წვდომის ქსელს შეუძლია გადასცეს თანამგზავრის ეფემერთან დაკავშირებული მონაცემები, რომლებიც მოიცავს ინფორმაციას მომსახურე თანამგზავრის პოზიციის, სიჩქარისა და გადაადგილების მიმართულების შესახებ. თანამგზავრული ორბიტა შეიძლება სრულად იყოს აღწერილი რამდენიმე პარამეტრის გამოყენებით სხვადასხვა წარმოდგენით. თანამგზავრისა და UE-ს ცნობილი პოზიციით, სიჩქარითა და გადაადგილების მიმართულებით, UE-ს შეუძლია განსაზღვროს დაუნლინკის და აპლინკის დოპლერის წანაცვლება და სერვისის ლინკში გავრცელების შეფერხება. შეფასებებზე დაყრდნობით, საწყის წვდომამდე, UE-ს შეუძლია დააკორექტიროს თავისი აპლინკის სიხშირე და გამოიყენოს დროითი წინსწრება აპლინკის გადაცემაში, რაც ხელს უწყობს აპლინკში მრავალჯერადი წვდომის ორთოგონალურობის მიღწევას. მომსახურე LEO თანამგზავრის მოძრაობა მოითხოვს, რომ UE-მ მუდმივად თვალყური ადევნოს საჭირო დროით წინსწრებას და სიხშირის კორექციას. LEO თანამგზავრისთვის, რომელიც მიზნად ისახავს IoT კავშირს (იხ. ცხრილი 7.1), ერთი მიმართულებით შეყოვნების დრიფტი და დოპლერის წანაცვლების დრიფტი შეიძლება იყოს შესაბამისად 46 მკწმ/წმ-მდე და 641 ჰც/წმ-მდე, რაც უფრო მეტია, ვიდრე მათი LEO თანამგზავრული ანალოგებისთვის, რომლებიც განკუთვნილია პორტატიული

UE-ებისთვის და ეს ხდება სხვის უფრო დიდი ზომის გამო. მაშასადამე, UE-ს სჭირდება თანამგზავრის პოზიციის, სიჩქარის, გადადგილების მიმართულების, გავრცელების შეფერხებისა და დოპლერის წანაცვლების წინასწარი განსაზღვრა დროის ისეთ მომენტში, რომელიც განსხვავდება თანამგზავრის ეფემერთან დაკავშირებული ეტალონური დროისგან.

თანამგზავრის ტრაექტორიის გამოთვლაზე დაფუძნებული პროგნოზი, ზოგადად, გამოყენებული ეფემერის მონაცემების ასაკის მატებასთან ერთად უარესდება სხვადასხვა მიზეზის გამო, მათ შორის ატმოსფერული წნევის, თანამგზავრის მანევრირების, გამოყენებულ ორბიტალურ მოდელებში არსებული ნაკლოვანებების და ა.შ. ნახ. 7.3 გვიჩვენებს, რომ თანამგზავრის პოზიციის, სიჩქარისა და გადადგილების მიმართულების პროგნოზირება შესაძლებელია მაღალი სიზუსტით, რათა განვსაზღვროთ საჭირო დროითი წინსწრება და მოვახდინოთ სიხშირის კორექტირება დროის მიხედვით, ათობით წამით ან შესაძლოა, წუთებით ადრე. მაგალითად, 60 წამით ადრე პროგნოზირებისთვის, თანამგზავრი-UE შეყოვნების მაქსიმალური რადიალური შეცდომა და დოპლერის წანაცვლების შეცდომა არის შესაბამისად 0.08 მწმ და 4.8 ჰც. ეს იძლევა საკმარის სიზუსტეს დეტექტირებისა და დემოდულაციის ადეკვატური მახასიათებლებისთვის, რაც იმყოფება OFDM მეთოდში გამოყენებული სიგნალის ციკლური პრეფიქსის (მაგალითად, 4.7 მწმ) და აპლინკში გადაცემაზე არსებული მოთხოვნის ± 0.1 ppm ფარგლებში (მაგალითად, ± 200 ჰც 2 გჰც-ზე).

მობილურობის მართვა განიხილავს UE-ებს უმოქმედო რეჟიმში და UE-ებს დაკავშირებულ რეჟიმში. უმოქმედო რეჟიმის მობილურობა მოიცავს ფიჭების არჩევას, მის ხელმეორე არჩევას, თვალყურის დევნებას და პეიჯინგს, ხოლო დაკავშირებული რეჟიმის მობილურობა ძირითადად ჰენდოვერს ეხება. ტერესტრიალურ ქსელებში ფიჭები ფიქსირებულია, ხოლო UE-ები შეიძლება იყოს მობილური სხვადასხვა ტრაექტორიით. ამის საპირისპიროდ, ფიჭები მოძრაობს LEO თანამგზავრული წვდომის

ქსელებში, რაც იწვევს UE-ების მომსახურე ფიჭების ცვლილებას რამდენიმე წამიდან (დედამიწაზე მოძრავი ფიჭებისთვის) რამდენიმე წუთამდე (კვაზი-დედამიწური ფიქსირებული ფიჭებისთვის). ეს მოითხოვს ტერესტრიალურ ქსელებში გამოყენებული მობილურობის მართვის პროცედურების გადახედვას.



ნახ. 7.3. შეფენების პროგნოზირების სიზუსტის და დოკუმენტის წანაცვლების პროგნოზირების სიზუსტის დროზე დამოკიდებულება LEO თანამგზავრისთვის, რომელიც ფუნქციონირებს S სიხშირულ დიაპაზონში და 600 კმ სიმაღლეზე

მობილურობის მართვის გასაადვილებლად, UE-ები ასრულებს მომსახურე და მეზობელი ფიჭების გაზომვებს. LEO თანამგზავრული ფიჭები დროის მიხედვით მოძრაობს პროგნოზირებადი გზით, როგორც ეს ახასიათებს თანამგზავრის ეფემერის მონაცემებს. UE-ს შეუძლია გამოიყენოს ეფემერის მონაცემები დროის მიხედვით, LEO თანამგზავრების ტრაექტორიის პროგნოზირებისთვის და შესაბამის დროის მომენტებში გაზომვების შესასრულებლად. ეს მიდგომა სტანდარტიზებულია 3GPP-

ში. გაზომვის შედეგებით UE-ს შეუძლია განახორციელოს ფიჭის არჩევა, ხელმეორე არჩევა უმოქმედო რეჟიმში და შემდეგ შეატყობინოს შედეგები ქსელს, რათა დაეხმაროს ჰენდოვერის მართვას დაკავშირებულ რეჟიმში.

ქსელს სჭირდება UE-ის თვალყურის დევნება უმოქმედო რეჟიმში, რათა შეძლოს UE-ის სწრაფი პეიჯინგი. ამ მიზნით, ქსელი UE-ს აწვდის თვალყურის დევნების არეალების სიას. თუ UE გადადის ისეთ ადგილზე, რომელიც არ ეკუთვნის მოწოდებულ სიაში თვალყურის დევნების არე ერთ არეალს, მან ეს უნდა აცნობოს ქსელს თვალყურის დევნების არეალის განახლების მეშვეობით. LEO თანამგზავრული წვდომის ქსელში დედამიწაზე მოძრავი ფიჭებით, თუ თვალყურის დევნების არეალები თანამგზავრებთან ერთად მოძრაობს, სტაციონარულ UE-ს მოუწევს განაგრძოს თვალყურის დევნების არეალის განახლებების შესრულება უმოქმედო რეჟიმში, რაც გამოიწვევს მნიშვნელოვან სასიგნალო გადატვირთვას. ერთ-ერთი გადაწყვეტა, რომელიც სტანდარტიზებულია 3GPP-ში, არის თვალყურის დევნების იმ არეალების განსაზღვრა, რომელიც უნდა დაფიქსირდეს მიწაზე მათი რადიოფიჭებიდან გამოყოფის მიზნით.

LEO თანამგზავრული წვდომის ქსელში, UE-ებს დაკავშირებულ რეჟიმში შეიძლება დასჭირდეს ხშირი ჰენდოვერი. პირობითი ჰენდოვერი შეიძლება გამოყენებულ იქნას სიგნალების შესამცირებლად და საიმედოობის გაზრდისთვის. პირობითი ჰენდოვერის გამოყენებისას, ქსელი UE-ს უგზავნის ჰენდოვერის შესახებ ბრძანებას გარკვეული პირობით. UE ინახავს ბრძანებას და იყენებს მას, როდესაც ეს პირობა დაკმაყოფილებულია. შემდეგ UE ახორციელებს ჰენდოვერს და უკავშირდება მიზნობრივ ფიჭას. ჰენდოვერის უფრო ადაპტირებული პირობები შეიძლება დაინერგოს LEO თანამგზავრული წვდომის ქსელის კონტექსტში, როგორც მითითებულია 3GPP-ში. სამაგალითო პირობებით შეიძლება გამოვიყენოთ ინფორმაცია UE-ის მდებარეობის, თანამგზავრის ეფემერის და თითოეული LEO თანამგზავრის მომსახურების ხანგრძლივობის შესახებ კონკრეტულ არეალში.

7.4. სტანდარტიზაციის ასპექტები

ამჟამად მოქმედი თანამგზავრული ქსელების უმეტესობა იყენებს რადიოწვდომის ტექნოლოგიას, რომელიც დაფუძნებულია ევროპის სატელეკომუნიკაციო სტანდარტების ინსტიტუტის (ETSI) განსაზღვრულ სტანდარტებზე, როგორცაა ციფრული ვიდეომაუწყებლობა (DVB) ან GEO-მობილური რადიოინტერფეისი, მრავალ კერძო რადიოპროტოკოლთან ერთად. არცერთი ეს სტანდარტი არ იყო საკმარისი იმისათვის, რომ უზრუნველყოფილიყო სისტემების მომწოდებლებს შორის საექსპლუატაციო თავსებადობა და ამიტომ, მათ არ მიგვიყვანეს მდგრად ეკოსისტემამდე. ამის საპირისპიროდ, ტერესტრიალურმა მობილურმა ქსელებმა მნიშვნელოვნად ისარგებლეს საერთაშორისო სტანდარტიზაციის ძალისხმევით, რომელსაც ხელმძღვანელობდა 3GPP ბოლო ორი ათწლეულის განმავლობაში. შედეგად მივიღეთ აყვავებული გლობალური მობილური ეკოსისტემა კარგად მოქმედი სისტემებით, პროდუქტებით და სერვისებით.

მისი თანდაყოლილი დიზაინის მოქნილობის წყალობით, 5G ქმნის უნიკალურ შესაძლებლობას თანამგზავრული კომუნიკაციების მხარდასაჭერად. 3GPP რეკომენდაციებში, თანამგზავრული წვდომის წყალობით განისაზღვრება თანამგზავრული კომუნიკაციების გლობალური სტანდარტი. ის კარს უღებს 5G ეკოსისტემებში თანამგზავრული კომპონენტების ინტეგრირებას, რაც ხელს შეუწყობს 5G სერვისების მიწოდებას, განსაკუთრებით კი ფიჭური დაფარვის მიღმა არსებულ ადგილებში. თანამგზავრული კომუნიკაციების მემკვიდრეობით მიღებულ ღირებულებებთან შედარებით, ეს 3GPP-ზე დაფუძნებული სტანდარტი ხელს შეუწყობს სმარტფონებისა და IoT მოწყობილობების განვითარებას მობილურობითა და მრავალკავშირიანი შესაძლებლობებით თანამგზავრულსა და ფიჭურ წვდომას შორის, რაც საშუალებას მოგვცემს განვახორციელოთ:

- თანამგზავრული და ფიჭური წვდომის იდეალური შეხამება საბოლოო მომხმარებლებისთვის;

- კოსმოსურ სეგმენტში მრავალი მომწოდებლის მიერ შემოთავაზებული თანამგზავრული საკომუნიკაციო სისტემების განთავსება და ექსპლუატაცია ქსელის ინფრასტრუქტურასა და ტერმინალების მომწოდებლებს შორის კავშირის გაწყვეტის შემთხვევაში;
- ხარჯების შემცირება 3GPP ეკოსისტემაში ინტეგრაციის გზით, რომელიც ორიენტირებულია გლობალურ ბაზარზე და ხელს უწყობს მასშტაბების ხარჯზე ეკონომიას;
- ყველა 5G ფუნქციის სისტემაში ჩადებული მხარდაჭერა (მაგალითად, ფენებად დანაწევრება, ენერჯის დაზოგვა, მობილურობა, მესამე მხარის ქსელის მართვა და აპლიკაციებისა და სერვისების პლატფორმები).

წარმოდგენილი იყო რამდენიმე 3GPP ინიციატივა არატერესტრიალურ ქსელებთან (NTN) დაკავშირებით, სადაც LEO თანამგზავრული წვდომა არის მთავარი კომპონენტი. ინიციატივები მოიცავს მრავალ სფეროს, დაწყებული რადიოწვდომის ქსელის სერვისებით და სისტემური ასპექტებით დამთავრებული ძირითადი ქსელით და ტერმინალებით.

3GPP-ის სისტემური ასპექტების სამუშაოები ეხება როგორც თანამგზავრულ წვდომას 3GPP-ზე დაფუძნებული რადიონტერფეისით, ასევე თანამგზავრულ ბექჰოლს, რომლის რადიონტერფეისი შეიძლება იყოს, ან არ იყოს 3GPP-ზე დაფუძნებული. 3GPP RAN ადაპტირებულია ვიწროზოლოვან IoT-თან (NB-IoT) და მანქანური ტიპის კომუნიკაციის LTE-სთან, თანამგზავრული წვდომის მხარდასაჭერად. მუშაობის ეს მიმართულება ცნობილია როგორც IoT NTN, რომელიც შეიმუშავებს იაფფასიან IoT მოწყობილობებს მომსახურების დაბალი სიჩქარის მოთხოვნებით. 3GPP RAN ასევე ავითარებს 5G NR-ის რადიონტერფეისს თანამგზავრული წვდომისთვის სუბ-6 გჰც-ზე და უფრო მაღალ სიხშირეებზე. ოპერაცია სუბ-6 გჰც-ზე მიზნად ისახავს შენობებს გარეთ კავშირის უზრუნველყოფას უშუალოდ პორტატიულ მოწყობილობებთან, ხოლო უფრო მაღალ

სიხშირებზე მუშაობა მიზნად ისახავს დაკავშირებას VSAT ტერმინალებთან ან ESIM ტერმინალებთან.

6G-სკენ მიმავალ გზაზე, ჩვენ მოველით, რომ სტანდარტიზაცია კვლავც გადამწყვეტი იქნება თანამგზავრული საკომუნიკაციო სისტემების წარმატებისთვის, მათ შორის LEO თანამგზავრული წვდომისთვის. 3GPP მუდმივად მუშაობს 5G ევოლუციაზე და უახლოეს ხანში დაიწყებს მუშაობას 6G-ზე. მოსალოდნელია, რომ თანამგზავრული მრეწველობა გააგრძელებს სტანდარტიზაციის ძალისხმევას 3GPP-ში, რათა ხელი შეუწყოს თანამგზავრების ინტეგრაციას 5G-ის ევოლუციასა და 6G სისტემებში, რაც აისახება 3GPP-ის შემდგომ გამოშვებებში. მუდმივი ძალისხმევა ხელს შეუწყობს ახალი ფუნქციების დანერგვას მუშაობის გასაუმჯობესებლად და ახალი შესაძლებლობების უზრუნველსაყოფად.

7.5. თანამგზავრული მომსახურება და ბიზნესასპექტები

უახლოეს წლებში ჩვენ ვიხილავთ მაღალი გამტარუნარიანობის თანამგზავრების რაოდენობის განსაცვიფრებელ ზრდას. Ka, Ku და V დიაპაზონების სპექტრისა და გიგაჰერცის სიგანის სიხშირის გატარების ზოლის გამოყენებით, LEO თანამგზავრული ტექნოლოგიის მიერ შეიძლება შემოთავაზებულ იყოს სიჩქარეები, რომლებიც შედარებადია ტერესტრიალურ LTE სერვისებთან, ისეთი მოწყობილობების დასაკავშირებლად, როგორცაა VSAT და ESIM ფიქსირებული ფართოზოლოვანი კავშირით მომსახურებისთვის. თუმცა, ასეთი LEO-ზე დაფუძნებული ფიქსირებული ფართოზოლოვანი კავშირის სერვისები საჭიროებს მოწყობილობებს, რომლებიც აღჭურვილია შეკვეთით დამზადებული ბრტყელი პანელური ან პარაბოლური ანტენებით, მაღალი გამძლეობის კოეფიციენტით და სხივის თვალყურის დევნების შესაძლებლობებით. ამ მოწყობილობების ღირებულებასა და მუშაობასთან დაკავშირებული პრობლემების გადაჭრა, სავარაუდოდ, ისეთივე დიდი ტექნიკური გამოწვევაა, როგორც თანამგზავრთა თანავარსკვლავედების დაჯგუფებების

გაცვანა ორბიტაზე. იმ ადგილებში, სადაც არის ბოჭკოვანი ან მაღალსიჩქარიანი კაბელი, მათ არ შეუძლიათ კონკურენციის გაწევა, მაგრამ ამ ტერიტორიებს მიღმა, LEO ქსელები, რომლებიც გვთავაზობს ფიქსირებულ ფართოზოლოვან კავშირს, სავარაუდოდ, კონკურენტუნარიანია ასევე მომსახურების უფრო სწრაფი დროის გათვალისწინებით.

3GPP-ზე დაფუძნებული 5G და მომავალი 6G ტექნოლოგიები ალბათ შექმნის ღია გარემოს, სადაც მოწყობილობებს შეუძლია 3GPP-ზე დაფუძნებულ მობილურ ფართოზოლოვან თანამგზავრულ სისტემებთან დაკავშირება. ჩვენ ველით, რომ რამდენიმე წლის განმავლობაში ხელმისაწვდომი იქნება NTN-ით მხარდაჭერილი 5G მოწყობილობების დიდი რაოდენობა, რაც ძირითადად მიიღწევა შესაბამის მიკროსქემებში პროგრამული უზრუნველყოფის განახლებით და საჭირო სიხშირული ზოლების მხარდაჭერით. 6G-სკენ მიმავალ გზაზე, საბოლოოდ, მომხმარებლის მოწყობილობებს ექნება ფიჭურ და თანამგზავრულ ქსელებს შორის შეუფერხებლად გადაადგილების უნიკალური შესაძლებლობა, რაც დამოკიდებულია ადგილობრივ მობილური ქსელის ოპერატორებსა (MNO) და თანამგზავრული ქსელის ოპერატორებს (SNO) შორის შეთანხმებებზე. გარდა ამისა, LEO მობილური ფართოზოლოვანი სისტემებისთვის 3GPP-ზე დაფუძნებული ტექნოლოგიის გამოყენება ხელს შეუწყობს თანამგზავრული და ტერესტრიალური ქსელების ტექნოლოგიების ინტეგრაციას დაფარვის გასაუმჯობესებლად და მდგრადობის გაზრდის მიზნით.

მაშინ, როდესაც 3GPP-ზე დაფუძნებული LEO ფიქსირებული ფართოზოლოვანი თანამგზავრული წვდომის ქსელები შეიძლება იყოს ლოკალური ქსელების ალტერნატივა, ფიქსირებული ფართოზოლოვანი კავშირის შეთავაზებისთვის იმ ადგილებში, სადაც ბოჭკოვანი ან მაღალსიჩქარიანი კაბელი მიუწვდომელია, 3GPP-ზე დაფუძნებული LEO მობილური ფართოზოლოვანი თანამგზავრული წვდომის ქსელები უზრუნველყოფს პირდაპირ კავშირს ტელეფონთან, ან IoT მოწყობილობები იქნება ერთგვარი დამატება მობილური სერვისის „ყოვლისმომცველი“

დაფარვის უზრუნველსაყოფად. მიუხედავად იმისა, რომ ტერესტრია-
ლური ქსელები გვთავაზობს მონაცემთა გადაცემის სიჩქარეს ასობით
მეგაბიტს წამში ან თუნდაც გიგაბიტს წამში, მოსალოდნელია, რომ LEO-
ზე დაფუძნებულ ქსელს, რომელიც უზრუნველყოფს პირდაპირ კავშირს,
შეეძლება სმარტფონებისთვის წამში რამდენიმე მეგაბიტამდე სიჩქარის
უზრუნველყოფა, S სიხშირულ დიაპაზონში 15 მჰც-ის გამოყენებით. ამ-
რიგად, მხარდაჭერილი იქნება ხმოვანი კავშირი, შეტყობინებების გაც-
ვლა და საბაზისო მონაცემებთან დაკავშირება. სპეციალურ მოწყობილო-
ბებს, ანტენის უფრო მაღალი გაძლიერების კოეფიციენტით ან უფრო მა-
ღალი გამომავალი სიმძლავრით (მაგალითად, ESIM და VSAT), შეუძლია
უფრო მაღალი სიჩქარით სარგებლობა. მაშინ, როდესაც კონკურენტუ-
ნარიან LEO თანავარსკვლავედს, რომელიც უზრუნველყოფს საბოლოო
მომხმარებლებს პირდაპირი კავშირით ხმოვან და მონაცემთა სერვისებ-
თან, სჭირდება თანამგზავრების ძალიან დიდი რაოდენობა, NB-IoT ტი-
პის სერვისების მხარდაჭერა შესაძლებელია მცირე ინვესტიციით ისეთი
ვერტიკალებისთვის, როგორცაა ტრანსპორტი, ლოჯისტიკა, კომუნა-
ლური მომსახურება, მეურნეობა და სამთო მოპოვება.

LEO-ზე დაფუძნებული პირდაპირი კავშირის ქსელების ბაზარი შეი-
ძლება დაიყოს ორ სეგმენტად: პირველი სეგმენტი არის გარანტირებული
სერვისი ყველგან დაკავშირებით, სადაც განვითარებულ ბაზრებზე აბო-
ნენტები მზად არიან გადაიხადონ რამდენიმე პროცენტი დამატებით მათ
ყოველთვიურ გადასახადზე. ნებადართული თვიური „NTN მონაცემთა
ლიმიტი“ შეიძლება იყოს რამდენიმე ასეული მეგაბიტი თვეში; მეორე
სეგმენტი არის განვითარებად ბაზრებზე არსებული ჯერ კიდევ დაუ-
ფარავი სფეროები, სადაც აბონენტები ერთმანეთს დაუკავშირდებიან
ძირითადი კომუნიკაციებისთვის. საშუალო შემოსავალი ერთ მომხმარე-
ბელზე, ამ უკანასკნელ სეგმენტში შედარებით მცირეა, მაგრამ მაინც თა-
ვისი წვლილი შეაქვს საერთო შემოსავალში, რადგან LEO თანამგზავრები
მუდმივად ბრუნავს დედამიწის გარშემო. საწარმო IoT კავშირი ეს არის

კიდევ ერთი პერსპექტიული შესაძლებლობა, სადაც მაგალითად, კონტენერები, მანქანები და გემები შეიძლება იყოს დაკავშირებული. LEO-ზე დაფუძნებული ფიქსირებული ფართოზოლოვანი კავშირისთვის, ბიზნესის ძირითადი სეგმენტები სხვასთან ერთად, საზღვაო და რადიოსანავიგაციო მომსახურებასაც მოიცავს.

7.6. მეშვიდე თავის დასკვნა და 6G-ის პერსპექტივები

უზარმაზარი ინვესტიციები განხორციელდა LEO-ს თანამგზავრული წვდომისთვის, რათა დაფარული ყოფილიყო ჩვენი სამყაროს ყველაზე ძნელად მისადგომი ნაწილები, „ციფრული უთანასწორობის“ გადასალახად. როგორც ისტორიული მასალებიდან ვსწავლობთ, კოსმოსური ინტერნეტსერვისების წარმატების გაცნობიერება არ ყოფილა და არც იქნება ადვილი. ამ თავში ჩვენ განვიხილეთ ზოგიერთი კრიტიკული გამოწვევა, რომელიც არავითარ შემთხვევაში არ არის ამომწურავი.

6G კვლევები სულ უფრო და უფრო მასშტაბური ხდება. ჩვეულებრივი ტერესტრიალური წვდომის გაფართოება LEO თანამგზავრულ წვდომაზე აუცილებელი იქნება ჭეშმარიტად გლობალური დაფარვის მისაღწევად. მოელიან, რომ LEO თანამგზავრული წვდომის ინტეგრაცია ტერესტრიალურ ქსელებთან იქნება მჭიდრო 6G-ში, რაც უზრუნველყოფს უწყვეტ მობილურობას ტერესტრიალურ და LEO თანამგზავრულ ქსელებს შორის. 6G-ში მჭიდრო ინტეგრაციის მისაღწევად, ჩვენ დაგვჭირდება სრულიად ახლებური მიდგომა, რაც გულისხმობს LEO თანამგზავრული წვდომის გათვალისწინებას 6G სისტემის კონსტრუირების პროცესში პირველივე დღიდანვე, განსხვავებით 5G NTN-ში განხორციელებული ევოლუციური მიდგომისგან. ასეთი მიდგომა საშუალებას მოგვცემს პასუხი გავცეთ აღნიშნულ კვლევებთან დაკავშირებულ მრავალ კითხვას. მოსალოდნელია, რომ 6G სტანდარტიზაცია 3GPP-ში დაიწყება დაახლოებით 2025 წელს, ხოლო 6G კომერციალიზაცია მოხდება დაახლოებით 2030 წელს. ამიტომაც, ახლა არის დრო, რომ წარმოდგენილ იქნას 6G-სთან დაკავშირებული

კვლევითი საკითხები, მათ შორის, თანამგზავრული ინტეგრაციის კუთხით. ამ თავის ბოლოს ჩვენ მოვიყვანთ რამდენიმე პერსპექტიულ 6G კვლევით მიმართულებას.

ტალღის ფორმის დიზაინი: 5G NTN დაფუძნებულია OFDM ტალღის ფორმაზე, რათა მაქსიმალურად გაზარდოს სინერგია არსებულ ტერესტრიალურ 5G სისტემებთან. თუ გავითვალისწინებთ LEO თანამგზავრულ წვდომის პროცესში დროში ძლიერ ცვალებად დოპლერის წანაცვლებას და თანამგზავრის სასარგებლო დატვირთვის შეზღუდულ ენერგეტიკულ რესურსს, OFDM შეიძლება არ იყოს კონსტრუქციის ოპტიმალური არჩევანი (მაგალითად, პიკური და საშუალო სიმძლავრის თანაფარდობით გამოწვეული პრობლემის გამო). საინტერესო იქნება ახალი ფორმის სიგნალების (ტალღების) შესწავლა, რომლებიც უფრო მდგრადია დროსთან და სიხშირესთან დაკავშირებულ შეცდომებთან მიმართებაში და ენერგოეფექტიანია თანამგზავრის სასარგებლო დატვირთვისთვის.

სისტემური არქიტექტურა: აუცილებელი იქნება ქსელის მოქნილი არქიტექტურის შემუშავება ინტეგრირებული ტერესტრიალური და LEO თანამგზავრული წვდომისთვის. არქიტექტურამ უნდა უზრუნველყოს დატვირთვის ეფექტიანი დაბალანსება, უწყვეტი მობილურობა და რესურსების დინამიკური განაწილება ტერესტრიალურ სისტემებსა და LEO თანამგზავრებს შორის. გარდა ამისა, არქიტექტურა უნდა იყოს საკმარისად მოქნილი, რათა მხარი დაუჭიროს თანავარსკვლავედის მართვის სიმარტივეს და LEO თანამგზავრის განლაგების მრავალფეროვან სცენარებს ISL-ებით, მრავალლინკიანი კავშირებით, ბექჰოლის გამოყენებით და ა.შ.

სიხშირული სპექტრის გამოყენება: ტერესტრიალური და თანამგზავრული კომუნიკაციებისთვის სიხშირული სპექტრის მიმდინარე განაწილება შედარებით სტატიკურია. ამ ორი ტიპის სისტემის ინტერფერენციების კოორდინაცია ძირითადად მარეგულირებელი მოთხოვნებით რეგულირდება. ტერესტრიალური ქსელებისა და LEO თანამგზავრული წვდომის მჭიდრო ინტეგრაციით 6G-ში, სპექტრის გამოყენება შეიძლება

უფრო მოქნილი გახდეს, რაც გამოიწვევს ინტერფერენციების უფრო ოპტიმიზებულ კოორდინაციას და სპექტრული ეფექტიანობის გაუმჯობესებას.

საცდელი სამუშაოები და სატესტო განთავსება: 6G-ის სტანდარტიზაციის დაწყებამდე (დაახლოებით 2025 წელს), ჩვენ გვაქვს შესაძლებლობა ჩავატაროთ ადრეული ცდები და განვახორციელოთ ინტეგრირებული ტერესტრიალური ქსელის და LEO თანამგზავრული წვდომის ერთობლივი ტესტირება. საცდელი სამუშაოები და სატესტო განთავსებები უზრუნველყოფს ღირებულ პრაქტიკულ ცოდნას, რომელიც დაგვეხმარება შევიმუშაოთ 6G სისტემის სრულიად ახალი სტრუქტურა ტერესტრიალური და LEO თანამგზავრული კომპონენტების სრულყოფილი ინტეგრირებით.

თავი 8. მოლეკულური ფიზიკური ფენა 6G-სთვის არატალღოვან გარემოში

8.1. შესავალი

5G-ისა და სხვა თანამედროვე ტექნოლოგიების მსოფლიოში ფართო გავრცელებასთან ერთად, როგორც მკვლევრები, ასევე მრეწველობა, უკვე აქტიურად ეძებენ ფუნდამენტურად ახალ ტექნოლოგიებს 6G-ის რადიონტერფეისისთვის, რომელიც შესაძლებლობას მოგვცემს დავაკავშიროთ ახალი მოწყობილობები თანამედროვე, რთულ გარემოში. არსებობს სხვადასხვა ექსტრემალური გარემო, რომელიც არ იძლევა ტალღებზე დაფუძნებული უსადენო სისტემების გამოყენების საშუალებას. ეს გარემო ხშირად არის სპეციფიკური (მაგალითად, სითხეებში არსებული არხი დანაკარგებით), მტრული (მაგალითად, ჩახშობით და მიყურადებით) და მცირე ზომის (მაგალითად, საჭიროებს ნანოტექნოლოგიებს). შესაბამისი მაგალითები მოიცავს რობოტების კოორდინაციას მიწისქვეშა საძიებო-სამაშველო ოპერაციებში, ფარული შეტყობინებების გაგზავნას მტრის მიერ დაკავებულ ტერიტორიაზე და მონიტორინგს ჩაშენებული მილსადენების ქსელებში, ასევე ადამიანის სხეულში. ამიტომ, საჭიროა ახალი ფიზიკური ფენა 6G უსადენო ქსელისთვის და ეს ფაქტი უკვე საჯაროდაა აღიარებული წამყვანი სამრეწველო კორპორაციების მიერ ტელეკომუნიკაციების, მიწისქვეშა კრიტიკული ინფრასტრუქტურის დაცვის, თავდაცვისა და უსაფრთხოების სფეროში.

ამ ახალი გამოწვევების საპასუხოდ, სამეცნიერო-კვლევითი საზოგადოება ამუშავებს ინფორმაციის ახალ გადამტან საშუალებებს. მომავალ განვითარებასთან დაკავშირებულ ბევრ ფუნდამენტურ ნაშრომში უკვე დადგენილია, რომ მოლეკულურ კომუნიკაციას შეუძლია ადამიანის სხეულის ნანოქსელების ისეთი ახალი თაობის გააქტიურება, როგორცაა *in vivo* (ცოცხალ ორგანიზმთან) დაკავშირება წამლების მიზანმიმართული მიწოდებისთვის და ჯანდაცვის აპლიკაციებისთვის ნანოსაგნე-

ბის ინტერნეტის ქოლგის ქვეშ. თუმცა, ძალიან ცოტა მაკრომასშტაბიანი საინჟინრო მანქანური აპლიკაცია არის შემოთავაზებული და შესაბამისად, ამ თავში ჩვენ შევეცადეთ მოლეკულური კომუნიკაციის დღეისათვის ცნობილი შესაძლებლობებისა და შეზღუდვების დემონსტრირება.

ბუნებაში ფართოდ გავრცელებული, მაგრამ საინჟინრო სისტემებში ჯერჯერობით არარსებული, მოლეკულური კომუნიკაცია (MC) არის სწრაფად პროგრესირებადი ტექნოლოგია, რომელსაც აქვს არატალღოვან (ანუ იქ, სადაც იგნორირებულია ტალღები) გარემოში კომუნიკაციის შესაძლებლობა. ჩვენ ჯერ კიდევ წინ გვაქვს მისი სრული პოტენციალის გაცნობიერება ინჟინერიაში. თავდაპირველად განხილული, როგორც უჯრედოვანი სიგნალიზაციის ბიოლოგიური ანალოგი, MC შემოთავაზებული იყო ბიო-სამედიცინო აპლიკაციების ფართო სპექტრისთვის, დაწყებული წამლის მიზანმიმართული მიწოდებიდან ოპტოგენეტიკის ჩათვლით. მიუხედავად იმისა, რომ მნიშვნელოვანი წინსვლა იქნა მიღწეული სინერჯის შესასწავლად ტრადიციულ რადიოკავშირის ტექნოლოგიებს შორის, როგორცაა MIMO, შემეცნებითი, სისტემური სამშენებლო ბლოკები და ახლახან შემოსული MC სისტემები, უნდა გვახსოვდეს, რომ ფიზიკა, რომელიც დევს MC-ის საფუძველში, არ არის კარგად გასაგები და ექსპერიმენტული მტკიცებულებები მოდელების მხარდასაჭერად ჯერ კიდევ პრიმიტიულია. აქედან გამომდინარე, მნიშვნელოვანია დავიწყეთ იმ გამოწვევებით, რომლებიც გვაიძულებს გავიგოთ, თუ რა კავშირია ინფორმაციის თეორიასა და MC-ის ფიზიკურ ფენას შორის. ეს განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია მაკრომასშტაბიან საინჟინრო სისტემებში, სადაც MC-ის გამოყენების სფეროების ნაკლებობა იგრძნობა. მაკრომასშტაბიან MC-ში ადგილი აქვს პროტოტიპების სტაბილურ ზრდას მისი შედარებით დაბალი ღირებულების გამო მიკრომასშტაბიან ეკვივალენტებთან შედარებით.

ამ თავის მიზანია, პირველ რიგში ჩავატაროთ მაკრომასშტაბიან MC-ში ბოლოდროინდელი მნიშვნელოვანი მიღწევების მიმოხილვა, სადაც კონკრეტულად განიხილება:

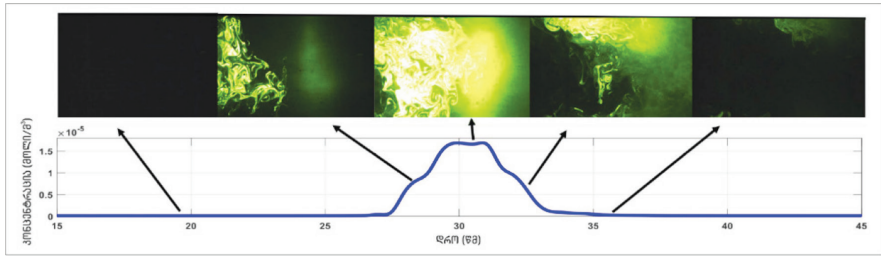
1. ინფორმაციის კოდირება და დეკოდირება ქიმიური და ბიოლოგიური მაკრომოლეკულების გამოყენებით;
2. ტურბულენტური არხის მოდელის შექმნა გამოთვლითი ჰიდროდინამიკის გამოყენებით (CFD).

შემდეგ ჩვენ განვიხილავთ უახლეს და მიმდინარე სამუშაოებს თავდაცვისა და უსაფრთხოების, კიბერ-ფიზიკური სისტემების გამოყენების სფეროებში. ეს არის ძირითადად 5-წლიანი ექსპერიმენტული მუშაობის მიმოხილვა (ნახ. 8.1), ჩატარებული უორჯიკის უნივერსიტეტის (დიდი ბრიტანეთი), პეკინის ფოსტისა და ტელეკომუნიკაციების უნივერსიტეტის (ჩინეთის სახალხო რესპუბლიკა), ტონგჯის უნივერსიტეტის (ჩინეთის სახალხო რესპუბლიკა) თანამშრომლობით. ჩვენ ასევე განვიხილავთ მსოფლიოში ჩატარებულ სამუშაოებს ამ სფეროებში და დავადასტურებთ მზარდ აღიარებას იმისა, რომ MC-ს შეუძლია მრავალფეროვანი გამოყენების პოვნა. ჩვენ ვუჩვენებთ, რომ არსებობს აპლიკაციების სფეროები, რომლებიც ითხოვს ინოვაციურ და ფუნდამენტურად ახალ მოლეკულურ უსადენო კომუნიკაციის დიზაინს, რომელიც შერეულია ჰიდროდინამიკასთან და სხვა ტრადიციულ საინჟინრო სფეროებთან. ჩვენ ასევე ვუჩვენებთ, რომ ამ მაკრომასშტაბიან შესაძლებლობებს შეუძლია შეუერთდეს ნანომასშტაბიან ჯანდაცვის აპლიკაციებს ახალი 6G ფიზიკური ფენის შესაქმნელად.

8.2. არსებული მიღწევები მაკრომასშტაბიანი მოლეკულური კავშირის მიმართულებით

ჩვენ ჯერ განვიხილავთ ექსპერიმენტებისა და ანალიზის სამუშაო პროცესს, რომელიც წარმოდგენილია ნახ. 8.1-ზე. შესაბამისად, მოვახდენთ იმ არხების ილუსტრირებას, რომლებსაც შეუძლია არა მხოლოდ MC-ის უზრუნველყოფა, არამედ MC-ში ინფორმაციის გავრცელების რაოდენობრივი განსაზღვრა (მაგალითად, როგორ იფანტება ინფორმაცია ან ერევა ატმოსფეროს). ამის მიღწევა შესაძლებელია სხვადასხვა

ტექნიკის საშუალებით, რომელიც ანთებს მოლეკულური ინფორმაციის მატარებლებს და გადაღებულია მაღალსიჩქარიანი კამერით შემდგომი ანალიზისთვის, გავრცელებისა და ხმაურის მოდელების რაოდენობრივი შეფასების მიზნით.



ნახ. 8.1. მოლეკულური კომუნიკაციის ლაბორატორია, რომელიც გარდაქმნის ჰიდროდინამიკის ცოდნას კომუნიკაციის თეორიად. PLIF მონაცემთა მოპოვება: კონცენტრაციის შესახებ მონაცემები გამოიყენება ხმაურის დახასიათებისა და ერთობლივი ინფორმაციის ანალიზისთვის

როგორც ნახ. 8.1-ზეა ნაჩვენები, ეს ანალიზი საშუალებას გვამძლევს რაოდენობრივად განვსაზღვროთ ორმხრივი ერთობლივი ინფორმაცია (MI), რომელიც შეიძლება მივიღოთ 3D არხში რეალისტურ ჰიდროდინამიკურ პირობებში (მაგალითად, მასის დიფუზიისა და ადვექციის ძალების მიღმა). ამ მიდგომის მთავარი განსხვავება ჰიდროდინამიკურ კვლევაში გამოყენებულ გაზომვა/შეგრძნებაზე დაფუძნებულ სამუშაოსთან შედარებით არის ის, რომ ჩვენ ვცდილობთ ინფორმაციის უწყვეტი ნაკადების კოდირებას და დეკოდირებას, მაშინ როდესაც სხვა სფეროები უბრალოდ აღიქვამენ მუდმივ (მაგალითად, დაბინძურების ან გულისცემის) სიგნალს. ამ თვალსაზრისით, ჩვენ გვანტერესებს სიგნალების სხვადასხვა ატრიბუტები, რომლებიც შეიძლება იყოს უფრო სტაბილური და შესაბამისად, უკეთესი ფუნქციების მქონე მონაცემთა კოდირებისთვის ან გვჭირდება ახალი მექანიზმები ამ გამოწვევის საპასუხოდ.

თავდაპირველად განვიხილოთ არხის მოდელი ტურბულენტურ გარემოში.

ნანომასშტაბიანი და მიკრომასშტაბიანი არხების გარშემო არსებულ კვლევებში უპირატესად გამოიყენება მასობრივი დიფუზიურ-ადვექციური არხების მოდელები, რომლებშიც ვარაუდობენ, რომ მუშაობა მიმდინარეობს დაბალ რეინოლდსის რიცხვებზე (უგანზომილებო რიცხვი, რომელიც გამოიყენება ჰიდრომექანიკაში, რათა მიუთითოს, სითხის დინება სტაბილურია თუ ტურბულენტური). ეს მიზანშეწონილია მრავალი ნანომასშტაბიანი და ბიოლოგიური გარემოსთვის (მაგალითად, კაპილარები და უჯრედოვანი მემბრანები) და მიყვავართ გაუსის მართვად ადიტიური კონცენტრაციის და გაუსის ინვერსიულ დროით მოდელებამდე. თუმცა, მაკრომასშტაბიან დონეზე და დაბალი სიბლანტის სითხეებისთვის, ჩვენ შევდივართ რეინოლდსის მაღალი რიცხვების რეჟიმში, სადაც არის დამატებითი უწყვეტი ძალები (მძვრელი ძალები, ტურბულენტობა და იმპულსის დიფუზია). ამგვარად, აუცილებელია უფრო რეალისტური მოდელების გათვალისწინება ტურბულენტობის შემცველი ნავიერ-სტოქსის განტოლებების ამოხსნით – როგორც წესი, სასრული ელემენტების კომპიუტერული სიმულაციებით ღია საწყისი კოდის ამომხსნელების ან კომერციული პაკეტების გამოყენებით, როგორიცაა COMSOL.

თეორიიდან პრაქტიკამდე: წარმოდგენილ პლატფორმაში, ტურბულენტურ არხში მოლეკულური ინფორმაციის თვალყურის დევნებისთვის და მიღწევადი MI-ის მისაღებად გამოყენებულია ნაწილაკების გამოსახულების ველოსიმეტრია (PIV) ან ლაზერით ინდიცირებული ბრტყელი ფლუორესცენცია (PLIF). PIV ან PLIF სისტემა შეიძლება სასარგებლო იყოს იმის გასაგებად, თუ როგორ ვრცელდება ინფორმაცია რეალურ სამყაროში (მაგალითად, წყალქვეშა მდინარეებში და ოკეანეებში), სცენარსა და ექსპერიმენტს შორის უგანზომილებო რიცხვების თანხვედრის მხედველობაში მიღებით. მიმღები არის ან:

1. მაღალსიჩქარიანი კამერა: სურათები გაანალიზებულია ლუმინესცენციის სიმძლავრეზე, როგორც კონცენტრაციის მაჩვენებელზე;

2. წყალქვეშა ოპტიკური ფლუორომეტრი: დამონტაჟებულია სხვადასხვა დაბრკოლება, რომელიც ახდენს რეალური გარემოს იმიტაციას.

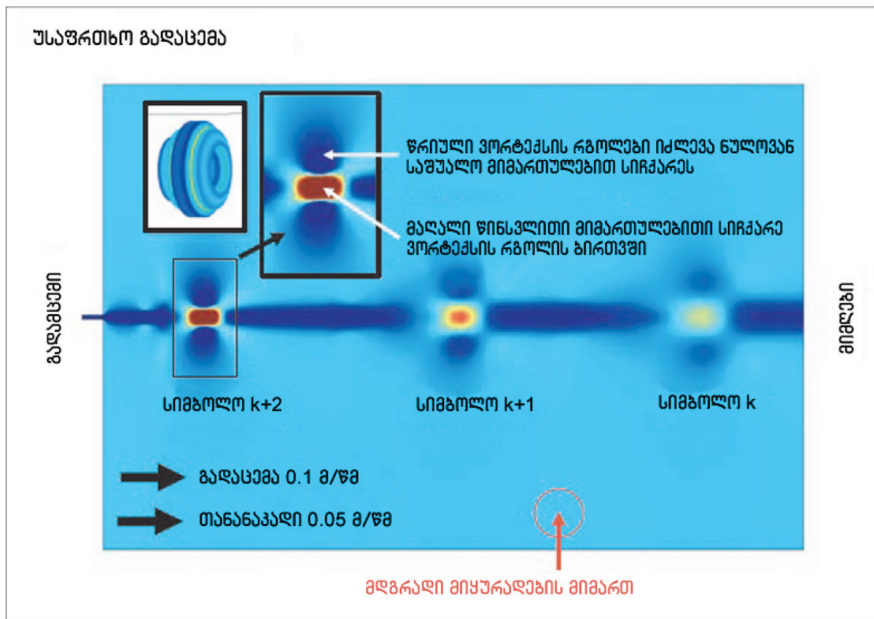
განმეორებითი გადაცემების გაზომვის მონაცემების გამოყენებით, ჩვენ რიცხობრივად ვადგენთ ხმაურის განაწილებას და მაქსიმალურად ვზრდით არხის მიღწევად MI-ს. ჩვენ ამას ვაკეთებთ შემავალი განაწილების კონფიგურირებით, გამომავალ ხმაურზე დაკვირვებით და საბოლოოდ, MI-ის იდენტიფიცირებით. MI-ს გამოსათვლელად, ერთ-ერთი ამოცანაა განმეორებითი ექსპერიმენტული მონაცემების შეგროვება ხმაურის განაწილების რაოდენობრივად დასადგენად, რაც შეიძლება იყოს ნელი დროის რეალურ მასშტაბში ჩატარებულ ექსპერიმენტებში. ლიტერატურაში ასევე შესწავლილია მოდულაციის ოპტიმიზაციის სტრატეგია, რომელსაც ასევე შეუძლია გააუმჯობესოს MI-ს შენარჩუნების შესაძლებლობა ტურბულენტურ არხებში.

გადაცემის ძირითადი შეზღუდვები: დადგენილია ფუნდამენტური საზღვრები იმის შესახებ, თუ რა მანძილი შეიძლება გაიაროს კოჰერენტულმა MC სიგნალმა ატმოსფეროში სრულ შერევამდე, რაც სიგნალის ცალკეულ და მიმდევრობით სიმბოლოებს ხდის განურჩევლს. აქ, კოჰერენტულობა განისაზღვრება, როგორც სიტუაცია, როდესაც გადაცემული სიგნალის სტრუქტურის ამოცნობა კვლავ შესაძლებელია მიმდებში (მაგალითად, MI მეტია ნულზე). შესაბამისი ძირითადი რელევანტური პროცესები რეგულირდება სითხის ტურბულენტობის სირთულეებით და მასთან ასოცირებული კლასიკური ენერგეტიკული კასკადით. ტურბულენტური დინებები მოიცავს სხვადასხვა მასშტაბის სიდიდის მორევებს. ენერგია კასკადურად გადაიცემა მოძრაობის უდიდესი მასშტაბებიდან თანმიმდევრულად უფრო მცირე მასშტაბებზე, სანამ არ დაიფანტება სიბლანტის მოქმედების გამო, სიდიდის ყველაზე მცირე მასშტაბზე, რომელსაც კოლმოგოროვის მავრომასშტაბი ეწოდება. ჩატარდა ექსპერიმენტული კვლევები, რომლებიც ეხებოდა საკითხებს, დაკავშირებულს

მაკრომასშტაბიანი MC-ის ფუნდამენტურ საზღვრებთან ამ ტურბულენტური ჩარჩოს კონტექსტში. გამოიკვლიეს წყალქვეშა, ტივტივადობით მართვადი ვერტიკალური მაკრომასშტაბიანი MC, რომელიც პოტენციურად მნიშვნელოვანია წყალქვეშა კომუნიკაციისთვის. ინფორმაცია კოდირებული იყო მიმდევრობით მოლეკულურ პლუმებზე. ინფორმაციული გამტარუნარიანობის დაკარგვის პრობლემა მოლეკულურ პლუმებში გარემომცველი წყლის ტურბულენტური წატაცების გამო, გადაწყვეტილი იყო წატაცების შესაძლებლობის დაშვებით (აღვნიშნავთ, რომ წატაცება (entrainment) არის ნელა მოძრავი წყალსატევის თრევა უფრო სწრაფად მოძრავი წყალსატევით, რაც გამოწვეულია გამყოფი ზედაპირების ხახუნით. წატაცება მნიშვნელოვანია ტურბულენტურ ჭავლებში და წარმოადგენს ინტენსიური კვლევის თემას). ამას მივყავართ განივი პლუმის მიმართულებითი სიჩქარის გაუსის პროფილამდე, რომელსაც აქვს ისეთი ინტერპრეტირებადი ატრიბუტები, როგორიცაა დამიზნების ძალა და გადამცემი ანტენის ზომა. ანუ წინსვლითი მიმართულებითი სიჩქარე, რომელიც როგორც ჩვენ ვიცით, მნიშვნელოვანია სიმბოლოების კოჰერენტულობისთვის, ლატერალურად მცირდება იმისდა მიხედვით, თუ რამდენად შორს აღმოაჩენს მას ადამიანი დამიზნების მიმართულების მიღმა.

შეზღუდვების გადალახვა ვორტექსის რგოლების გამოყენებით: მიუხედავად იმისა, რომ არსებობს ფუნდამენტური შეზღუდვები იმის შესახებ, თუ რამდენად შორს შეიძლება გავრცელდეს MC სიგნალური ნაკადი, სანამ ის ატმოსფეროში შეერევა და იმპულსი და სიგნალის სტრუქტურა იქნება დაკარგული (ნახ. 8.2), ჩვენ შეგვიძლია დავარღვიოთ ეს ლიმიტი თვითგავრცელებადი ნაკადის სტრუქტურების გამოყენებით.

იმისათვის, რომ დავძლიოთ მასის, იმპულსისა და ტურბულენტური დიფუზიური ძალების მიერ წარმოქმნილი ბარიერები, ჩვენ განვიხილავთ საინფორმაციო სიმბოლოების მოდულაციას ვორტექსის რგოლების სტაბილურ სტრუქტურებში, რათა მაქსიმალურად გაიზარდოს



ნახ. 8.2. უსაფრთხო მოლეკულური ვორტექსის რგოლები

გადაცემის დიაპაზონი (მანძილი) და მინიმუმამდე იქნას დაყვანილი სიმბოლოთაშორისი ინტერფერენცია (ISI) (ნახ. 8.2). ვორტექსის თითოეულ რგოლს შეუძლია გავრცელდეს მანძილზე, რომელიც დაახლოებით განისაზღვრება როგორც ასჯერ გადამცემი საქშენის დიამეტრი, მისი კომპაქტური ფორმის დაკარგვის გარეშე. ნაჩვენებია, რომ ვორტექსის რგოლის მიმდევრობითი გადაცემისას ISI მინიმალურია და სწრაფად მცირდება გადაცემის შემდეგ მანძილის მიხედვით. ეს არის საპირისპირო ეფექტი ჩვეულებრივი მოლეკულური შეფერხებებისგან, როდესაც მოლეკულები განიცდიან ადვექცია-დიფუზიას და რომლის დროსაც ISI იზრდება მანძილის მიხედვით. გარდა ამისა, ნაჩვენებია იქნება, რომ კოჰერენტული სიგნალის სტრუქტურის შენარჩუნებით, სიგნალის და ინტერფერენციის თანაფარდობა (SIR) არის ორი რიგით მაღალი სიდიდის, ვიდრე ჩვეულებრივი შეფერხებების დროს. შედეგები მიუთითებს პერსპექტიულ გზას უფრო მაღალი გამტარუნარიანობის არხებისთვის.

არხის მოდელის განხილვის შემდეგ გადავიდეთ ინფორმაციის კოდირებაზე.

როგორც უკვე განვიხილეთ, მაკრომასშტაბიანი MC სიგნალები ვრცელდება მნიშვნელოვნად უფრო დიდ (სიდიდის 7-დან 10-მდე რიგით მეტ) მანძილებზე, ვიდრე ნანო/მიკრომასშტაბიანი MC სიგნალები. ძალები, რომლებიც გავლენას ახდენენ მაკრომასშტაბიან MC სიგნალებზე, გაცილებით უფრო დინამიკური, უფრო მაღალგანზომილებიანია (მაგალითად, მრავალი დაკავშირებული ძალა) და ექვემდებარება სხვადასხვა გარე პერტურბაციას. არხის მოდელი დეტალურად განიხილება ამ პარაგრაფში. როგორც ასეთი, ტრადიციული მოდულაციის მეთოდები – მანიპულაცია კონცენტრაციის წანაცვლებით (CSK) და მანიპულაცია დროითი წანაცვლებით, ფუნდამენტურად არასანდოა. მაშინ, როდესაც ზემოხსენებულ ტექნიკას, როგორცაა ვორტექსის რგოლები, შეუძლია გააუმჯობესოს ტურბულენტურ არხებში იმპულსის ფორმის კოჰერენტულობა, კოდირების შეზღუდვები (მაგალითად, დროით ან კონცენტრაციის მახასიათებლებზე დამოკიდებულება) უნდა დაიძლიოს ბიოქიმიური მოდულაციის საშუალებით. ბუნების მიბაძვისა და ბიოქიმიური მანიპულაციის გამოყენების მოთხოვნები გადაწყვეტია მაკრომასშტაბიანი MC-ის საიმედოობისთვის.

ქიმიური კოდირება და დეკოდირება: ქიმიურად კოდირებული ინფორმაციის გადაცემა სუნის ნაკადის მეშვეობით პირველად აჩვენეს ტეილორმა და სხვებმა, 2015 წელს აქროლადი ორგანული ნაერთების (VOC) ფართო სპექტრისთვის პროგრამირებადი გენერატორის საშუალებით, რომელსაც შეუძლია ქიმიური კომბინაციების ძალიან დიდი რაოდენობა წარმოქმნას. შესაბამისად, დამტკიცდა მასშტაბური ქიმიური კოდირების გამოყენების შესაძლებლობა MC-ში. ინფორმაციის მოდულაცია შესაძლებელია ქიმიურ სტრუქტურაზე ან როდესაც შერწყმულია ტრადიციულ CSK მოდულაციასთან. იქმნება „ქიმიური გატარების ზოლის“ ფორმა (დამოუკიდებელი ქიმიური ხელმოწერების რაოდენობა, რომელიც

შეიძლება იყოს კოდირებული ორმხრივი ქიმიური ინტერფერენციის გარეშე). გადამცემის მხარეს ფუნდამენტური ტექნოლოგიები მოიცავს სხვადასხვა VOC-ის შემრევ კამერას, რომელიც შემდეგ გადაიცემა ინერტული აირის ნაკადით (გადამტანი არხი), რაც უფრო გლუვ გავრცელებას უზრუნველყოფს. მიმღები არის მასის სპექტრომეტრი, რომელსაც შეუძლია რთული ქიმიური სპექტრის მონაცემები გარდაქმნას ციფრულ შეტყობინებად.

ქიმიური ნაერთების შერჩევის თვალსაზრისით, ნახშირწყლებს აქვს მკაფიო უპირატესობები, რადგან ისინი წარმოადგენს ბიოლოგიური მაკრომოლეკულების კლასს, ალბათ ყველაზე დიდი პოტენციალით სირთულის კუთხით და შესაბამისად, ინფორმაციის შესანახად. მონოსაქარიდები, როგორც წესი, შეიცავს სამიდან ექვსამდე ნახშირბადის ატომს და ბევრი შეიძლება არსებობდეს როგორც რგოლოვანი, ასევე სწორი ჯაჭვის მოლეკულების სახით. მონოსაქარიდები შეიძლება შედარებით ნაკლებად განსხვავდებოდეს, რაც ართულებს მათ ერთმანეთისგან გარჩევას ქიმიურად და მასის მიხედვით, მაგრამ თანამედროვე ტექნოლოგიამ შესაძლებელი გახადა მათი ადგილმდებარეობებისა და სტრუქტურების რუკაზე დატანა. დნმ-ისა და პეპტიდებისგან განსხვავებით, მათ შეუძლია პოლიმერიზაცია ერთზე მეტ განზომილებაში, რადგან გლიკოზიდური კავშირები შეიძლება ჩამოყალიბდეს მონოსაქარიდების მრავალ უბანს შორის, რაც ართულებს სპეციფიკური პოლისაქარიდის სტრუქტურის ქიმიურად მდგრად სინთეზს. თუმცა, დნმ-ისა და პეპტიდებისგან განსხვავებით, მათ არ სჭირდებათ მატრიცა ბიოლოგიურად წარმოქმნისათვის. კვლევის სხვა შერჩევითი კრიტერიუმები მოიცავს ბიოლოგიური ხელმოწერის მიბაძვას და ქიმიური რეაქციების შემუშავებას სიგნალის გავრცელების სიცოცხლის დროის გასახანგრძლივებლად. ამ უკანასკნელ შემთხვევაში, მკვლევრებმა დააწინაურეს ეს სფერო, გამოიყენეს რა:

1. ფლუორესცენტური მოლეკულები, რომელთა გადართვაც ხორციელდება წყალბადის პოტენციალით მართული ჰიდროლი-

ზით, რათა ისარგებლონ ქიმიური მესინჯერის რეაქტიულობით მიმდებში სტაბილური სიგნალის მისაღწევად;

2. ნახშირბადის ნანონაწილაკები, მოლეკულური გავრცელებისას დაბალი წანააღმდეგობის მისაღწევად უფრო მკვეთრი სიგნალ-ბისთვის.

დნმ-ის ბიოქიმიური კოდირება და დეკოდირება: ნაჩვენებია, რომ დნმ-ის შენახვა მნიშვნელოვან უპირატესობებს გვთავაზობს ელექტრო და მაგნიტურ შენახვასთან შედარებით, ხარჯების ეფექტიანობის თვალსაზრისით, დიდი ზომის ფაილებისთვის ან გრძელვადიანი პერიოდისთვის. ამჟამინდელ ტექნოლოგიას შეუძლია მიაღწიოს მრავალი მეგაბიტი ინფორმაციის საიმედო შენახვას 1 პროცენტზე ნაკლები შეცდომით და ის შეიძლება გაგრძელდეს 50 წლის განმავლობაში. კემბრიჯის უნივერსიტეტში ჩატარებული კვლევა იძლევა ექსპერიმენტულ და თეორიულ საფუძველს ბიოლოგიურ მაკრო-მოლეკულებში, ანუ დნმ-ის ჯაჭვებში ინფორმაციის კოდირებისთვის. ციფრული ინფორმაციის გადაცემა შესაძლებელია რამდენიმე გზით:

- პირდაპირი კოდირება: ინფორმაცია შეიძლება პირდაპირ იყოს გამოხატული დნმ-ის ჯაჭვებში, შემდეგნაირად:
 1. სიჭარბით, რომელიც გამოხატულია გადაფარვადი სეგმენტებით და ლუწობაზე შემოწმების საშუალებით შეცდომების გასასწორებლად;
 2. ინდექსირებით, რომელიც საშუალებას აძლევს ჯაჭვებს თავიდან იქნას აცილებული ტრანსპოზიციის შეცდომები ბლოკურ დონეზე.

რნმ, მიუხედავად იმისა, რომ ისიც პოტენციური კანდიდატია, ნაკლებად სტაბილურია ვიდრე დნმ და შესაბამისად, არ არის საუკეთესო არჩევანი ამ კონტექსტში. ასევე არსებობს ნახშირწყლების ჯაჭვის მაგალითები, რომელთა კონფიგურირება ისე შეიძლება მოხდეს, რომ შეიცავდნენ სათაურის ცნობად მონაცემებს, ასევე სტაბილურ ქიმიკატებს მონაცემების შესანახად;

- ელექტრული კოდირება: ინფორმაციის მოდულაცია შესაძლებელია დნმ-ის ჯაჭვზე მიმაგრებული მაღალგამტარი ნაწილაკების მეშვეობით (ნახ. 8.3). ნანოფორას შეუძლია დნმ-ის წაკითხვა, როგორც ჩართვა-გამორთვის მანიპულაციით (OOK) მოდულირებული შტრიხ-კოდის. ამან შეიძლება მაღალი გამტარუნარიანობის მოლეკულურ კომუნიკაციას კარგად შეუწყოს ხელი.

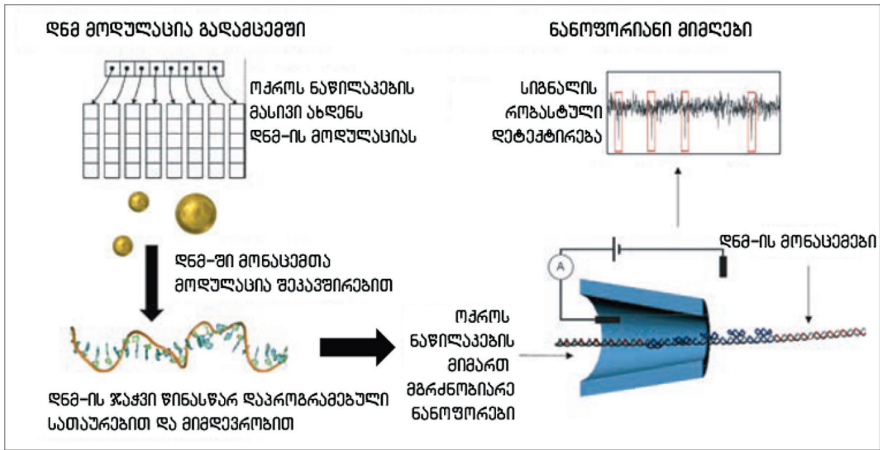
ერთ-ერთი კრიტიკული გამოწვევა არის სიგნალების ბრმა დამუშავების საჭიროება, რომლის დროსაც რთულმა პროცესებმა შეიძლება გამოიწვიოს არხში სიგნალის დამახინჯება. აღსანიშნავია, რომ

1. ჰიდროდინამიკური არხი შეუქცევადია (მაგალითად, საპირისპირო პილოტ-სიგნალს არ შეუძლია არხის თვისებების შეფასება);
2. დნმ-ის ჯაჭვები შეიძლება სტრუქტურულად ჩაეხვიონ ერთმანეთს ტრანსპორტირების დროს, რაც იწვევს დეკოდირების პრობლემებს;
3. გადამცემში შეიძლება ადგილი ჰქონდეს ფიზიკური კოდირების მტყუნებას.

ამგვარად, აუცილებელია სიგნალების ბრმა დამუშავების მეთოდების შემუშავება და გამოყენება, მაღალგანზომილებიანი ფუნქციების ჩანერგვით, სივრცის/კოორდინატის ტრანსფორმირებულ მეთოდებში და სტოქასტურ რეზონანსულ სქემებში.

რეალურ სამყაროში გამოყენებასთან დაკავშირებული კიდევ ერთი გამოწვევა არის ის, რომ დნმ იშვიათად თუ ყოფილა გადაცემული ბუნებაში, როგორც ინფორმაციის მატარებელი, რადგან ის ვერ გადარჩება ბაქტერიებით მდიდარ გარემოში. ფიზიკური დაცვა, სინთეტიკური გარსი ან უჯრედები, საჭირო იქნება მათი რეპლიკაციისთვის, მაგრამ, რა თქმა უნდა, ეს მასპინძლები არ არიან თავისუფალი მუტაციებისაგან (სხვა საინჟინრო ინკაფსულაციის მიდგომები ტესტირებაშია). თუმცა, არსებობს ბოლოდროინდელი შედეგები, რომელიც გვიჩვენებს სტაბილურ შენახვას ბაქტერიულ უჯრედებში. ბევრ ასეთ შემთხვევაში,

დისკუსია ეფუძნება ბიოლოგიის მიღწევებს, ხოლო ჩვენ გვინდა ხაზი გავუსვათ იმას, თუ რა საინჟინრო სისტემები შეიძლება შემუშავდეს ამ მიზნის მისაღწევად. ნებისმიერ შემთხვევაში, უკვე დადგენილია, რომ ამ სისტემებს შეუძლია ურთიერთქმედება და ინტეგრირება რეალურ საინჟინრო გარემოში.



ნახ. 8.3. დნმ-ის კოდირება ოქროს ნაწილაკების გამოყენებით, როგორც მოდულაციის ბიტების გამტარი გადამცემზე, რომლებიც შეიძლება წაკითხულ იქნას როგორც დნმ-ის „შტრიხ-კოდი“ მიმღებში

8.3. თავდაცვისა და უსაფრთხოების გამოყენებები

MC-ის ერთ-ერთი მთავარი გამოყენება არის ღრმა ოკეანეში შორ მანძილებზე საძიებო-სამაშველო ოპერაციების ჩატარება. ეს, ე.წ. დაფარული გადამცემისა და დაკარგული მიმღების პრობლემა, პირველად 2015 წელს ჩამოყალიბდა და მოტივირებული იყო მალაიზიის ავიახაზების MH370 თვითმფრინავის და წყალქვეშა ნაგების სხვა კატასტროფებით. „შავი ყუთიდან“ მიღებულ, აკუსტიკურ ტალღებზე დაფუძნებულ სიგნალებთან შედარებით, მოლეკულური ინფორმაცია არ კარგავს ენერგიას სწრაფად დისტანციაზე. ცნობილია, რომ აკუსტიკური ტალღის ენერგია არა მხოლოდ უფრო სწრაფად მიიღევა მანძილთან ერთად, არამედ უფრო აგრესიულად, სიხშირეზე დამოკიდებულებით. ამასთან, ოკეანის მასშტაბ-

ბით MC-ის გამოყენებასთან დაკავშირებით არსებობს რამდენიმე გამოწვევა:

- ვერტიკალური კომუნიკაცია დინამიკური შერევით: ჩვენ შეიძლება გვსურდეს ვერტიკალურად კომუნიკაცია ოკეანის ფენების გავლით, რომელსაც აქვს განსხვავებული სიმკვრივისა და სიბლანტის მნიშვნელობები, მზისგან სხვადასხვა დონის გათბობისა და სტრატეფიცირებული გრავიტაციული დენების გამო. როგორც ადრე განვიხილეთ, წატაცების პროცესი გვამცნობს სიგნალის ოკეანეში შერევის ხარისხს და გამტარუნარიანობის მიღწევად ზღვარს. ჩვენთვის ასევე ცნობილია, რომ თუ მიმღები არასწორადაა შეთანხმებული გადამცემთან, კონცენტრაცია შემცირდება მორტონის წატაცების პროცესის გამო;
- ლოკალიზაცია სტოქსტურ გრადიენტებში: გამოწვევა არის ის, რომ ოკეანის დინებები წარმოქმნის სტოქსტურ დრეიფებს, რაც იწვევს უხეშ და დროში ცვალებად გრადიენტური აღმართის ლოკალიზაციის პრობლემას. შესაბამისად, შემუშავდა როზენბროკის გრადიენტური ასვლის ალგორითმი, რომლის დროსაც ლოდინის ფუნქცია და ადაპტიური შერჩევის პროცესი გამოიყენება ოკეანის გარემოში მოლეკულური სიგნალის გრადიენტში სტოქსტური ცვლილებების დასაძლევად. თუმცა, ჩვენ უკვე შეგვიძლია მივაღწიოთ დნმ-ის კოდირებული შეტყობინებების შორ მანძილზე დეტექტირებას, ლიტერატურაში განხილული თანამედროვე მეთოდების გამოყენებით.

მიუხედავად ამ გამოწვევებისა, ჩვენ გვჯერა, რომ MC მაინც წარმოადგენს საინტერესო შესაძლებლობებს შეფერხებისადმი მდგრადი დაბალი მონაცემთა გადაცემის სიჩქარის მქონე შეტყობინებების გაზზავნისთვის ოკეანის სივრცეებში, განსაკუთრებით მაშინ, როდესაც აკუსტიკური და ოპტიკური სისტემების მოქმედების დიაპაზონი რჩება დაბალი და აქვს უსაფრთხოების პრობლემები (მიდრეკილია აღმოჩენისკენ).

შეტყობინებების გადაცემა უსადენო კავშირის რთულ გარემოში, როგორცაა ლაბირინთები და გვირაბის ქსელები, ფართოდ არის გავრცელებული თავდაცვისა და უსაფრთხოების გარემოში. უპილოტო ავტონომიური სისტემები, რომლებიც აწარმოებს მტრის გვირაბის ქსელების დაზვერვას და ნანგრევების ქვეშ სამაშველო სამუშაოებს მიწისძვრის შემდგომ სცენარებში არის რამდენიმე მაგალითი, როდესაც ელექტრომაგნიტური და აკუსტიკური ტალღები განიცდის ძლიერ შთანთქმას და დიფრაქციულ დანაკარგებს. მეორე მხრივ, ნაჩვენებია, რომ მოლეკულურ სიგნალებს შეუძლია საიმედოდ გავრცელდეს გვირაბების/მილების რთულ ქსელებში, ასევე გადალახოს რთული დაბრკოლებები სიგნალის ფორმის დაკარგვის გარეშე.

შეტყობინებების ფარულ გადაცემას გადამწყვეტი მნიშვნელობა აქვს მთელი რიგი უსაფრთხოებისა და სამხედრო გამოყენებებისთვის. მტრულ გარემოში, საეთერო ტალღები სრულად არის ჩახშული ან კონტროლდება, რამაც შეიძლება მიგვიყვანოს მათ ხელში ჩაგდებად. ბიოლოგიური შეტყობინებები წარმოადგენს ტექნოლოგიურ ნახტომს, სადაც ჩვენ შეგვიძლია გავზავნოთ უაღრესად მიმართული შეტყობინებები უხილავი ვორტექსის რგოლების მეშვეობით, რომლის დროსაც მოლეკულური ინფორმაციით დატვირთული თვითშენარჩუნებული სტრუქტურები დიდ მანძილზე მოძრაობს; ამასთან, აღუქმელი რჩება ელექტრომაგნიტური და აკუსტიკური ინტერფერენციების მიმართ და არ ექვემდებარება მიყურადებას (ნახ. 8.2). MC-ის კიდევ ერთი პოტენციური უპირატესობა არის მიყურადების გამოვლენისა და ლოკალიზაციის შესაძლებლობა. ცნობილია, რომ ტრადიციულ, ტალღებზე დაფუძნებულ სისტემებში, უხმაურო მომსმენების (მიმყურადებლების) აღმოჩენა და ლოკალიზება საკმაოდ რთულია. მომსმენების მიერ შთანთქმული ენერგია აღმოჩენადია მხოლოდ არეკლილი სხივებიდან მრავალგზიანი გავრცელების გარემოში და ეს გაცილებით ნაკლებია გარემოდან შთანთქმის დანაკარგებთან შედარებით. პირიქით, MC-ში მონაცემთა მატარებელი მოლეკულები განიცდის

დიფუზიას შემთხვევითი ხეტიალით გავრცელების გამო, რაც ნიშნავს, რომ არსებობს არეკვლის გარეშე საპირისპირო მიმართულებით გადაადგილების სასრული ალბათობა. ეს თვისება გამოიყენება უზმაურო მომსმენის გამოსავლენად და იძლევა უსაფრთხოების დამატებით დონეს ტრადიციულ უსადენო კომუნიკაციასთან შედარებით.

8.4. კიბერ-ფიზიკური სისტემის გამოყენებები

კიბერ-ფიზიკური სისტემის გამოყენებებში, ჩვენ ძირითადად განვიხილავთ ორ ექსტრემალურ გარემოს, რომლებიც გამოწვევებს უქმნის ჩვეულებრივ ელექტრომაგნიტურ და აკუსტიკურ უსადენო სიგნალებს. პირველ რიგში, ინფრასტრუქტურის „ჯანმრთელობის“ მონიტორინგისას, ინფრასტრუქტურის დაბერება ფართომასშტაბიანი გამოწვევაა მრავალი განვითარებული ქვეყნისთვის. ასევე აღსანიშნავია, რომ სამრეწველო ქიმიურ ქარხნებში, გარემო შეიძლება იყოს არახელსაყრელი, ტალღაზე დაფუძნებული სიგნალების მიმართ გადაჭარბებული გათბობისა და რადიაციული ხმაურის გამო.

წყლის გამანაწილებელმა ქსელებმა (WDN) შეიძლება განიცადოს მრავალი კრიტიკული მტყუნება, როგორცაა: მიღების გასკდომა, წნევის დაკარგვა და დაბინძურება. მიუხედავად იმისა, რომ მიწაში შემღწევ დაბალი სიხშირის ტალღებს შეუძლია დაზვერვის უზრუნველყოფა, დეტალური მონაცემების შეგროვება საჭიროებს ჩაშენებულ გადამწოდებს (სენსორებს) WDN მიღების შიგნით. მთავარი გამოწვევა არის მონაცემების მოპოვება WDN-ებიდან და სხვა მსგავსი მილსადენების ქსელებიდან (მაგალითად, ბუნებრივი აირის, ნავთობის, კანალიზაციის). WDN-ები, როგორც წესი, ძალიან დიდია (მილიონობით კვანძი გადაჭიმულია 100000 კმ-ზე). პრობლემა ილუსტრირებულია ნახ. 8.4-ზე, სადაც დაბინძურება ხდება WDN-ის მოცემულ კვანძში. დამაბინძურებელი ნივთიერებები სწრაფად ვრცელდება WDN-ში, განსხვავებული დონეებითა და დინამიკური რეაგირების სიგნალებით.

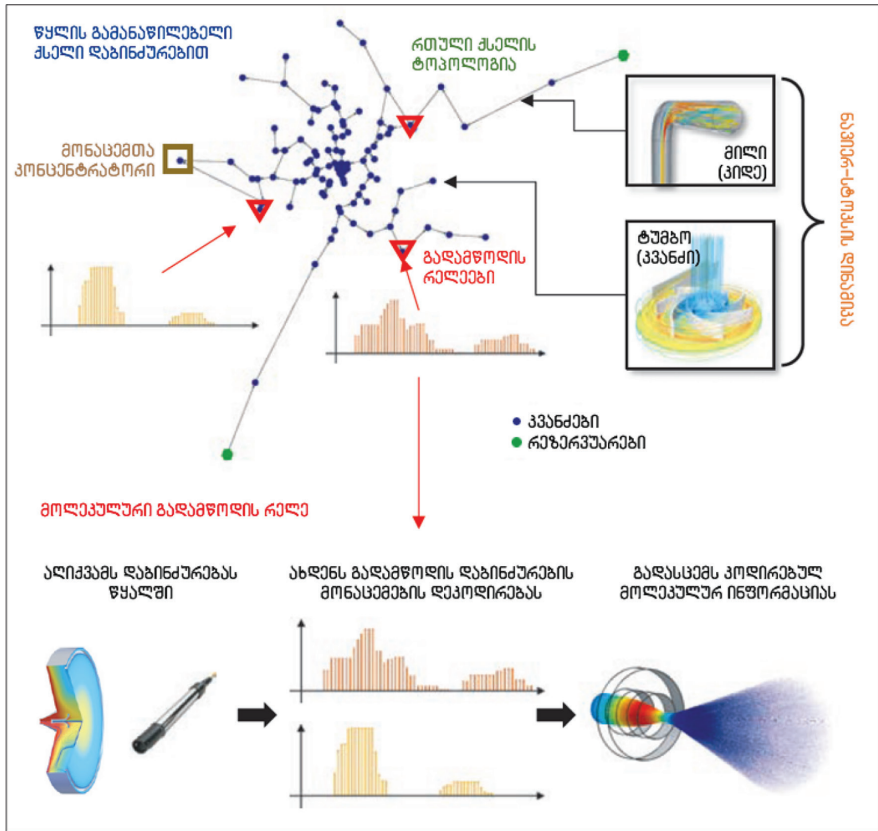
სარელეო ქსელი ნავიერ-სტოკსის დინამიკით: MC გვამღევს შესაძლებლობას გადავავაზვნოთ ხელოვნური მოლეკულური სიგნალები რამდენიმე გადამწოდიდან მონაცემთა ერთ კონცენტრატორში (იხ. სარელეო არხი, ნახ. 8.4). ეს შეიძლება ფორმულირდეს, როგორც ჩვეულებრივი სარელეო არხი, სადაც:

- WDN დინამიკა არის მრავალგზიანი არხი, სადაც დროში ცვალებად მოთხოვნილებებს და მრავალ ქსელურ გზას მივყავართ მრავალ სიგნალამდე;
- დაბინძურება იწყება წყაროდან;
- მონაცემთა კონცენტრატორი არის დანიშნულების პუნქტი, მაგრამ მას არ შეუძლია დამოუკიდებლად მოახდინოს წყაროს დამაბინძურებლის ატრიბუტების დეკოდირება მისი დაშორებულობის და WDN-ზე მრავალგზიანი დანაკარგების გამო;
- MC მოწყობილობები არის WDN-ში სტრატეგიულად განაწილებული რელეები, რომლებსაც შეუძლია წყაროს დაბინძურების გაცნობიერება და ალტერნატიულ უვნებელ მოლეკულურ სიგნალს გადასცემს მონაცემთა კონცენტრატორს.

მრავალი MC სარელეო მოწყობილობა ერთად, მონაცემთა მიზნობრივ კონცენტრატორს საშუალებას აძლევს გაიგოს დაბინძურების დინამიკა WDN-ში.

რელეების განთავსება ფურიეს გრაფული გარდაქმნის (GFT) ოპერატორების გამოყენებით: რელეები სტრატეგიულად უნდა განთავსდეს WDN-ის ორთოგონალური კომპონენტების შესაბამისად (ნახ. 8.4). ისეთ ქსელებში, როგორცაა WDN, უნდა იყოს გათვალისწინებული ორი ასპექტი:

1. WDN-ის ტოპოლოგია;
2. ნავიერ-სტოკსის წყლის ნაკადის დინამიკა (ასახულია ნაწილობრივი დიფერენციალური განტოლების ფუნქციის ან ნაკადის მონაცემების მეშვეობით).



ნახ. 8.4. წყლის გამანაწილებელი ქსელის დაზინძურების მონიტორინგი მოლეკულური სარელეო კომუნიკაციის გამოყენებით. ჩატარებულია მაკრომასშტაბიანი სიმულაციები EPANET2-ის გამოყენებით და მიკრო სიმულაციები COMSOL-ის გამოყენებით CFD-ის მიხედვით და ნაწილაკების თვალყურის დევნების მოდულებზე დაყრდნობით

როგორც ასეთი, თითოეული შემართებული კვანძი არა მხოლოდ დაკავშირებულია სხვა კვანძებთან, არამედ მას ასევე აქვს მრავალგანზომილებიანი დინამიკური სიგნალები (მაგალითად: კონცენტრაცია, წნევა, ნაკადის სიჩქარე). ისეთ მეთოდებს, როგორცაა შეკუმშული ზონდირება (CS) და GFT ოპერატორები, შეუძლია WDN დინამიკის გარდაქმნა გამეჩხერებულ მატრიცად, რომელიც შეიცავს ამონარჩევების ცვალებად ან სტატიკურ ადგილმდებარეობებს MC რეგულირების განლაგებისთვის:

- CS-ს შეუძლია გამოავლინოს დინამიკური რელეების ადგილმდებარეობის ოპტიმალური უმცირესი ნაკრები. თუმცა, მათი ადგილმდებარეობა იცვლება ყოველ საფეხურზე და შესაბამისად, საჭიროა რელეების უფრო დიდი ნაკრების განთავსება და მათი დროთა განმავლობაში ჩართვა და გამორთვა;
- GFT-ს შეუძლია გამოავლინოს სტატიკური რელეების ადგილმდებარეობის ოპტიმალური უმცირესი ნაკრები. მიუხედავად იმისა, რომ განთავსება სტატიკურია, დროის ნებისმიერ მოცემულ მომენტში, ეს უფრო დიდი ნაკრებია, ვიდრე CS-ის შემთხვევაში.

ორივე, CS და GFT მიდგომა გვთავაზობს გზას, სტრატეგიულად განლაგებული ორთოგონალური რელეების მიერ დაბინძურების დინამიკის გამოსავლენად და MC სიგნალების გადასაცემად, დანიშნულების მონაცემთა კონცენტრატორში მათი ანალიზისთვის (ნახ. 8.4). ამის შემდეგ, ამ სარელეო მონაცემებს შეუძლია ადადგინოს WDN მდგომარეობა თითოეულ კვანძში.

ქიმიურ ტექნოლოგიაში კატალიზი ბევრი რეაქციის მნიშვნელოვანი ეტაპია. კატალიზატორის ფენა არის ფოროვანი გარემო, რომელშიც ქიმიური ნივთიერებები გადის და შემდეგ შედის რეაქციაში კატალიზატორის ფენასთან. ხშირად ეს კეთდება მაღალ ტემპერატურასა და წნევაზე მაღალი აკუსტიკური, ელექტრომაგნიტური ხმაურის თანხლებით. მნიშვნელოვანია რეაქციის სიჩქარის, კატალიზატორის ფენის მდგომარეობის (გამოფიტვა და სტრუქტურა) და ასევე ქიმიკატების სიჩქარის გაგება, რომლებიც გადიან ამ ფენაში. სამრეწველო ზონდირებაში არსებული მეთოდები მოიცავს მაგნიტური ნაწილაკების გამოყენებას, რომელთა მიმართვა და თვალყურის დევნება შესაძლებელია. თუმცა, ისინი კარგად ვერ უმკლავდებათ რთულ სტრუქტურებს, მაგალითად, როგორცაა ფოროვანი გარემო. ლიტერატურაში შემოთავაზებულია მოლეკულური სიგნალების გამოყენება ფოროვანი გარემოს მდგომარეობის დასადგენად, ასევე რეაქციის სიჩქარისა და ნაკადის სიჩქარის დასაკვირვებლად. ეს მიიღწევა

რეაქციაზე დაფუძნებული ფოროვანი გარემოს გარღვევის სტატისტიკური მრუდის გამოყენებით. დინამიკური სიგნალების მიმდევრობითი გაგზავნით შესაძლებელია ფოროვანი გარემოს კატალიზატორის ფენის სტატისტიკური პარამეტრების დადგენა.

8.5. მერვე თავის დასკვნა და 6G-ის მომავლის განხილვა

6G და მომავალი უსადენო ქსელები სავარაუდოდ იმუშავებენ ექსტრემალურ და ამჟამინდელთან შედარებით რთულ გარემოში. ეს გარემო, სავარაუდოდ, წარმოდგენილი იქნება როგორც უკიდურესად:

1. დიდი დანაკარგების მქონე (მაგალითად, შეწოვის და შთანთქმის გამო);
2. წინააღმდეგობრივი (მაგალითად, ჩახშობის და მონაცემების ხელში ჩაგდების გამო);
3. არათავსებადი რადიოტალღების მიმართ (მაგალითად, ბიოლოგიური უსაფრთხოების ან ზომის შეზღუდვების გამო).

შესაბამისად, ჩვენ მოტივირებული ვართ განვიხილოთ მოლეკულური საკომუნიკაციო სისტემები. ვყოფთ გამოყენების სფეროებს სამ მრავალმასშტაბიან სექტორად:

- **ადამიანის სხეული:** ჩვენი სხეულის შიგნით მოლეკულურ სიგნალებს შეუძლია იმოქმედოს, როგორც კოორდინაციის ბრძანებებს გადამწოდებს შორის, რომლებიც ასრულებს სინქრონიზებულ გამჟღავნებას და წამლის მიწოდებას (წამლის ქრონომიწოდება). მათ შეუძლიათ მიაღწიონ კოორდინაციას მიკრორობოტებს შორის ლოკალური მასშტაბით (მიკრონები) და უზრუნველყონ სისხლის ნაკადში ჰორმონალურ გზებთან ერთობლივი მოქმედება (მაკრო). ეს ახდენს ნანოსაგნების ინტერნეტის ხედვის რეალიზაციას, რომელიც დღეისთვის უკვე კარგად არის ჩამოყალიბებული;
- **მრეწველობა:** რთული ფიზიკური სისტემები, რომლებიც ჩაშენებულია ან არსებობს რთულ (მაგალითად, ღრმა მიწისქვეშა, ღრმა

ოკეანის, მაღალი ტემპერატურისა და წნევის, მაღალი ხმაურის, მაღალი ტოქსიკურობის) გარემოში, საჭიროებს ახალ კიბერ-ფიზიკურ სისტემებს მათი „ჯანმრთელობის“ მონიტორინგისთვის. როდესაც ტალღაზე დაფუძნებული კომუნიკაცია ვერ ხერხდება, დადგენილია, რომ გამოსაყენებლად, სავარაუდოდ, წარმატებული იქნება მოლეკულური სიგნალები. მათ მოუწევთ გავრცელება კომპლექსურ გარემოში, რომელიც მოიცავს უზარმაზარ სითხოვან ქსელებს და კატალიზატორის ფენებს, და დაემორჩილებიან რთულ ბიოლოგიურ და ქიმიურ რეაქციებს. დღეისათვის უკვე შემოთავაზებულია სისტემა, რომელიც უზრუნველყოფს ჩამდინარე წყლების მონიტორინგს მოლეკულური საკომუნიკაციო რობოტების გამოყენებით;

- **თავდაცვა:** ელექტრომაგნიტური ტალღებით გადატვირთული საბრძოლო სივრცე ნიშნავს, რომ საჭიროა კომუნიკაციების ისეთი ახალი მეთოდების შემუშავება, რომლებსაც ექნება ელექტრომაგნიტურ გამოყენებებთან შედარებით მეტი იმუნიტეტი კონტრზომების მიმართ, მეტი მდგრადობა მიყურადების მიმართ, ბრძოლისუნარიანობა იმ არასასურველი პროცესების მიმართ, რომელიც შეიძლება დიდი ხნის განმავლობაში გაგრძელდეს მტრულ გარემოში.

ამრიგად, სამეცნიერო-კვლევითი საზოგადოების მიერ ბოლო რამდენიმე წლის განმავლობაში გაწეული ძალისხმევის წყალობით, მოლეკულური კომუნიკაციის სფერომ მოიპოვა იმპულსი. ჩვენ ვხედავთ, თუ როგორ მუშავდება ამ მიმართულების ახალი კვლევითი პროექტები მთელ მსოფლიოში, კლასიკური კომუნიკაციის თეორიის მასობრივი გავრცელების პირობებისადმი მარტივი მისადაგებიდან, ჯანდაცვის, მრეწველობისა და თავდაცვის სერიოზული გამოწვევების გადაჭრამდე. და ეს ყოველივე ხორციელდება ბიოფიზიკის შერწყმით ინფორმაციის თეორიასთან. აქ, ამ მრავალდისციპლინურ ლანდშაფტში, ჩვენ ვხვდებით ინტე-

რდისციპლინარული ცოდნის საჭიროებას, რაც მოიცავს ჰიდროდინამიკას, სინთეზურ ბიოლოგიას და ინფორმაციის თეორიას.

დაბოლოს, აღვნიშნავთ, რომ 6G-ის მომავალ სამიტებზე ფართოდ არის დაგეგმილი მიკრომასშტაბიანი და მაკრომასშტაბიანი MC-ის პოტენციალის განხილვა მომავალი თაობის უსადენო საკომუნიკაციო სისტემებში ინტეგრირებისათვის, ახალი საინტერესო აპლიკაციების წარმოდგენა, რომელთა განხორციელებაც შესაძლებელი იქნება MC-ის ჩართულობით და სხვადასხვა სამეცნიერო-კვლევითი სამუშაოების შედეგების მიწოდება, რომლებიც მიმდინარეობს ამ სფეროში.

ბოლოთქმა

მობილური კომუნიკაციები ყოველ ათ წელიწადში ერთხელ განიცდის თაობათა ცვლილებას. თუმცა ე.წ. G-ებს შორის დროის სხვაობაც იკლებს. მიუხედავად იმისა, რომ 5G სისტემები ახლახან გახდა კომერციული რეალობა, უკვე გაჩნდა მნიშვნელოვანი ინტერესი 6G სისტემების მიმართ. შემდეგი თაობის სისტემების განვითარება განპირობებულია არა მხოლოდ მობილური ტრაფიკის და მობილური მომხმარებლების ექსპონენტური ზრდით, არამედ ჰორიზონტზე გამოჩენილი ახალი „გამრღვევი“ სერვისებითა და აპლიკაციებით. გარდა ამისა, ის ასევე განპირობებულია მობილური საკომუნიკაციო საზოგადოების შინაგანი საჭიროებით, მუდმივად გააუმჯობესოს ქსელის ეფექტიანობა, კერძოდ: დანახარჯების ეფექტიანობა, ენერგოეფექტიანობა, სპექტრული და ოპერაციული ეფექტიანობა. მოწინავე ტექნოლოგიების გამოჩენით, საკომუნიკაციო ქსელს შეუძლია ჩამოყალიბდეს უფრო მძლავრ და ეფექტიან სისტემად, რომელიც უკეთ დააკმაყოფილებს არსებული სერვისების მოთხოვნებს და საფუძველს ჩაუყრის სრულიად ახალი სერვისების შეთავაზების შესაძლებლობას, რომელთა მსგავსიც აქამდე არასდროს უნახავთ.

წინამდებარე წიგნში მოცემულია 6G-ის მიმოხილვა, რომელიც გაკეთებულია უახლეს პუბლიკაციებსა და სამეცნიერო მიღწევებზე დაყრდნობით. ამ წიგნის მთავარი მიზანია შეისწავლოს ევოლუცია არსებული 5G ქსელებიდან მომავალი 6G ქსელებისკენ მომსახურების, რადიოინტერფეისის და ქსელის პერსპექტივებიდან გამომდინარე, რითაც, ჩვენი აზრით, უნდა ჩამოყალიბდეს ხედვა 6G ქსელების მიმართულებით. ეს წიგნი არა მხოლოდ განიხილავს 6G-ის გამოყენების პოტენციურ შემთხვევებს, მოთხოვნებსა და მახასიათებლებს, არამედ შეისწავლის განვითარებად ტექნოლოგიებს და თემებს, როგორცაა ხელოვნური ინტელექტი, ტერაპერტული და მოლეკულური კომუნიკაციები, რეკონფიგურირებადი ინტელექტუალური ზედაპირები, პარალელური არაწრფივი

დამუშავება, უპილოტო საფრენი აპარატები, ფართომასშტაბიანი თანამგზავრული თანავარსკვლავედები. ეს წიგნი წარმოგვიდგენს ამ ახალ სფეროებში ბოლოდროინდელი მიღწევების სისტემურ განხილვას და მათ როლს მომავალში ვერტიკალების ფართო სპექტრის მხარდაჭერაში. დაბოლოს, წიგნი ასევე წარმოგვიდგენს შესაძლო გამოწვევებს და კვლევით მიმართულებებს, რომლებიც ხელს შეუწყობს 6G მობილური უსადენო ქსელების სამომავლო განვითარებას.

წინამდებარე წიგნის და ლიტერატურის ნაწილში წარმოდგენილი, ჩვენ მიერ ბოლო ორი წლის განმავლობაში გამოცემული წიგნების კოტენციურ პოზიტიურ შედეგად მიგვაჩნია ის, რომ მათში გამოკვეთილი მნიშვნელოვანი მიმართულებები, რომელთაგანაც შემხებლობა ექნებათ ციფრული კომუნიკაციის დარგში საქართველოში მოღვაწე მეცნიერებსა და ტექნოლოგებს, უდაოდ დაახლოებს მათ საერთაშორისო სამეცნიერო ორბიტასთან.

ბევრი მცდელობის მიუხედავად, გვერდი ვერაფრით ავუარეთ უამრავ გადაუჭრელ ტერმინოლოგიურ პრობლემას, რომელთა დაძლევაც ჩვენთვის შეუძლებელი იყო; ამასთან დაკავშირებით მკითხველს ბოდიში გვინდა მოვუხადოთ.

შეუძლებელია მადლიერებით არ მოვიხსენიოთ საქართველოს კომუნიკაციების კომისიის უანგარო მხარდაჭერა. ასევე, მადლობა გვინდა გადავუხადოთ აკადემიურ დოქტორ მამუკა ჩხაიძეს, წიგნის მომზადებისას გაწეული დახმარებისთვის.

სერგო შავგულიძე, ნოდარ უღრელიძე
თბილისი, აპრილი, 2022 წელი.

ლიტერატურა

წინასიტყვაობაში და ბოლოთქმაში გამოყენებული ლიტერატურა

H. Viswanathan and P. E. Mogensen, “Communications in the 6G Era,” *IEEE Access*, vol. 8, Mar. 2020, pp. 57,063–74.

Ericsson, “Ever-present intelligent communication,” Nov. 6, 2020; <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/white-papers/a-research-outlook-towards-6g>.

Hexa-X, European Flagship 6G Project; <https://hexa-x.eu/>

Resilient & Intelligent NextG Systems (RINGS); <https://www.nsf.gov>

ITU Focus Group on Technologies for Network 2030, May 2019.

ს. შავგულიძე, ნ. უღრელიძე. მეექვსე თაობის (6G) უსადენო საკომუნიკაციო ქსელები და სისტემები. კავკასიის უნივერსიტეტის გამომცემლობა, თბილისი, 2021. 224 გვ.

ს. შავგულიძე, ნ. უღრელიძე. Wi-Fi: თანამედროვე სტანდარტები და განვითარების ტენდენციები. საქართველოს კომუნიკაციების კომისია, გამომცემელი მერაბ ქათამაძე, თბილისი, 2021. 159 გვ.

ნ. უღრელიძე, ს. შავგულიძე. ციფრული კავშირის სისტემების შემუშავება რადიორეზისტენტისათვის. კავკასიის უნივერსიტეტის გამომცემლობა, თბილისი, 2020. 154 გვ.

ს. შავგულიძე, ნ. უღრელიძე, თ. მთვრალაშვილი. ხელშემლამდგრადი კოდირების თეორიული საფუძვლები. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის გამომცემლობა, თბილისი, 2021. 204 გვ.

პირველი თავში გამოყენებული ლიტერატურა

N. Auguin *et al.*, “Large-Dimensional Behavior of Regularized Maronna’s M-Estimators of Covariance Matrices,” *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 66, no. 13, July 2018, pp. 3529–3542.

M. Chen *et al.*, “Artificial Neural Networks-Based Machine Learning for Wireless Networks: A Tutorial,” *IEEE Commun. Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 4, 2019, pp. 3039–3071.

H. T. Chen, A. J. Taylor, and N. Yu, “A Review of Metasurfaces: Physics and Applications,” *Reports on Progress in Physics*, vol. 79, no. 7, 076401, 2016.

M. Giordani *et al.*, “Toward 6G Networks: Use Cases and Technologies,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 58, no. 3, Mar. 2020, pp. 55–61.

G. Interdonato *et al.*, “Local Partial Zero-Forcing Precoding for Cell-Free Massive MIMO,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 19, no. 7, July 2020, pp. 4758–4774.

G. Interdonato *et al.*, “Ubiquitous Cell-Free Massive MIMO Communications,” *EURASIP J. Wireless Commun. Net.*, vol. 2019, no. 1, 2019, p. 197.

M. Matthaiou *et al.*, “The Road to 6G: Ten Physical Layer Challenges for Communications Engineers,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 59, no. 1, Jan. 2021, pp. 64–69.

M. Naftaly *et al.*, “Metrology State-of-the-art and Challenges in Broadband Phase-Sensitive Terahertz Measurements,” *Proc. IEEE*, vol. 105, no. 6, June 2017, pp. 1151–1165.

H. Q. Ngo *et al.*, “Cell-Free Massive MIMO Versus Small Cells,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 16, no. 3, Mar. 2017, pp. 1834–1850.

H. Q. Ngo *et al.*, “On the Total Energy Efficiency of Cell-Free Massive MIMO,” *IEEE Trans. Green Commun. Net.*, vol. 2, no. 1, 2017, pp. 25–39.

H. Q. Ngo and E. G. Larsson, “EVD-Based Channel Estimation in Multi-cell Multiuser MIMO Systems with Very Large Antenna Arrays,” *Proc. IEEE ICASSP*, 2012, pp. 3249–3252.

T. S. Rappaport *et al.*, “Wireless Communications and Applications Above 100 GHz: Opportunities and Challenges for 6G and Beyond,” *IEEE Access*, vol. 7, 2019, pp. 78729–78757.

W. Saad, M. Bennis, and M. Chen, “A Vision of 6G Wireless Systems: Applications, Trends, Technologies, and Open Research Problems,” *IEEE Network*, vol. 34, no. 3, May/June 2020, pp. 134–142.

F. Venneri *et al.*, “An Improved Synthesis Algorithm for Reflectarrays Design,” *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 4, Aug. 2005, pp. 258–261.

P. Yang *et al.*, “6G Wireless Communications: Vision and Potential Techniques,” *IEEE Network*, vol. 33, no. 4, July/Aug. 2019, pp. 70–75.

O. Yurduseven *et al.*, “Dynamically Reconfigurable Holographic Metasurface Aperture for a Mills-Cross Monochromatic Microwave Camera,” *Optics Express*, vol. 26, no. 5, 2018, pp. 5281–5291.

მეორე თავში გამოყენებული ლიტერატურა

E. Basar *et al.*, “Wireless Communications Through Reconfigurable Intelligent Surfaces,” *IEEE Access*, vol. 7, 2019, pp. 116753–116773.

T. Bai *et al.*, “Latency Minimization for Intelligent Reflecting Surface Aided Mobile Edge Computing,” *IEEE JSAC*, vol. 38, no. 11, 2020, pp. 2666–2682.

W. Chen *et al.*, “Angle dependent Phase Shifter Model for Reconfigurable Intelligent Surfaces: Does the Angle-Reciprocity Hold?,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 24, no. 9, 2020, pp. 2060–2064.

M. Cui, G. Zhang, and R. Zhang, “Secure Wireless Communication Via Intelligent Reflecting Surface,” *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 8, no. 5, 2019, pp. 1410–1414.

T. J. Cui *et al.*, “Coding Metamaterials, Digital Metamaterials and Programmable Metamaterials,” *Light: Science & Applications*, vol. 3, no. 10, 2014, p. e218.

Z. Ding and H. Vincent Poor, “A Simple Design of IRS-Noma Transmission,” *IEEE Commun. Letters*, vol. 24, no. 5, 2020, pp. 1119–1123.

M. Di Renzo *et al.*, “Smart Radio Environments Empowered by Reconfigurable Intelligent Surfaces: How It Works, State of Research, and the Road Ahead,” *IEEE JSAC*, vol. 38, no. 11, 2020, pp. 2450–2525.

Y. Han *et al.*, “Large Intelligent Surface-Assisted Wireless Communication Exploiting Statistical CSI,” *IEEE Trans. Vehic. Tech.*, vol. 68, no. 8, 2019, pp. 8238–8242.

C. Pan *et al.*, “Multicell MIMO Communications Relying on Intelligent Reflecting Surfaces,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 19, no. 8, 2020, pp. 5218–5233.

C. Pan et al., “Intelligent Reflecting Surface Aided MIMO Broadcasting for Simultaneous Wireless Information and Power Transfer,” *IEEE JSAC*, vol. 38, no. 8, 2020, pp. 1719–1734.

C. Pan et al., “Reconfigurable Intelligent Surfaces for 6G Systems: Principles, Applications, and Research Directions,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 59, no. 6, Jun. 2021, pp. 14–20.

F. Tariq et al., “A Speculative Study On 6G,” *IEEE Wireless Commun.*, vol. 27, no. 4, Aug. 2020, pp. 118–125.

Q. Wu and R. Zhang, “Toward Smart and Reconfigurable Environment: Intelligent Reflecting Surface Aided Wireless Network,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 58, no. 1, Jan. 2020, pp. 106–112.

G. Zhou et al., “Intelligent Reflecting Surface Aided Multigroup Multicast MISO Communication Systems,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 68, 2020, pp. 3236–3251.

G. Zhou et al., “A Framework of Robust Transmission Design for IRS-Aided MISO Communications with Imperfect Cascaded Channels,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 68, 2020, pp. 5092–5106.

მესამე თავში გამოყენებული ლიტერატურა

H. Aghasi and P. Heydari, “Millimeter-Wave Radars-on-Chip Enabling Next-Generation Cyberphysical Infrastructures,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 58, no. 12, Dec. 2020, pp. 70–76.

I. F. Akyildiz et al., “Combating the Distance Problem in the Millimeter-Wave and Terahertz Frequency Bands,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 56, no. 6, June 2018, pp. 102–108.

Z. Chen et al., “Terahertz Wireless Communications for 2030 and Beyond: A Cutting-Edge Frontier,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 59, no. 11, November 2021, pp. 66–72.

M. Giordani et al., “Toward 6G Networks: Use Cases and Technologies,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 58, no. 3, Mar. 2020, pp. 55–61.

H. He *et al.*, “Model-Driven Deep Learning for Physical Layer Communications,” *IEEE Wireless Commun.*, vol. 26, no. 5, Oct. 2019, pp. 77–83.

C. Huang *et al.*, “Multi-Hop RIS-Empowered Terahertz Communications: A DRL-Based Hybrid Beamforming Design,” *IEEE JSAC*, vol. 39, no. 6, 2021, pp. 1663–1677.

K. B. Letaief *et al.*, “The Roadmap to 6G: AI Empowered Wireless Networks,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 57, no. 8, Aug. 2019, pp. 84–90.

C. Liaskos *et al.*, “End-to-End Wireless Path Deployment with Intelligent Surfaces Using Interpretable Neural Networks,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 68, no. 11, 2020, pp. 6792–6806.

F. Liu *et al.*, “Joint Radar and Communication Design: Applications, State-of-the-Art, and the Road Ahead,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 68, no. 6, 2020, pp. 3834–3862.

V. Petrov *et al.*, “On Unified Vehicular Communications and Radar Sensing in Millimeter-Wave and Low Terahertz Bands,” *IEEE Wireless Commun.*, vol. 26, no. 3, June 2019, pp. 146–153.

M. Polese *et al.*, “Toward End-to-End, Full-Stack 6G Terahertz Networks,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 58, no. 11, Nov. 2020, pp. 48–54.

W. Saad *et al.*, “A Vision of 6G Wireless Systems: Applications, Trends, Technologies, and Open Research Problems,” *IEEE Network*, vol. 34, no. 3, May/June 2020, pp. 134–142.

H. Tataria *et al.*, “6G Wireless Systems: Vision, Requirements, Challenges, Insights, and Opportunities,” *Proc. IEEE*, vol. 109, no. 7, 2021, pp. 1166–1199.

W. Tong and P. Zhu, *6G: The Next Horizon: From Connected People and Things to Connected Intelligence*, Cambridge Univ. Press, 2021.

L. Yan *et al.*, “A Dynamic Array-of-Subarrays Architecture and Hybrid Precoding Algorithms for Terahertz Wireless Communications,” *IEEE JSAC*, vol. 38, no. 9, 2020, pp. 2041–2056.

A. Zhang *et al.*, “Perceptive Mobile Network: Cellular Networks with Radio Vision Via Joint Communication and Radar Sensing,” *IEEE Vehic. Tech. Mag.*, vol. 16, no. 2, 2020, pp. 20–30.

მეოთხე თავში გამოყენებული ლიტერატურა

M.-A. Arfaoui *et al.*, “Efficient Sphere Detector Algorithm for Massive MIMO Using GPU Hardware Accelerator,” *Procedia Computer Science*, vol. 80, Jan. 2016, pp. 2169–2180.

L. Barbero and J. Thompson, “Fixing the Complexity of the Sphere Decoder for MIMO Detection,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 7, no. 6, June 2008, pp. 2131–2142.

T. Cui and C. Tellambura, “An Efficient Generalized Sphere Decoder for Rank-Deficient MIMO Systems,” *Proc. IEEE VTC*, vol. 5, Sept. 2004, pp. 3689–3693.

C. C. M. Husmann *et al.*, “Flexcore: Massively Parallel and Flexible Processing for Large MIMO Access Points,” *Proc. USENIX NSDI*, 2017, pp. 197–211.

C. Jayawardena and K. Nikitopoulos, “G-multisphere: Generalizing Massively Parallel Detection for Non-Orthogonal Signal Transmissions,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 68, no. 2, Feb. 2020, pp. 1227–2139.

C. M. Jyzsa *et al.*, “New Parallel Sphere Detector Algorithm Providing High-Throughput for Optimal MIMO Detection,” *Procedia Computer Science*, vol. 18, Jan. 2013, pp. 2432–2435.

K. Nikitopoulos *et al.*, “Geosphere: Consistently turning MIMO capacity into throughput,” *Proc. ACM SIGCOMM*, vol. 44, 2014, pp. 631–642.

K. Nikitopoulos *et al.*, “Massively Parallel Tree Search for Highdimensional Sphere Decoders,” *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.*, vol. 30, no. 10, Oct. 2019, pp. 2309–2325.

K. Nikitopoulos *et al.*, “Non-Linear Base-Station Processing Within a 3GPP Compliant Framework,” *IEEE Access*, vol. 9, May 2021, pp. 72066–72077.

K. Nikitopoulos *et al.*, “Multisphere: Massively Parallel Tree Search for Large Sphere Decoders,” *Proc. IEEE GLOBECOM*, 2016, pp. 1–6.

K. Nikitopoulos, “Massively Parallel, Nonlinear Processing for 6G: Potential Gains and Further Research Challenges,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 60, no. 1, Jan. 2022, pp. 81–87.

M. S. Khairy, C. Mehlfehrer, and M. Rupp, “Boosting Sphere Decoding Speed Through Graphic Processing Units,” *Proc. European Wireless Conf.*, 2010, pp. 99–104.

D. J. Ryan *et al.*, “Performance of Vector Perturbation Multiuser MIMO Systems With Limited Feedback,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 57, no. 9, Sept. 2009, pp. 2633–2644.

C. Studer, A. Burg, and H. Bolcskei, “Soft-Output Sphere Decoding: Algorithms and VLSI Implementation,” *IEEE JSAC*, vol. 26, no. 2, Feb. 2008, pp. 290–300.

მეხუთე თავში გამოყენებული ლიტერატურა

F. A. Aoudia and J. Hoydis, “End-to-End Learning for OFDM: From Neural Receivers to Pilotless Communication,” *IEEE Trans. Wireless Commun.* vol. 21, no. 2, Feb. 2022, pp. 1049–1063.

T. Brown *et al.*, “Language Models Are Few-Shot Learners,” *Proc. Int’l. Conf. Neural Info. Proc. Sys.*, Vancouver, Canada, Dec. 2020.

S. Cammerer *et al.*, “Trainable Communication Systems: Concepts and Prototype,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 68, no. 9, Sept. 2020, pp. 5489–5503.

J. Downey *et al.*, “Machine Learning Remakes Radio,” *IEEE Spectrum*, vol. 57, no. 5, Apr. 2020, pp. 35–39.

J. N. Foerster *et al.*, “Learning to Communicate with Deep Multi-Agent Reinforcement Learning,” *Proc. Int’l. Conf. Neural Info. Proc. Sys.*, Barcelona, Spain, Dec. 2016, pp. 2145–2153.

M. Honkala, D. Korpi, and J. M. Huttunen, “DeepRx: Fully Convolutional Deep Learning Receiver,” *IEEE Trans. Wireless Commun.* vol. 20, no. 6, Jun. 2021, pp. 3925–3940.

K. B. Hoydis *et al.*, “Toward 6G AI-Native Air Interface,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 59, no. 5, May 2021, pp. 76–81.

ITU Focus Group on Technologies for Network 2030 (FG-NET- 2030), “Network 2030: A Blueprint of Technology, Applications and Market Drivers Towards the Year 2030 and Beyond,” white paper, May 2019.

K. B. Letaief *et al.*, “The Roadmap to 6G: AI Empowered Wireless Networks,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 57, no. 8, Aug. 2019, pp. 84–90.

P. Popovski *et al.*, “Semantic-Effectiveness Filtering and Control for Post-5G Wireless Connectivity,” *J. Indian Inst. Sci.*, vol. 100, no. 2, May 2020, pp. 435–443.

B. Rajendran *et al.*, “Low-Power Neuromorphic Hardware for Signal Processing Applications: A Review of Architectural and System-Level Design Approaches,” *IEEE Signal Processing Mag.*, vol. 36, no. 6, Nov. 2019, pp. 97–110.

C. E. Shannon and W. Weaver, *The Mathematical Theory of Communication*, Univ. of Illinois Press, 1949.

A. Valcarce and J. Hoydis, “Towards Joint Learning of Optimal Signaling and Wireless Channel Access,” *IEEE Trans. Cogn. Commun. Netw.* vol. 7, no. 4, Dec. 2021, pp. 1233–1243.

H. Viswanathan and P. E. Mogensen, “Communications in the 6G Era,” *IEEE Access*, vol. 8, Mar. 2020, pp. 57063–56074.

V. Ziegler *et al.*, “6G Architecture to Connect the Worlds,” *IEEE Access*, vol. 8, Sept. 2020, pp. 173508–173520.

მეექვსე თავში გამოყენებული ლიტერატურა

Y. Chen *et al.*, “Efficient Drone Mobility Support Using Reinforcement Learning,” *Proc. IEEE Wireless Commun. and Networking Conf.*, May 2020.

Y. Chen *et al.*, “5G Air-Toground Network Design and Optimization: A Deep Learning Approach,” *Proc. IEEE VTC Spring 2021*, Apr. 2021.

A. Garcia-Rodriguez *et al.*, “The Essential Guide to Realizing 5G Connected UAVs with Massive MIMO,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 57, no. 12, Dec. 2019, pp. 84–90.

G. Geraci *et al.*, “What Will the Future of UAV Cellular Communications Be? A Flight From 5G to 6G,” 2021; <https://arxiv.org/abs/2105.04842>.

M. Giordani and M. Zorzi, “Non-Terrestrial Networks in the 6G Era: Challenges and Opportunities,” *IEEE Network*, vol. 35, no. 2, Mar./Apr. 2020, pp. 244–251.

F. Liu *et al.*, “Integrated Sensing and Communications: Towards Dual-functional Wireless Networks for 6G and Beyond,” 2021; <https://arxiv.org/abs/2108.07165>.

M. Mozaffari *et al.*, “A Tutorial on UAVs for Wireless Networks: Applications, Challenges, and Open Problems,” *IEEE Commun. Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 3, 3rd qtr. 2019, pp. 2334–2360.

M. Mozaffari, X. Lin, and S. Hayes, “Toward 6G with Connected Sky: UAVs and Beyond,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 59, no. 12, Dec. 2019, pp. 74–80.

W. Saad, M. Bennis, and M. Chen, “A Vision of 6G Wireless Systems: Applications, Trends, Technologies, and Open Research Problems,” *IEEE Network*, vol. 34, no. 3, May/June 2019, pp. 134–142.

W. Saad *et al.*, *Wireless Communications and Networking for Unmanned Aerial Vehicles*, Cambridge Univ. Press, Apr. 2020.

E. C. Strinati *et al.*, “6G in the Sky: On-Demand Intelligence at the Edge of 3D Networks,” *ETRI Journal*, vol. 42, no. 5, Oct. 2020, pp. 643–657.

H. Yanikomeroğlu, “Integrated Terrestrial/Non-Terrestrial 6G Networks for Ubiquitous 3D Super-Connectivity,” *Proc. 21st ACM Int’l. Conf. Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, 2018, pp. 3–4.

3GPP TS 22.125, “Unmanned Aerial System (UAS) Support in 3GPP,” Sept. 2020.

3GPP TR 23.755, “Study on Application Layer Support for Unmanned Aerial Systems (UAS),” Nov. 2020.

მეზვიდე თავში გამოყენებული ლიტერატურა

G. Charbit *et al.*, “Satellite and Cellular Networks Integration — A System Overview,” *EuCNC & 6G Summit*, June 2021.

C. E. Fossa *et al.*, “An Overview of the IRIDIUM® Low Earth Orbit (LEO) Satellite System,” *Proc. IEEE 1998 National Aerospace and Electronics Conf.*, 1998, pp. 152–159.

R. De Gaudenzi *et al.*, “Future Technologies for Very High Throughput Satellite Systems,” *Int’l. J. Satellite Commun. Network*, vol. 38, no. 2, Feb. 2020, pp. 141–161.

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. 244–251.

M. Harris, “Tech Giants Race to Build Orbital Internet,” *IEEE Spectrum*, vol. 55, no. 6, June 2018, pp. 10–11.

O. Kodheli *et al.*, “Random Access Procedure Over Non-Terrestrial Networks: From Theory to Practice,” *IEEE Access*, vol. 9, 2021 pp. 109130–109143.

X. Lin *et al.*, “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.

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,” *68th Int’l. Aeronautical Conf.*, Oct. 2018.

RP-210908, “Solutions for NR to Support Non-Terrestrial Networks (NTN),” 3GPP TSG RAN #91e, Mar. 2021.

RP-193235, “Study on NB-IoT/eMTC Support for Non-Terrestrial Network,” 3GPP TSG-RAN Meeting #86, Dec. 2019.

L. Schiff and A. Chockalingam, “Signal Design and System Operation of Globalstar™ versus IS-95 CDMA — Similarities and Differences,” *Wireless Networks*, vol. 6, Feb. 2000, pp. 47–57.

M. N. Sweeting, “Modern Small Satellites – Changing the Economics of Space,” *Proc. IEEE*, vol. 106, no. 3, Mar. 2018, pp. 343–361.

TR 38.821, “Solutions for NR to Support Non-Terrestrial Networks (NTN),” V16.0.0, Jan. 2020.

TR 36.763, “Study on Narrow-Band Internet of Things (NB-IoT)/Enhanced Machine Type Communication (eMTC) Support for Non-Terrestrial Networks (NTN),” V1.0.0, June 2021.

E. Yaacoub and M. Alouini, “A Key 6G Challenge and Opportunity — Connecting the Base of the Pyramid: A Survey on Rural Connectivity,” *Proc. IEEE*, vol. 108, no. 4, Apr. 2020, pp. 533–582.

მერვე თავში გამოყენებული ლიტერატურა

M. Abbaszadeh *et al.*, “Mutual Information and Noise Distributions of Molecular Signals Using Laser Induced Fluorescence,” *IEEE GLOBECOM*, Dec 2019.

M. Abbaszadeh, P. J. Thomas, and W. Guo, “Towards High Capacity Molecular Communications Using Sequential Vortex Rings,” *IEEE Trans. Molecular, Biological and Multi-Scale Communications*, vol. 4, no. 1, Mar. 2018, pp. 39–42.

I. F. Akyildiz, M. Pierobon, and S. Balasubramaniam, “Moving Forward with Molecular Communication: From Theory to Human Health Applications,” *Proc. IEEE*, vol. 107, no. 5, May 2019, pp. 858–865.

N. Bell and U. Keyser, “Digitally Encoded DNA Nanostructures for Multiplexed, Single-Molecule Protein Sensing with Nanopores,” *Nature Nanotech.*, vol. 11, 2016, pp. 645–651.

B. A. Bilgin, E. Dinc, and O. B. Akan, “DNA-Based Molecular Communications,” *IEEE Access*, vol. 6, 2018, pp. 73119–73129.

Y. Fang *et al.*, “Molecular Information Delivery in Porous Media,” *IEEE Trans. Molecular, Biological and Multi-Scale Communications*, vol. 4, no. 4, Dec. 2018, pp. 257–262.

W. Guo *et al.*, “Eavesdropper Localization in Random Walk Channels,” *IEEE Commun. Letters*, vol. 20, no. 9, Sept. 2016, pp. 1776–1779.

W. Guo *et al.*, “Molecular Physical Layer for 6G in Wave-Denied Environments,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 59, no. 5, May 2021, pp. 33–39.

E. Kennedy *et al.*, “Spatiotemporal Information Preservation in Turbulent Vapor Plumes,” *Applied Physics Letters*, vol. 112, 2018.

B. Li *et al.*, “CSI-Independent Non-Linear Signal Detection in Molecular Communications,” *IEEE Trans. Signal Proc.*, vol. 68, 2020, pp. 97–112.

D. T. McGuinness *et al.*, “Experimental Results on the Open-Air Transmission of Macro-Molecular Communication Using Membrane Inlet Mass Spectrometry,” *IEEE Commun. Letters*, vol. 22, no. 12, Dec. 2018, pp. 2567–2570.

S. Qiu *et al.*, “Under-Water Molecular Signalling: A Hidden Transmitter and Absent Receivers Problem,” *IEEE ICC*, 2015.

N. Tuccitto *et al.*, “Reactive Messengers for Digital Molecular Communication with Variable Transmitter? Receiver Distance,” *ACS Physical Chemistry*, 2018.

B. D. Unluturk and I. F. Akyildiz, “An End-to-End Model of Plant Pheromone Channel for Long Range Molecular Communication,” *IEEE Trans. Nanobioscience*, vol. 16, no. 1, 2017, pp. 11–20.

Z. Wei *et al.*, “High-Dimensional Metric Combining for Non-Coherent Molecular Signal Detection,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 68, no. 3, 2020, pp. 1479–1493.

Z. Wei *et al.*, “Monitoring Embedded Flow Networks Using Graph Fourier Transform Enabled Sparse Molecular Relays,” *IEEE Commun. Letters*, vol. 24, no. 5, 2020, pp. 986–990.

აბრევიატურები და აკრონიმები

3GPP – Third Generation Partnership Project – მე-3 თაობის პარტნიორობის პროექტი

A2G – Air-to-Ground – ჰაერი-მიწა

ADC – Analog-to-Digital Converter – ანალოგურ-ციფრული გარდამქმნელი

AI – Artificial Intelligence – ხელოვნური ინტელექტი

AI-AI – Artificial Intelligence based Air Interface – ხელოვნურ ინტელექტზე დაფუძნებული რადიოინტერფეისი

AoA/AoD – Angle of Arrival/Departure – (ტალღის) მოსვლის/გასვლის კუთხე

AoSA – Array-of-Subarray Architecture – ქვემესრებიდან მესრის შექმნის არქიტექტურა

AP – Access Point – წვდომის წერტილი

BER – Bit Error Rate – ბიტზე შეცდომის ალბათობა

bi-DNN – bi-Deep Neural Network – ორმაგი სიღრმის ნეირონული ქსელი

BLER – Block Error Rate – ბლოკზე შეცდომის ალბათობა

BP – Belief Propagation – დაჯერებულობის გავრცელება

BS – Base Station – საბაზო სადგური

CDL-B – Clustered Delay Line - B – კლასტერული შეყოვნების ხაზი - B

CFD – Computational Fluid Dynamics – გამოთვლითი ჰიდროდინამიკა

CPU – Central Processing Unit – ცენტრალური მმართველი ბლოკი

CR – Cognitive Radio – შემეცნებითი რადიო

CS – Compressed Sensing – შეკუმშული ზონდირება

CSI – Channel State Information – არხის მდგომარეობის შესახებ ინფორმაცია

CSK – Concentration Shift Keying – მანიპულაცია კონცენტრაციის წანაცვლებით

D – Dimension – განზომილება

DAC – Digital-to-Analog Converter – ციფრულ-ანალოგური გარდამქმნელი

DAoSA – Dynamic Array-of-Subarray Architecture – დინამიკური ქვემესრებიდან მესრის შექმნის არქიტექტურა

DL – Deep Learning – ღრმა სწავლება

DNN – Deep Neuron Learning – ღრმა ნეირონული ქსელი

DRL – Deep Reinforcement Learning – ღრმა განმტკიცებელი სწავლება

DS – Dynamic Subarray – დინამიკური ქვემესერი

DVB – Digital Video Broadcasting – ციფრული ვიდეომარჯვებლობა

EIRP – Effective Isotropic Radiated Power – ეფექტიანი იზოტროპულად გასხივებული სიმძლავრე

ER – Energy Receiver – ენერჯის მიმღები

ESIM – Earth Station In Motion – დედამიწის სადგური მოძრაობაში

ETSI – European Telecommunications Standards Institute – ევროპის სატელეკომუნიკაციო სტანდარტების ინსტიტუტი

FAA – Federal Aviation Administration – ფედერალური საავიაციო ადმინისტრაცია

FC – Full Connected – სრულად დაკავშირებული

FCSD – Fixed-Complexity-Sphere-Decoder – ფიქსირებული სირთულის სფერული დეკოდერი

FD – Full Duplex – სრული დუპლექსი

FDD – Frequency Division Duplex – დუპლექსი სიხშირული დაყოფით

FFT – Fast Fourier Transform – ფურიეს სწრაფი გარდაქმნა

FPGA – Field Programmable Gate Array – პროგრამირებადი კარიბჭის მასივი

FTTD – Fixed TTD – ფიქსირებული TTD

G – Generation – თაობა

G/T – Antenna Gain-to-System Noise Temperature Ratio – ანტენის გაძლიერების კოეფიციენტის და ხმაურის ტემპერატურის ფარდობა

GaN – Gallium Nitride – გალიუმ-ნიტრიდი

GEO – Geostationary Orbit – გეოსტაციონარული ორბიტა

GFT – Graph Fourier Transform – ფურიეს გრაფული გარდაქმნა

GNSS – Global Navigation Satellite System – გლობალური სანავიგაციო თანამგზავრული სისტემა

GPU – Graphics Processing Unit – გრაფიკული დამუშავების ბლოკი

GS – Geometric Shaping – გეომეტრიული ფორმირება

GSMA – Global System for Mobile Communications Association – მობილური კომუნიკაციების გლობალური სისტემის ასოციაცია

GUTMA – Global UTM Association – გლობალური UTM ასოციაცია

HD – Half Duplex – ნახევრად დუპლექსი

HWI – Hardware Impairment – აპარატურული გაუარესება

ID – Identifier – იდენტიფიკატორი

IoE – Internet of Everything – ყველაფრის ინტერნეტი

IoT – Internet of Things – საგნების ინტერნეტი

IR – Information Receiver – ინფორმაციის მიმღები

IRS – Intelligent Reflecting Surface – ინტელექტუალური ამრეკლავი ზედაპირი

IS – Intelligent Surface – ინტელექტუალური ზედაპირი

ISAC – Integrated Sensing And Communication – ინტეგრირებულ ზონდირება და კომუნიკაცია

ISD – Intersite Distance – საიტებს შორის მანძილი

ISI – Intersymbol Interference – სიმბოლოთაშორისი ინტერფერენცია

ISL – Intersatellite Link – თანამგზავრებს შორის დამაკავშირებელი ლინკი

ITU – International Telecommunication Union – ტელეკომუნიკაციის საერთაშორისო კავშირი

KPI – Key Performance Indicator – ძირითადი მახასიათებლების ინდიკატორი

L2C – Learning to Communication – კომუნიკაციის სწავლა

LDPC – Low-Density Parity-Check – დაბალი სიმკვრივის ლუწობის შემმოწმებელი (კოდი)

LEO – Low Earth Orbit – დედამიწის დაბალი ორბიტა

LLR – Log-Likelihood Ratio – ლოგ-დამაჯერებლობის ფარდობა

LoS – Line of Sight – პირდაპირი ხედვის ხაზი

LTE – Long-Term Evolution – გრძელვადიანი ევოლუცია

MAC – Medium Access Control – გარემოსთან წვდომის მართვა

MARL – Multi-Agent Reinforcement Learning – მულტიაგენტური განმტკიცებული სწავლება

MC – Molecular Communication – მოლეკულური კომუნიკაცია

MEC – Mobile Edge Computing – მობილური პერიფერიული გამოთვლები

MEO – Medium Earth Orbit – დედამიწის საშუალო ორბიტა

MI – Mutual Information – ერთობლივი ინფორმაცია

MIMO – Multiple Input Multiple Output – მრავალშესასვლელიანი და მრავალგამოსასვლელიანი (სისტემა)

ML – Machine Learning – მანქანური სწავლება

mMIMO – massive MIMO – მასიური MIMO

MMSE – Minimum Mean Square Error – მინიმალური საშუალო კვადრატული შეცდომა

MNO – Mobile Network Operator – მობილური ქსელის ოპერატორი

MPNL – Massively Parallel Nonlinear – მასობრივად პარალელური არაწრე-
ფივი (დამუშავება)

Multi-SIM – Multi Mobile Subscriber Identity – მრავალი აბონენტის იდენტი-
ფიკაციის მოდული

MU-MIMO – Multi-User MIMO – მრავალმომხმარებლიანი MIMO

MU-mMIMO – Multi-User massive MIMO – მრავალმომხმარებლიანი მასი-
ური MIMO

NB-IoT – Narrowband IoT – ვიწროზოლოვანი IoT

NLoS – Non-Line of Sight – არაპირდაპირი ხედვის ხაზი

NOMA – Non-Orthogonal Multiple Access – არაორთოგონალური მრავალ-
ჯერადი წვდომა

NR – New Radio – ახალი რადიო

NTN – Non-Terrestrial Network – არატერესტრიალური ქსელი

OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing – მულტიპლექსირება
ორთოგონალური სიხშირული დაყოფით

OFDMA – Orthogonal Frequency Division Multiple Access – მრავალჯერადი
წვდომა ორთოგონალური სიხშირული დაყოფით

OOK – On-OFF Keying – ჩართვა-გამორთვის მანიპულაცია

OTFS – Orthogonal Time Frequency Space – ორთოგონალური დროით-სიხ-
შირული სივრცე

PA – Power Amplifier – სიმძლავრის გამამლიერებელი

PE – Processing Element – დამუშავების ელემენტი

PHY – Physical – ფიზიკური (ფენა)

PHY API – PHY ფენის გამოყენებითი პროგრამირების ინტერფეისი

PIV – Particle Image Velocimetry – ნაწილაკების გამოსახულების ველოსი-
მეტრია

PLIF – Planar Laser-Induced Fluorescence – ლაზერით ინდიცირებული ბრტყელი ფლუორესცენცია

PLS – Physical Layer Security – ფიზიკური ფენის უსაფრთხოება

ppm – parts per million – ნაწილი მილიონზე

PS – Phase Shifter – ფაზის წამნაცვლებელი

PU – Primary User – პირველადი მომხმარებელი

QAM – Quadrature Amplitude Modulation – კვადრატული ამპლიტუდური მოდულაცია

QoS – Quality of Service – მომსახურების ხარისხი

RAN – Radio Access Network – რადიოწვდომის ქსელი

RE – Resource Element – რესურს-ელემენტი

RF – Radio Frequency – რადიოსიხშირე

RIS – Reconfigurable Intelligent Surface – რეკონფიგურირებადი ინტელექტუალური ზედაპირი

RL – Reinforcement Learning – განმტკიცებული სწავლება

RMSE – Root Mean Squared Error – საშუალო კვადრატული შეცდომა

RMT – Random Matrix Theory – შემთხვევითი მატრიცების თეორია

RSRP – Reference Signal Receive Power – რეფერენსული სიგნალის მიღებული სიმძლავრე

Rx – Receive – მიღება

SCM – Sample Covariance Matrix – ამონარჩევების კოვარიანტობის მატრიცა

SDU – Service Data Unit – მონაცემთა მომსახურების ერთეული

SiGe – Silicon Germanium – სილიციუმ-გერმანიუმი

SINR – Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio – სიგნალის ინტერფერენცია-პლუს-ხმაურთან თანაფარდობა

SIR – Signal-to-Interference Ratio – სიგნალის და ინტერფერენციის თანაფარდობა

SISO – Single Input Single Output – ერთშესასვლელიანი და ერთგამოსასვლელიანი (სისტემა)

SNO – Satellite Network Operator – თანამგზავრული ქსელის ოპერატორი

SNR – Signal-to-Noise Ratio – სიგნალისა და ხმაურის თანაფარდობა

SP – Signal Processing – სიგნალების დამუშავება

SU – Secondary User – მეორადი მომხმარებელი

SWIPT – Simultaneous Wireless Information and Power Transfer – ინფორმაციისა და სიმძლავრის ერთდროული უსადენო გადაცემა

TDD – Time Division Duplex – დუპლექსი დროითი დაყოფით

TDMA – Time Division Multiple Access – მრავალჯერადი წვდომა დროითი დაყოფით

TDL – Tap Delay Line – შეყოვნების ხაზი განშტოებით

TS – Technical Specification – ტექნიკური სპეციფიკაცია

TTD – True Time Delay – ჭეშმარიტი დროითი დაყოვნება

TTI – Transmission Time Interval – გადაცემის დროის ინტერვალი

Tx – Transmit – გადაცემა

UAS – Unmanned Aerial System – უპილოტო საავიაციო სისტემა

UAV – Unmanned Aerial Vehicle – უპილოტო საფრენი აპარატი

UE – User Equipment – მომხმარებლის მოწყობილობა

UM-MIMO – Ultra-Massive MIMO – ულტრამასიური MIMO

USRP – Universal Software Radio Peripheral – უნივერსალური პროგრამული რადიოპერიფერიული მოწყობილობა

UTM – Unmanned Traffic Management – ტრაფიკის უპილოტო მართვა

VLSI – Very-Large-Scale Integration – ძალიან ფართომასშტაბიანი ინტეგრაცია

VNA – Vector Network Analyzer – ქსელის ვექტორული ანალიზატორი

VOC – Volatile Organic Compound – აქროლადი ორგანული ნაერთი

VR – Virtual Reality – ვირტუალური რეალობა

VSAT – Very Small Aperture Terminal – ძალიან მცირე აპერტურის ტერმინალი

WDN – Water Distribution Network – წყლის გამანაწილებელი ქსელი

WSR – Weighted Sum-Rate – შეწონილი ჯამური სიჩქარე

ZF – Zero-Forcing – ნულოვანი იძულება

