

სერგო  
შავგულიძე

ნოდარ  
უღრელიძე

# **Wi-Fi: თანამედროვე სტანდარტები და განვითარების ტენდენციები**

თბილისი  
2021

## **სერგო შავგულიძე, ნოდარ უგრელიძე**

### **Wi-Fi: თანამედროვე სტანდარტები და განვითარების ტენდენციები**

პირველი გამოცემა 2021

## **Sergo Shavgulidze, Nodar Ugrelidze**

### **Wi-Fi: Modern Standards and Development Trends**

First Edition 2021

ყოველდღიურად მილიარდობით ადამიანი სულ უფრო მეტად და მრავალფეროვნად იყენებს ლოკალურ ქსელში უსადენო კავშირის დამყარების ტექნოლოგია Wi-Fi-ს, რომლითაც მოწოდებულია ზრდადი გლობალური ტრაფიკის დიდი ნაწილი გადაიცემა. ეს წიგნი, რომელიც მიმოხილვითი ხასიათისაა, დეტალურად წარმოგიდგინებს და აანალიზებს როგორც Wi-Fi 6-ის ახლახან მიღებულ სტანდარტს IEEE 802.11ax-ს, ასევე IEEE 802.11be-ის მიერ Wi-Fi 7-სკენ გადადგმულ ნაბიჯებს, ძირითად ტექნიკურ მახვევებებს და ამ სტანდარტებთან დაკავშირებულ ახალ ფუნქციებს და ტექნოლოგიებს. ასევე შესწავლილია სინათლის სხივით ფორმირებული Li-Fi ქსელის და Wi-Fi-ს კოორდინაცია, კერძოდ, ჰიბრიდული Li-Fi და Wi-Fi ქსელების შექმნა. წიგნში შეკრებილია ამ მიმართულებებით მსოფლიო ტექნიკურ ლიტერატურაში არსებული გამორჩეული ნაშრომები, გაერთიანებული და სისტემატიზებულია ისინი და ყველაფერი თემატურად ერთი ქოლგის ქვეშ არის მოქცეული. ვფიქრობთ, რომ მასალა სასარგებლო იქნება და დახმარებას გაუწევს ტელეკომუნიკაციის დარგში მომუშავე სპეციალისტებს და აკადემიურ პერსონალს, მაღალი კურსის ბაკალავრიატის სტუდენტებს, მაგისტრანტებს და დოქტორანტებს. წიგნი „Wi-Fi: თანამედროვე სტანდარტები და განვითარების ტენდენციები“ მომზადებულია კომუნიკაციების კომისიის პროექტის - ლოკალური არეალის უსადენო ქსელის (Wi-Fi) ეფექტურობის გაზრდა - ფარგლებში.

პროექტის ხელმძღვანელი და გამომცემელი

### **მერაბ ქათამაძე**

ავტორები

### **სერგო შავგულიძე**

ტექნიკურ მეცნიერებათა დოქტორი, პროფესორი  
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

### **ნოდარ უგრელიძე**

ტექნიკურ მეცნიერებათა დოქტორი, პროფესორი  
კავკასიის უნივერსიტეტი

რედაქტორი

### **ანა ჭაბაშვილი**

© სერგო შავგულიძე, ნოდარ უგრელიძე 2021

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

ISBN 978-9941-8-3844-6

# სარჩევი

წინასიტყვაობა .....	6
თავი 1 .....	11
<b>უსადენო ლოკალური ქსელების მაღალი ეფექტიანობის IEEE 802.11ax სტანდარტის მიმოხილვა .....</b>	<b>11</b>
1.1 შესავალი .....	11
1.2 IEEE 802.11ax სტანდარტი და მისი მიღების წინაპირობები .....	14
<b>1.2.1 IEEE 802.11ax სტანდარტის მიღებამდე არსებული სიტუაცია .....</b>	<b>14</b>
<b>1.2.2 802.11ax-ის ძირითადი მახასიათებლები .....</b>	<b>17</b>
1.3 ფიზიკური ფენა: მოდულაცია, კოდირება და ფრეიმის ფორმატი .....	20
<b>1.3.1 მოდულაცია და კოდირება .....</b>	<b>20</b>
<b>1.3.2 PHY ფრეიმის ფორმატი .....</b>	<b>22</b>
1.4 MU გადაცემა და არხზე წვდომა .....	26
<b>1.4.1 802.11ax-ის OFDMA-ს ძირითადი მახასიათებლები .....</b>	<b>26</b>
<b>1.4.2 მახასიათებლების გაუმჯობესება .....</b>	<b>29</b>
<b>1.4.3 ტრიგერის სპეციალური ფრეიმები .....</b>	<b>30</b>
<b>1.4.4 UL OFDMA შემთხვევითი წვდომით .....</b>	<b>33</b>
<b>1.4.5 EDCA გაუმჯობესებანი .....</b>	<b>34</b>
1.5 გადაფარვის მართვა და სივრცის განმეორებითი გამოყენება 802.11ax-ში .....	36
<b>1.5.1 BSS-ის ფერი .....</b>	<b>37</b>
<b>1.5.2 ორი NAV-ის გამოყენება .....</b>	<b>37</b>
<b>1.5.3 დროის წყნარი პერიოდი .....</b>	<b>38</b>
<b>1.5.4 მგრძნობიარობის ზღურბლთან მორგება და გადაცემის სიმძლავრე .....</b>	<b>39</b>
<b>1.5.5 არხების შეკავშირება და პრეამბულის პერფორაცია .....</b>	<b>42</b>
<b>1.5.6 ვირტუალიზაცია .....</b>	<b>43</b>
1.6 ენერჯის მართვა 802.11ax-ში .....	44
<b>1.6.1 ენერჯის მემკვიდრეობითი მართვა .....</b>	<b>44</b>
<b>1.6.2 მიკროძილი .....</b>	<b>46</b>
<b>1.6.3 გაღვიძების სამიზნე დრო .....</b>	<b>46</b>
1.7 პირველი თავის დასკვნები .....	49
თავი 2 .....	51
<b>განსაკუთრებით მაღალი გამტარუნარიანობის IEEE 802.11be სტანდარტი: ახალი გამოწვევები და შესაძლებლობები .....</b>	<b>51</b>

2.1 შესავალი.....	51
2.1.1 PHY გაუმჯობესებანი EHT-ისთვის .....	52
2.1.2 MAC გაუმჯობესებანი EHT-ისთვის .....	53
2.2 EHT-ის PHY გაუმჯობესებათა დეტალური ანალიზი .....	55
2.2.1 სიხშირის გატარების ზოლის ახალი რეჟიმი .....	56
2.2.2 მულტი-RU მხარდაჭერა .....	58
2.2.3 EHT პრეამბულის დიზაინი .....	60
2.2.4 მაღალი რიგის მოდულაციის სქემები .....	63
2.3 მრავალლინკიანი ოპერაციები .....	64
2.3.1 გაუმჯობესებული MAC არქიტექტურა მრავალლინკიანი აგრეგაციისთვის.....	64
2.3.2 მრავალლინკიანი ოპერაცია ფართოზოლოვან და არამომიჯნავ სიხშირულ სპექტრში .....	66
2.4 გაუმჯობესებანი MIMO-ს თვალსაზრისით .....	75
2.4.1 არხის ზონდირების და უკუკავშირის გამარტივების არსებული სქემები .....	75
2.4.2 უკუკავშირის გამარტივების გაუმჯობესებული სქემები .....	76
2.5 მულტი-AP კოორდინაცია .....	81
2.5.1 მულტი-AP ქსელის არქიტექტურა .....	81
2.5.2 მულტი-AP გადაცემის პროცედურები .....	83
2.6 ლინკის გაუმჯობესებული ადაპტაცია და განმეორებითი გადაცემა .....	91
2.6.1 HARQ გრანულირება .....	91
2.6.2 HARQ პროცესი .....	93
2.6.3 HARQ მეთოდები .....	95
2.7 მომავალი განვითარება და კვლევითი შესაძლებლობები .....	97
2.7.1 6 გჰც სიხშირულ დიაპაზონში თანაარსებობა .....	97
2.7.2 დაბალსიხშირული და მაღალსიხშირული დიაპაზონების ინტეგრირება .....	98
2.7.3 მანქანურ სწავლებაზე დაფუძნებული QoS-ის გარანტირებული უზრუნველყოფა .....	99
2.7.4 ენერჯის მართვა .....	101
2.7.5 სხივების ჰიბრიდული ფორმირება .....	101
2.8 მეორე თავის დასკვნები .....	102
თავი 3 .....	104
<b>ჰიბრიდული Li-Fi და Wi-Fi ქსელები .....</b>	<b>104</b>
3.1 შესავალი .....	104
3.2 სისტემის პროექტირების სტრუქტურა .....	107
3.2.1 ქსელის არქიტექტურა .....	107
3.2.2 ფიჭების განთავსება .....	108
3.2.3 მრავალჯერადი წვდომა და მოდულაციის სქემები .....	110
3.2.4 განათების მოთხოვნები .....	113
3.2.5 ბექჰოლი .....	114
3.3 მუშაობის ძირითადი მაჩვენებლები .....	115

3.3.1 SINR-ით დაფარვის ალბათობა.....	115
3.3.2 სპექტრული ეფექტიანობა და არეალის მიხედვით სპექტრული ეფექტიანობა...	116
3.3.3 ენერგეტიკული ეფექტიანობა და ქსელის გამტარუნარიანობა .....	117
3.3.4 მომსახურების ხარისხი და მომხმარებლის სამართლიანობა .....	118
3.4 მომხმარებლის ქცევის მოდელირება .....	119
3.4.1 მომხმარებლის მობილურობა .....	119
3.4.2 მოწყობილობის ორიენტაცია.....	120
3.4.3 სინათლის გზის ბლოკირება .....	122
3.5 ინტერფერენციების მართვა.....	123
3.5.1 ინტერფერენციების ჩახშობა .....	123
3.5.2 ინტერფერენციების თავიდან აცილება .....	127
3.5.3 ინტერფერენციების მართვასთან დაკავშირებული საკითხების შეჯამება.....	128
3.6 ჰენდოვერი .....	129
3.6.1 ჰორიზონტალური ჰენდოვერი.....	130
3.6.2 ვერტიკალური ჰენდოვერი .....	131
3.6.3 არჩევანი VHO-სა და HHO-ს შორის .....	132
3.7 დატვირთვის დაბალანსება .....	134
3.7.1 სტაციონარული არხის დატვირთვის დაბალანსება .....	135
3.7.2 დატვირთვის დაბალანსება მობილურობის გათვალისწინებით .....	137
3.7.3 დატვირთვის დაბალანსების მეთოდების შემუშავების მომავალი გზები.....	139
3.8 HLW ქსელების გამოყენება.....	139
3.8.1 შიდა პოზიციონირების სისტემა .....	140
3.8.2 ფიზიკური ფენის უსაფრთხოება .....	143
3.8.3 მიღებული შედეგების შეჯამება და დია საკითხები.....	145
3.9 მესამე თავის დასკვნები .....	146
ბოლოთქმა.....	147
ლიტერატურა.....	149
აკრონიმები და აბრევიატურები .....	154

## წინასიტყვაობა

ჯერ კიდევ 1943 წელს ფსიქოლოგმა აბრაჰამ მასლოუმ გამოაქვეყნა კვლევა ადამიანის მოთხოვნილებათა იერარქიის შესახებ, რომელშიც ნათქვამია, რომ ნიჭისა და ინტერესების სრულ რეალიზებამდე ჯერ ოთხი ტიპის (ფიზიოლოგიური, უსაფრთხოების, ფლობისა და სიყვარულის და პატივისცემის) მოთხოვნილება უნდა დაკმაყოფილდეს. მისი თეორია საუკეთესოდაა წარმოდგენილი პირამიდით (იხილეთ ამ წიგნის გარეკანზე), რომელიც გვიჩვენებს, თუ რა თანმიმდევრობით იკმაყოფილებს ადამიანი თავის მოთხოვნილებებს. როგორც მახვილგონივრულად აღნიშნეს ა. გარსია-როდრიგესმა და სხვებმა, დღეს მასლოუს პირამიდის ყველაზე ქვედა ნაწილში შეიძლება გამომწვევად დავამატოთ Wi-Fi. საკვების, თავშესაფრის, ძილის, სუფთა წყლისა და ელექტროენერჯის გარდა, უსაღებრო კავშირთან წვდომა ითვლება სასიცოცხლოდ აუცილებლად ჩვენს გლობალიზებულ საზოგადოებაში. ცხადია, ადამიანს ინტერნეტი ჰაერზე მეტად არ სჭირდება, მაგრამ, მიუხედავად ამისა, Wi-Fi-ის მნიშვნელობა და აუცილებლობა ეჭვგარეშეა. Wi-Fi-ის მეშვეობით თითოეული ჩვენგანი სრულად შეიგრძნობს მსოფლიოში მიმდინარე პროცესების მაჯისცემას. Wi-Fi საშუალებას აძლევს მომხმარებლებს, განავითარონ საკუთარი ბიზნესი და მოიპოვონ ქსელის რესურსებზე წვდომა თითქმის ყველგან. Wi-Fi აკავშირებს კომპიუტერებს, ვიდეოს, უსაფრთხოების ტექნიკას, მობილურ ტელეფონებს და ბევრ სხვა მოწყობილობას. Wi-Fi-ის გარეშე ჩვენ კომფორტულად ვერ ვესაუბრებოდით ოჯახის წევრებსა და მეგობრებს უცხოეთში. Wi-Fi გვეხმარება ყოველდღიურ ყოფასა და საქმიანობაში. Wi-Fi-ის საშუალებით საზოგადოება ადვილად აკონტროლებს სიტუაციას და ეხმარება ადამიანებს, სწრაფად მიიღონ პასუხები მათთვის საჭირო კი-

თხვებზე. ბოლოს და ბოლოს, ეს წიგნიც ძნელად დაიწერებოდა Wi-Fi-ის გარეშე, ვინაიდან ყველა მასალა მოპოვებულია ინტერნეტის მეშვეობით და Wi-Fi-ის გამოყენებით.

ყოველდღიურად მილიარდობით ადამიანი სულ უფრო მეტად და მრავალფეროვნად იყენებს Wi-Fi-ს, რომლითაც ხორციელდება მონაცემთა ზრდადი გლობალური ტრაფიკის დიდი ნაწილის გადაცემა. ვარაუდობენ, რომ 2023 წლისთვის იქნება თითქმის 628 მილიონი Wi-Fi-ის ცხელი წერტილი, რომელთაგანაც ათიდან ერთი აღჭურვილი იქნება მაღალი ეფექტიანობის (HE) Wi-Fi-ის მეექვსე ვერსიით, რომელიც დაფუძნებულია IEEE 802.11ax სპეციფიკაციებზე. IEEE 802.11ax-2021, ანუ IEEE 802.11ax არის IEEE სტანდარტი უსადენო ლოკალური ქსელებისთვის (WLAN) და ის წარმოადგენს ადრინდელი IEEE 802.11ac-ის მეგვიდრეს. Wi-Fi ალიანსის მიერ იგი განიხილება როგორც Wi-Fi 6 (2.4 – 5 გჰც სიხშირული დიაპაზონებისთვის) და Wi-Fi 6E (6 გჰც სიხშირული დიაპაზონისთვის). იგი ემსახურება მჭიდრო (იგულისხმება ხალხმრავალი თავშეყრის ადგილი) გარემოში Wi-Fi-ის კლიენტების მომსახურების ხარისხის გაუმჯობესებას და ფუნქციონირებს სიხშირის გატარების ზოლში 1 გჰც-დან 7.125 გჰც-ის ჩათვლით, მათ შორის არალიცენზირებად 2.4 – 5 გჰც დიაპაზონებში და, ასევე, 6 გჰც ფართო დიაპაზონში (5.925 – 7.125 გჰც ამერიკის შეერთებულ შტატებში). ამ სტანდარტის მთავარი მიზანია მოცემულ ფართობზე გამტარუნარიანობის გაზრდა ისეთი მაღალი სიმჭიდროვის დაწესებულებებში, როგორებიცაა კორპორაციული ოფისები, სავაჭრო ცენტრები და, აგრეთვე, მჭიდროდ დასახლებული საცხოვრებელი სახლები. მიუხედავად იმისა, რომ მონაცემების გადაცემის ნომინალური სიჩქარის გაუმჯობესება IEEE 802.11ac-სთან მიმართებაში შეადგენს მხოლოდ 37%-ს, გამტარუნარიანობის საერთო გაუმჯობესება (მთელ ქსელში) 400%-ია (სწორედ აქედან გამომდინარეობს მაღალი ეფექტიანობა). ეს ასევე შეიძლება გავიგოთ, როგორც 75%-ით ნაკლები შეყვანება.

IEEE 802.11ax-2021 სტანდარტი საბოლოოდ დამტკიცდა 2021 წლის 9 თებერვალს. ამიტომ 2021 წლის 17 ივნისს ევროკომისიამ მიიღო კომისიის განმარტოვებული გადაწყვეტილება (Commission Implementing Decision (EU) 2021/1067) „5945 – 6425 მჰც სიხშირულ დიაპაზონში რადიოსპექტრის ჰარმონიზებული გამოყენების შესახებ უსადენო წვდომის სისტემების დანერგვისთვის, რომლებიც მოიცავენ ლოკალურ რადიოსელებს (WAS/RLAN)“.

ამ წიგნის პირველ თავში ჩვენ მკითხველს ვეხმარებით, შეძლებისდაგვარად მარტივად გაეცნოს 802.11ax-ის რამდენიმე მნიშვნელოვან მიდწევას, მათ შორის, შემთხვევითი წვდომის მიდგომას, რომელიც დაფუძნებულია მრავალჯერად წვდომაზე არხების ორთოგონალური სიხშირული დაყოფით, და, აგრეთვე, გადაფარვის მართვისა და სივრცის განმეორებითი გამოყენების ახალ ტექნიკას. გარდა ამისა, პირველ თავში წარმოდგენილია შერჩეული მნიშვნელოვანი გაუმჯობესებანი (მათ შორის ფიზიკური (PHY) ფენის გაუმჯობესება, ერთდროულად ფუნქციონირებადი დიდი რაოდენობის მომხმარებლებისთვის მრავალშესასვლელიანი და მრავალგამოსასვლელიანი (MIMO) გაფართოება, მიდწევები ენერჯის დაზოგვის თვალსაზრისით და ა.შ.), რაც ამ სტანდარტს ძალზე მნიშვნელოვან წინ გადადგმულ ნაბიჯად აქცევს წინამორბედ 802.11ac-სთან შედარებით.

4k/8k ვიდეოს გაჩენისთანავე, მოთხოვნილება ვიდეოს მიწოდების გამტარუნარიანობაზე თანდათან გაიზრდება და მიაღწევს ათობით გიგაბიტს წამში. ასევე ვითარდება ახალი მაღალი გამტარუნარიანობისა და დაბალი შეყოვნების ვიდეოპროგრამები, მათ შორის მომატებული რეალობა (AR), ვირტუალური რეალობა (VR) და ონლაინ თამაშები. ერთმანეთთან დაკავშირებული ძალზე მკაცრი მოთხოვნების გამო, ამ პროგრამების მხარდაჭერა უსადენო ლოკალური ქსელის საშუალებით ბევრად აღემატება ახალი WLAN სტანდარტის – IEEE 802.11ax შესაძლებლობებს. ამ მოთხოვნილებათა დასაკმაყოფილებლად IEEE 802.11 ამჟამად მუშაობს განსაკუთრებით მაღალი გამტარუნარიანობის (EHT) ახალ სტანდარტზე, რომელსაც ეწოდება IEEE 802.11be და ის ასევე ცნობილია, როგორც Wi-Fi 7. IEEE 802.11be განკუთვნილია იმავე სიხშირული დიაპაზონებისთვის, სადაც იფუნქციონირებს IEEE 802.11ax და მისი საბოლოო ვერსიის გამოშვება 2024 წლის ბოლოსთვის ივარაუდება.

წიგნის მეორე თავი გვთავაზობს სრულყოფილ კვლევას გარემოსთან წვდომის მართვის (MAC) და PHY ფენასთან წვდომის მართვის ტექნიკის შესახებ, რომლებიც განიხილება EHT სამუშაო ჯგუფში და რომლებიც მოიცავს არხებად დანაწილებას და ტონების გეგმას, მრავალრიცხოვანი რესურსბლოკების (მულტი-RU) მხარდაჭერას, 4096-ობითი კვადრატული ამპლიტუდური მოდულაციის (4096-QAM) გამოყენებას, პრეამბულის დიზაინებს მრავალლინკიანი ოპერაციებისთვის (მაგალითად, მრავალლინკიანი აგრეგაცია და არხზე წვდომა), მრავალმომხმარებელიანი MIMO-ს გაუმჯობესებას, მრავალჯერადი წვდომის წერტილების (მულტი-AP) კოორდინაციას (მაგალითად, მულტი-AP ერთობლივ გადაცემას), ლინკის



გაუმჯობესებული ადაპტაციის და განმეორებითი გადაცემის პროტოკოლების (მაგალითად, გადაცემები ჰიბრიდული ავტომატური განმეორებითი მოთხოვნით (HARQ)) განხილვას. ეს თავი მოიცავს როგორც კრიტიკულად მნიშვნელოვან ტექნოლოგიებს, რომლებიც განხილულია EHT სტანდარტში, ასევე მასთან დაკავშირებულ უახლეს მიღწევებს მსოფლიოში უკვე ჩატარებული და მიმდინარე კვლევების მიხედვით. გარდა ამისა, განხილულია EHT-ს გარდა ჩატარებული სამეცნიერო-კვლევითი სამუშაოები, რათა მკითხველს წარმოდგენა შეეძინას WLAN-ის განვითარების პერსპექტივებზე.

მობილური მოწყობილობების რაოდენობის სწრაფად ზრდისა და მათი ინტერნეტმომსახურებისადმი გაზრდილი მოთხოვნების დაძლევის მიზნით სხვადასხვა ტექნოლოგიური დომენის ინტეგრირებისთვის ფართოდ განიხილება და გათვალისწინებულია ქსელების კონვერგენცია. შენობებს შიგნით უსადენო კომუნიკაციებისთვის ერთ-ერთი ყველაზე პერსპექტიული მიდგომაა სინათლის სხივით ფორმირებული Li-Fi ქსელის და Wi-Fi-ს კოორდინაცია, კერძოდ, ჰიბრიდული Li-Fi და Wi-Fi ქსელების (HLW) შექმნა. ეს ჰიბრიდული ქსელი აერთიანებს Li-Fi-ს მაღალსიჩქარიან მონაცემთა გადაცემასა და Wi-Fi-ს საყოველთაოდ გავრავას.

მესამე თავი არის შესავალი HLW ქსელებში, დაწყებული სისტემის სტრუქტურული პროექტირების თვალსაზრისით, რომელიც მოიცავს ქსელის არქიტექტურის, ფიჭების განლაგების, მრავალჯერადი წვდომისა და მოდულაციის სქემების, განათების მოთხოვნებისა და ბექჰოლის ასპექტებს. შემდეგ მიმოხილულია ძირითადი ტექნიკური მაჩვენებლები და ბოლოდროინდელი მიღწევები, რაც ნათლად აჩვენებს HLW ქსელის უპირატესობას ცალკეულად ფუნქციონირებად ქსელებთან შედარებით. გარდა ამისა, HLW ქსელების წინაშე მდგარი უნიკალური გამოწვევები განხილულია საკვლევი საკვანძო თემების მიხედვით, მათ შორის, მომხმარებლის ქცევის მოდელირება, ინტერფერენციების მართვა, ჰენდოვერი და დატვირთვის დაბალანსება. ასევე, აქ განხილულია HLW ქსელების პოტენციალი ისეთ გამოყენებით სფეროებში, როგორიცაა მდებარეობა შენობებს შიგნით და ფიზიკური ფენის უსაფრთხოებასთან დაკავშირებული მაგალითები. ასევე, განხილულია არსებული ამოცანები და სამომავლო კვლევითი მიმართულებები.

Wi-Fi-ის ახალ სტანდარტებთან და მისი განვითარების ტენდენციებთან დაკავშირებით მსოფლიო ლიტერატურაში არსებობს მრავალი პუბლიკაცია. ჩვენ გადავწყვიტეთ, შეგვეკრიბა ჩვენი აზრით საუკეთესო

ნაშრომები, გაგვერთიანებინა ისინი, მოგვეხდინა ამ ნაშრომების სისტემატიზაცია, ქართულ ენაზე წარმოგვედგინა მათი ძირითადი შედეგები და დაგვეწერა ეს წიგნი. აღვნიშნავთ, რომ წიგნის ბოლოს წარმოდგენილია გამოყენებული აკრონიმებისა და აბრევიატურების მნიშვნელობები და მათი შესატყვისი ქართული თარგმანები.

ვფიქრობთ, რომ მასალა სასარგებლო იქნება და დანმარებას გაუწევს კომუნიკაციის დარგში მომუშავე სპეციალისტებს და აკადემიურ პერსონალს, ბაკალავრიატის მაღალი კურსის სტუდენტებს, მაგისტრანტებსა და დოქტორანტებს.

## უსადენო ლოკალური ქსელების მაღალი ეფექტიანობის IEEE 802.11ax სტანდარტის მიმოხილვა

### 1.1 შესავალი

2050 წლისთვის დედამიწის მოსახლეობის რაოდენობის მოსალოდნელი გაორმაგება მსოფლიოში მკვეთრ ურბანიზაციას გამოიწვევს. მიუხედავად იმისა, რომ თანამედროვე ქალაქები უფრო და უფრო მეტ იმედს ამყარებენ Wi-Fi-ის ინტერნეტკავშირებსა და შესაბამის ცხელ წერტილებზე, Wi-Fi-ის მოწყობილობების მნიშვნელოვანი ზრდა მოითხოვს შემდგომ ტექნოლოგიურ გარდევებს თანამედროვე ქალაქებში მაღალი სიმჭიდროვის ურბანული გამოყენების საჭიროებათა დასაკმაყოფილებლად. ეს განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია „ჭკვიანი“ ქალაქებისთვის, სადაც ხორციელდება დიდი რაოდენობის მონაცემების დამუშავება და ადეკვატური მობილური გამოთვლები. დიდი მონაცემების ანალიზი, რომელიც უზრუნველყოფს „ჭკვიანი“ ქალაქების ინტელექტუალურ მომსახურებას, განსაკუთრებით დროის რეალურ მასშტაბში მომუშავე სერვისებისთვის, საჭიროებს ეფექტიან ინფორმაციულ ინფრასტრუქტურას მონაცემების ტრანსპორტირებისა და დამუშავებისთვის და ინტელექტსაც კი, უსადენო ქსელის დიზაინისთვის. ამგვარად, Wi-Fi (შესაბამისად, IEEE 802.11), ცხელი წერტილების გარდა, გადამწყვეტ როლს თამაშობს „ჭკვიანი“ ქალაქების ინფორმაციულ ინფრასტრუქტურაში. აღსანიშნავია, რომ 1997 წლის შემდეგ, ანუ IEEE 802.11 პროექტის პირველი ტექ-

ნიკური დამტკიცებიდან, უკვე 20 წელზე მეტი გავიდა. ამიტომ ძალიან მნიშვნელოვანია, რომ მაღალეფექტიანი უსადენო ქსელები ემსახურებოდნენ ინტელექტუალურ ინფორმაციულ ინფრასტრუქტურას კაცობრიობის მომავალი განვითარებისთვის.

დიდი სიმჭიდროვის მქონე Wi-Fi-ის ოპერაციულ გარემოში საკმარისი სიხშირის გატარების ზოლი პირდაპირ არ აისახება ქსელის მაღალ გამტარუნარიანობაზე და, შესაბამისად, კავშირის დამაკმაყოფილებელ შეფერხებას ან შეყოვნებაზე და ეს ხდება სისტემის მუშაობის მძიმე დეგრადაციის გამო, რაც გამოწვეულია არხებს შორის არსებული კონფლიქტებით და ინტერფერენციებით თანაარსებული უსადენო ლოკალური ქსელებიდან (WLANs) და მეზობელი მოწყობილობებიდან. ამრიგად, წარმოიქმნება ახალი ტექნოლოგიური ჰარადიგმა, რომელიც ახდენს WLAN ტექნოლოგიის რევოლუციურ გარდაქმნას მომხმარებლისთვის მოსახერხებელი გამოყენებისთვის. შესაბამისად, ფოკუსირება ხდება მრავალი მომხმარებლის ერთდროულად მუშაობის მაჩვენებლებზე შეფერხების, შეყოვნების და ერთ მომხმარებელზე საშუალო გამტარუნარიანობის თვალსაზრისით, ნაცვლად იმისა, რომ გაიზარდოს გადაცემის სიჩქარე ფიზიკურ ფენაში და ჰიკური გამტარუნარიანობა ერთი მომხმარებლის ფუნქციონირების პირობებში.

ამგვარი მოთხოვნების დასაკმაყოფილებლად, ელექტრო და ელექტრონიკის ინჟინრების ინსტიტუტის (IEEE) სტანდარტების ასოციაციამ 2014 წლის მარტში დასაბამი დაუდო IEEE 802.11ax პროექტს, რომლის მიზანი იყო მაღალი ეფექტიანობით მუშაობის მიზნით, სტანდარტიზებული მოდიფიკაციების განსაზღვრა IEEE 802.11 PHY ფენისთვის და გარემოსთან წვდომის მართვის (MAC) ქვეფენისთვის 1 გჰც-დან 6 გჰც-ის ჩათვლით სიხშირულ დიაპაზონში. IEEE 802.11ax სტანდარტი, რომელიც Wi-Fi ალიანსის მიერ განსაზღვრულია როგორც Wi-Fi 6, წარმოადგენს უსადენო ლოკალური ქსელების (ანუ Wi-Fi-ს) ახალ სტანდარტს IEEE 802.11 სტანდარტების ოჯახიდან. ეს სტანდარტი საბოლოოდ დაინერგა 2021 წლის თებერვალში და მის ბაზაზე აგებულ ქსელებს განიხილავენ, როგორც მაღალი ეფექტიანობის უსადენო (HEW) ქსელებს. პროექტი მუშავდებოდა მაღალი ეფექტიანობის უსადენო ლოკალური ქსელების სამუშაო ჯგუფის (TGax) მიერ.

IEEE 802.11ax დიზაინის ფორმირების პროცესში ყველაზე გამორჩეული მამოძრავებელი ძალა იყო იმის გაცნობიერება, რომ დღეისათვის WLAN მოწყობილობები განლაგებულია ძალიან მრავალფეროვან გარემოში, რაც ხასიათდება ლოკალიზებულ გეოგრაფიულ ადგილებში კონცენტრი-

რებული ტერმინალების დიდი რაოდენობის არსებობით. კორპორაციული ოფისები, მასობრივი დონისძიებების ადგილები, შენობებს გარეთ მოთავსებული წვდომის წერტილები, სავაჭრო ცენტრები, აეროპორტები, საგამოფენო დარბაზები, მჭიდროდ დასახლებული საცხოვრებელი კორპუსები, სტადიონები და ა.შ. – ეს არის მჭიდრო გარემოს მაგალითები, რომელთა დაფარვაც საჭიროებს უამრავი რაოდენობის (ასობით და მეტს) წვდომის (დაშვების) წერტილებს, რამაც, თავის მხრივ, შეიძლება მოითხოვოს ნაწილობრივ გადაფარული არხების მეშვეობით ფუნქციონირება. ასეთ გარემოში ჯამური გამტარუნარიანობა უკვე აღარ წარმოადგენს ეფექტიანი ფუნქციონირების ძირითად და საინტერესო მახასიათებელს; აქ მიზანია გაიზარდოს გამტარუნარიანობის სიმჭიდროვე, ანუ გამტარუნარიანობა ფართობის ერთეულზე, რაც განსაზღვრულია ქსელის საერთო გამტარუნარიანობის შეფარდებით ქსელის ფართობთან. ცხადია, ასეთ გარემოში მახასიათებლების დეგრადირების ძირითად წყაროს წარმოადგენს მასობრივი ინტერფერენციები. მაშინ, როდესაც IEEE 802.11-ის ადრულ ვერსიებში ძალისხმევა მიმართული იყო იქით, რომ თავიდან აეცილებინათ გადაცემა დამალული სადგურებიდან (STA) იმ გადაცემების აკრძალვით, რომლებსაც პოტენციურად შეიძლება კონფლიქტები გამოეწვია, IEEE 802.11ax ფოკუსირდება გაუმჯობესებაზე, რომელიც ეყრდნობა სივრცის განმეორებით გამოყენებას, რაც თავიდან აგვაცილებს ასეთ გამოვლენილ STA-ებს.

ამას გარდა, რეალურად, ქსელური მოწყობილობები იშვიათად მოქმედებს გაჯერებულ რეჟიმში, ანუ ხელმისაწვდომი მონაცემების რაოდენობა, შეიძლება საკმაოდ მცირე იყოს. განურჩევლად აგრეგირებული პაკეტის მოცულობისა (სტანდარტით განსაზღვრულ ფარგლებში), არსებობს არხზე წვდომის დროის შესაბამისი ფიქსირებული გადასახადი, რომელიც აუცილებელია ფრეიმების დაყოფისა და დადასტურების (Ack) შეტყობინების გასაგზავნად. ამიტომ, როდესაც მონაცემების რაოდენობა მცირეა, არხის დაკავების პროცენტული ოვერჰედი (სასიგნალო ზედნადები ხარჯები) მთლიანი დროის მიმართ, შეიძლება მეტისმეტად დიდი გამოვიდეს, რაც მნიშვნელოვნად ამცირებს გამოყენების ფენის გამტარუნარიანობას და რასაც, საბოლოო ჯამში, მივყავართ მომხმარებლებისთვის მის არაეფექტიან ფუნქციონირებასთან.

კიდევ ერთი პრობლემა დაკავშირებულია ტრაფიკის ასიმეტრიულობასთან. ფართო გავრცელება სოციალური ქსელებისა, რომლებსაც ახასიათებს მომხმარებლის მიერ გენერირებული მულტიმედიაური კონტენტის საგრძნობი რაოდენობა და მუდმივი ურთიერთქმედება ცენტრალიზე-

ბულ ტრუბლოვან შემნახველ სისტემებთან, იწვევს მნიშვნელოვან დატვირთვას არა მარტო ქვემოთ მიმართულ კავშირის (დაუნლინკის) ხაზებზე (DL), როგორც ამას ჰქონდა ადგილი ინფორმაციის ძებნის სერვერზე დაფუნდებული ტრადიციული გამოყენებისთვის, ასევე ზემოთ მიმართულ კავშირის (აპლინკის) ხაზებზეც (UL). DL-ისთვის ეს პრობლემა ნაწილობრივ გადაწყვეტილი იყო IEEE 802.11ac ვერსიაში, სადაც იყენებენ მრავალმომხმარებლიან მრავალშესასვლელიან მრავალგამოსასვლელიან (MU-MIMO) ტექნოლოგიას. UL-ისთვის ასეთი ტექნოლოგია მოითხოვს მკაცრ სინქრონიზაციას და, შესაბამისად, მისი სტანდარტიზაცია არ იყო გათვალისწინებული IEEE 802.11ax-მდე შემუშავებულ ვერსიებში.

ზემოაღნიშნული და IEEE 802.11ax ვერსიასთან დაკავშირებული სხვა მნიშვნელოვანი ტექნიკური საკითხები განხილული იქნება ამ თავში, რომლის დანარჩენი ნაწილი შემდეგნაირადაა ორგანიზებული: 1.2 პარაგრაფში ჩვენ მოკლედ განვიხილავთ IEEE 802.11ax ვერსიამდე არსებულ ვითარებას და შემდეგ ზოგადი სახით წარმოვადგენთ IEEE 802.11ax ვერსიაში გამოყენებულ ტექნოლოგიებს და მათ მახასიათებლებს. მომდევნო პარაგრაფებში უფრო დეტალურად შევისწავლით PHY ფენისთვის შემოთავაზებულ სპეციალურ გაუმჯობესებებს (პარაგრაფი 1.3), არხების წვდომის ოპერაციებში არსებულ ძირითად მიღწევებს, რომლებიც განპირობებულია მრავალჯერადი წვდომის არხების ორთოგონალური სიხშირული დაყოფით (OFDMA) და MU-MIMO UL-ის დანერგვით და არხებზე წვდომის ეფექტიანი მოდიფიკაციებით (პარაგრაფი 1.4). ასევე განვიხილავთ გაუმჯობესებებს, რაც საშუალებას მოგვცემს, ვისარგებლოთ სივრცის განმეორებითი გამოყენებით (პარაგრაფი 1.5) და ენერჯის მართვასთან დაკავშირებულ ახალ გადაწყვეტილებებს (პარაგრაფი 1.6). 1.7 პარაგრაფში წარმოვდგენილია პირველი თავის ძირითადი დასკვნები.

## 1.2 IEEE 802.11ax სტანდარტი და მისი მიღების წინაპირობები

### 1.2.1 IEEE 802.11ax სტანდარტის მიღებამდე არსებული სიტუაცია

ბოლო 24 წლის განმავლობაში IEEE 802.11 სტანდარტში (ჩანაწერის სიმარტივისთვის ქვემოთ მოვიხსენიებთ, როგორც 802.11-ს) შეიმუშავეს რიგი მოდიფიკაციების და დამატებებისა, კერძოდ 802.11a/b/g/n/ab/ac/ah, რომლებიც თანდათანობით აუმჯობესებდნენ გადაცემის ნომინალურ სიჩქარეს. ყველაზე ძველი ვერსიები, კერძოდ 802.11a/b/g, უბრალოდ იყენებდნენ იმ პერიოდისთვის ახალ მოდულაცია-კოდირების

სქემებს, რათა გაეზარდათ თავდაპირველად შემუშავებული 802.11-1997 სტანდარტის 2 მბიტი/წმ სიჩქარე 54 მბიტი/წმ სიჩქარემდე ორივე, 2.4 გჰც (802.11g) და 5 გჰც (802.11a), არალიცენზირებულ სიხშირულ დიაპაზონებში. 802.11n-ის შემოტანით გადაიდგა მნიშვნელოვანი ნაბიჯი ადრეული Wi-Fi-ს სტანდარტის გაუმჯობესების პროცესში, კერძოდ, მონაცემთა გადაცემის სიჩქარეები მნიშვნელოვნად გაიზარდა (თეორიულ მაქსიმუმად 600 მბიტი/წმ) სხვადასხვა ტექნიკის კომბინირებული გამოყენებით. ეს მოიცავდა: (ა) შესაძლებლობას, გამოყენებული ყოფილიყო არხები სიგანით 40 მჰც-მდე, რომელიც ორჯერ აღემატებოდა ადრინდელ 802.11 PHY-ში გამოყენებულ სიხშირულ ზოლებს, (ბ) ადრინდელ 3/4 სიჩქარეებთან შედარებით უფრო მაღალი სიჩქარის ხელშეშლამდგრადი კოდური სიჩქარეების (5/6) გამოყენებას, და ასევე, რაც ყველაზე უფრო მნიშვნელოვანია, (გ) 802.11n-ში MIMO ტექნოლოგიის გამოყენებას, სადაც ერთდროულად გადაიცემოდა 4-მდე სივრცითი ნაკადი მოწყობილობების წყვილებს შორის, რამაც საგრძნობლად გაზარდა მონაცემთა გადაცემის სიჩქარე.

სიჩქარეების გაზრდასთან ერთად 802.11n უზრუნველყოფს სხვადასხვა გაუმჯობესებას MAC ქვეფენის თვალსაზრისით. მისი მიზანია ოვერჰედის შემცირება ფრეიმებს შორის სივრცეებისთვის, პრეამბულებისა და მმართველი ფრეიმებისთვის, რაც სხვა შემთხვევაში არ უზრუნველყოფს მახასიათებლების უპირატესობას ახლად შემუშავებული PHY-სთვის. შესაბამისად, 802.11n-ში, ერთი და იმავე სადგურის გადაცემების განცალკევებისათვის, შემოიტანეს ახალი, ფრეიმებს შორის შემცირებული სივრცე (RIFS) 2 მკწმ ხანგრძლივობით, რომელიც შეიძლება გამოყენებულ იქნეს ფრეიმებს შორის 10 და 16 მკწმ ხანგრძლივობის მოკლე სივრცის (SIFS) ნაცვლად. ამას გარდა 802.11n განიხილავს აგრეგაციის ორ მეთოდს, სადაც იყენებენ MAC სერვისის მონაცემთა აგრეგირებულ ბლოკს (A-MSDU) და MAC პროტოკოლის მონაცემთა აგრეგირებულ ბლოკს (A-MPDU). პირველი მათგანი ამატებს რამდენიმე აგრეგირებულ პაკეტს ერთი MAC სათაურით და ერთი შემმოწმებელი ჯამით. მეორე მათგანი თითოეულ აგრეგირებულ პაკეტს ამატებს MAC სათაურს და შემმოწმებელ ჯამს. ასეთი აგრეგაცია, ოვერჰედის უმნიშვნელოდ გაზრდის სანაცვლოდ, უზრუნველყოფს გადაცემის საიმედოობის გაუმჯობესებას, ვინაიდან საშუალებას იძლევა, განზორციელდეს, სულ მცირე, ზოგიერთი პაკეტის სწორი დეკოდირება, როდესაც ადგილი აქვს ხმაურის ხანმოკლე ზემოქმედებით გამოწვეულ შეცდომების ჯგუფებს.

802.11 სამუშაო ჯგუფი ისტორიულად მნიშვნელოვან ძალისხმევას იყენებდა Wi-Fi ქსელებში მომსახურების ხარისხის (QoS) გასაუმჯობესებლად. კერძოდ, 802.11e ვერსიის ცვლილებებით გათვალისწინებულია გაფართოებული წვდომა განაწილებულ არხზე (EDCA) და ჰიბრიდული მართვადი წვდომა არხზე (HCCA), რომლებიც განასხვავებს ხმას, ვიდეოს, და სხვადასხვა ტიპის ტრაფიკებს და მათ განსხვავებულად ემსახურება. მაშინ, როდესაც EDCA მხოლოდ სხვადასხვა პრიორიტეტს ანიჭებს ამ ტიპის ტრაფიკებს, კარგად დახვეწილი HCCA საშუალებას აძლევს წვდომის წერტილებს (APs), დაგეგმოს გადაცემები QoS-ის სპეციფიკური მოთხოვნების გათვალისწინებით, ისეთები, როგორებიცაა შეყოვნების დრო, პაკეტის დაკარგვის კოეფიციენტი ან საჭირო სიხშირის გატარების ზოლი. ამასთან, ზუსტი მოთხოვნების დადგენა არ არის ტრივიალური ამოცანა და, სავარაუდოდ, კიდევ ერთი მთავარი მიზეზია უკონკურენტო პრინციპით ფუნქციონირებადი HCCA-ს მეჩხერი განლაგების უკან.

მრავალი მოწყობილობისთვის, რომელიც იყენებს Wi-Fi-ს (მაგალითად, ლეპტოპები და სმარტფონები), ენერჯის მოხმარება მნიშვნელოვანი საკითხია. 802.11 ქსელში ენერჯის მართვა ემყარება ალტერნატივას ორ მდგომარეობას – მღვიძარესა და მთვლემარეს – შორის: მღვიძარე მდგომარეობაში STA-ს შეუძლია გადასცეს და მიიღოს ფრეიმები, ხოლო მთვლემარე მდგომარეობაში მისი რადიო გამორთულია. აქტიური STA ყოველთვის იმყოფება მღვიძარე მდგომარეობაში, ხოლო ენერჯის დამზოგავი (PS) PS STA მონაცვლეობს ამ მდგომარეობებს შორის. AP ბუფერში ინახავს მონაცემებს, განკუთვნილს PS STA-სთვის, სანამ STA არ გამოიღვიძებს და არ ამოიღებს მათ. ბევრი ტექნიკური ინოვაცია შესაძლებელს ხდის, მიღწეულ იქნეს ენერჯის დაზოგვის ახალი უკეთესი მახასიათებლები, მაგრამ მათი უმეტესობა რადიოს საკმაოდ დიდი დროით გამორთვას უკავშირდება, ანუ ასობით მილიწამით ან თუნდაც წამებით. ზოგიერთ მათგანი მოითხოვს, რომ PS STA-მ იბრძოლოს არხისთვის, თუ მას სურს მონაცემთა ამოღება AP-დან. ასეთი მეთოდები არაეფექტიანია მჭიდრო გარემოსთვის კონფლიქტების, უზარმაზარი ოვერჰედის და დიდი შეყოვნებების გამო. ზოგიერთი სხვა მეთოდი საშუალებას აძლევს AP-ს და PS STA-ს, წინასწარ დაგეგმონ ის შემთხვევები, როდესაც STA ახდენს AP-ს მონაცემების ამოღებას. ასეთი სერიების პერიოდი დამოკიდებულია QoS მოთხოვნებზე.

დაბოლოს, 802.11ac ვერსია ძირითადად დაინერგა 802.11n-თან შედარებით მონაცემთა გადაცემის სიჩქარის მნიშვნელოვნად გაზრდის მიზნით, დაახლოებით 10-ჯერ. 802.11ac ვერსია სივრცითი ნაკადების



რაოდენობის გაზრდის გარდა, მართავს პრობლემას, თუ როგორ უნდა ფუნქციონირებდეს ტერმინალები, რომლებიც წარმოების თვალსაზრისით არსებული სხვადასხვა მიზეზის გამო, ვერ განალაგებენ და გამოიყენებენ ერთ ან ორ ანტენაზე მეტს. ამ მიზნით 802.11ac ვერსიაში პირველად შემოიღეს DL-ში მრავალმომხმარებლიანი MIMO (DL MU-MIMO), რომელიც AP-ს აძლევს საშუალებას, განსაზღვროს განსხვავებული DL სივრცითი ნაკადები სხვადასხვა STA-სთვის (UL-სთვის იგივე ტექნოლოგიის დანერგვა, კერძოდ UL MU, გადაიდო შემდეგი სტანდარტებისთვის, სინქრონიზაციაზე ძალიან მკაცრი მოთხოვნების გამო, რომელიც მნიშვნელოვნად განახლებულ დოზაინს საჭიროებდა). გარდა ამისა, 802.11ac აფართოებს გადამცემ სიხშირულ დიაპაზონს 160 მჰც-მდე (სადაც შეიძლება გამოყენებულ იქნეს არამომიჯნავე 80+80 მჰც არხები) და ზრდის სიგნალურ კონსტელაციებს 256 სიგნალის შემცველ კვადრატულ ამპლიტუდურ მოდულაციამდე (256-QAM), რომელიც, თავის მხრივ, ზრდის მონაცემების გადაცემის სიჩქარეს 7 გბიტ/წმ-მდე. ფრეიმის სიგრძე გაზრდილია 65 535-დან (802.11n) 4 692 480 ოქტეტამდე. მიუხედავად ამისა, ისეთი მოკლე პაკეტებისთვის, როგორიცაა მყისიერი შეტყობინებები, ვებმოთხოვნა, გადაცემის მართვის პროტოკოლის დადასტურებები და ა.შ., არხს კვლავ არაეფექტიანად იყენებენ.

### **1.2.2 802.11ax-ის ძირითადი მახასიათებლები**

წინა ვერსიების მსგავსად, რომლებიც აუმჯობესებს ბიტების გადაცემის ნომინალურ სიჩქარეს, 802.11ax შეიცავს ახალ PHY პროტოკოლს უფრო მაღალი რიგის მოდულაციით და გაუმჯობესებული ხელშეშლამდგრადი კოდირების სქემით. საგულისხმოა, რომ, 802.11ac-სგან განსხვავებით, 802.11ax არ ზრდის MIMO-ში სივრცითი ნაკადების რაოდენობას და არ აფართოებს არხს. მისთვის სიჩქარის ნომინალური მაჩვენებლები გაიზრდება 9.6 გბიტ/წმ-მდე, რაც მხოლოდ 37%-ით მეტია 802.11ac-ზე (და ასეთი ზრდა ძალიან მცირეა 802.11n-თან შედარებით 802.11ac-ს სიჩქარის 10-ჯერ გაზრდის გათვალისწინებით). მომხმარებლის გამტარუნარიანობის სასურველი ზრდა მიიღწევა სიხშირული სპექტრის უფრო ეფექტიანად გამოყენებით.

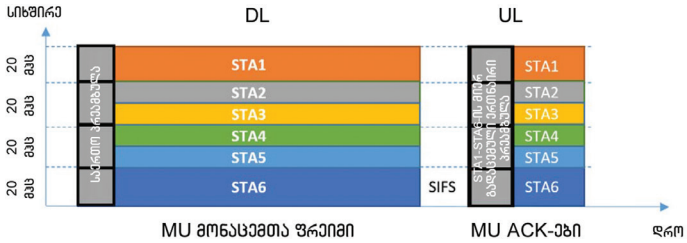
802.11ax-ის მთავარი დამახასიათებელი თვისებაა OFDMA მიდგომის შემოტანა, მიდგომისა, რომელსაც ფართოდ იყენებენ ფიჭურ ქსელებში, მაგრამ ახალია Wi-Fi-სთვის. დასაბუთება ისაა, რომ ძალიან ფართო-ზოლოვანი არხები (ზოლის სიგანით 80 მჰც, 80+80 მჰც და 160 მჰც), რომლებსაც იყენებენ 802.11ac-შიც, განიცდის სიხშირის მიმართ სელექციურ

ინტერფერენციებს, რაც მნიშვნელოვნად ამცირებს პრაქტიკულად შესაძლებელ მიღწევად სიჩქარეებს. OFDMA-ის გამოყენებისას, მომიჯნავე ქვეგადამტანები (ტონები) ერთად ჯგუფდება რესურსბლოკში (RU) და გამგზავნს შეუძლია, აირჩიოს საუკეთესო RU თითოეული კონკრეტული მიმღებისთვის, რაც განაპირობებს სიგნალის ინტერფერენციები-პლუს-ხმაურთან თანაფარდობის (SINR) მაღალ მნიშვნელობას, უკეთეს მოდულაცია-კოდირების სქემას და გაზრდილ გამტარუნარიანობას. მეტიც, ვინაიდან მონაცემების მაღალი სიჩქარით გადაცემის ეფექტიანობა უარესდება, როდესაც STA-ს მხოლოდ რამდენიმე მონაცემი აქვს გადასაცემი, ასეთ შემთხვევაში აგრეგაციის მოწინავე ტექნიკის გამოყენება, რომელიც მიზნად ისახავს არხზე წვდომის შემცირებას და, ასევე, დადასტურებით და პრეამბულით განპირობებული ოვერჰედის შემცირებას, უსარგებლო ხდება. ვიწრო RU-ების გამოყოფა ასეთი STA-ებისთვის ეფექტიანი საშუალებაა. უახლესი გამოკვლევების თანახმად, OFDMA უზრუნველყოფს 6-ჯერ უფრო მაღალ გამტარუნარიანობას, ვიდრე არსებული სისტემები.

OFDMA აახლოებს Wi-Fi-ს რადიოწვდომას გრძელვადიან ევოლუციასთან (LTE). ამასთან, LTE-სგან განსხვავებით, აქ OFDMA კოორდინირებულია AP-ს მიერ. ეს ნიშნავს, რომ არხზე წვდომისას AP-ს შეუძლია დაიწყოს ჩვეულებრივი DL გადაცემა, DL MU გადაცემა (OFDMA-ს, MIMO-ს ან ორივეს გამოყენებით), ან გამოყოფს RU-ები UL MU გადაცემისთვის.

LTE-ში OFDMA დროზეა დაფუძნებული, ანუ სხვადასხვა ტონი შეესაბამება სხვადასხვა სამომხმარებლო მოწყობილობას, გადაცემის დროის ერთი ინტერვალის (TTI) განმავლობაში. 802.11ax-ში OFDMA ფრეიმზეა დაფუძნებული, ანუ MU მონაცემთა ფრეიმი შეიცავს მონაცემებს, მიმართულს სხვადასხვა მომხმარებლისაკენ ან სხვადასხვა მომხმარებლებიდან და სხვადასხვა ტონი ენიჭება მომხმარებლებს მთელი ფრეიმის ხანგრძლივობის განმავლობაში (იხ. ნახ. 1.1).

DL MU გადაცემისას PHY პრეამბულა განსაზღვრავს ფრეიმის ხანგრძლივობას და STA-ებს შორის ტონების ასახვას. ამის საპირისპიროდ, UL MU გადაცემისთვის ასეთი დაგეგმვა განსაზღვრულია წინა ფრეიმით, რომელიც შეიძლება იყოს ან ტრიგერის ფრეიმი (ახალი მმართველი ფრეიმი, რომელიც გამოყოფს არხს UL MU გადაცემისთვის), ან მონაცემთა ფრეიმი, რომლის სათაური შეიცავს ინფორმაციას მონაცემთა გადაცემის დაგეგმვის შესახებ. ეს უკანასკნელი განსაკუთრებით სასარგებლოა დადასტურების მიღებისთვის DL MU გადაცემაზე. UL MU გადაცემა



**ნახ. 1.1.** OFDMA გადაცემის მაგალითი 802.11ax-სთვის

იწყება DL ფრეიმის შემდგომ (რომელიც შეიცავს დაგეგმვის შესახებ ინფორმაციას) ზუსტად ერთი SIFS-ის შესაბამისი დროის გავლის შემდეგ. ყოველივე ეს საშუალებას გვაძლევს, მოვახდინოთ UL MU გადაცემაში მონაწილე STA-ების სინქრონიზაცია, იმისდა მიუხედავად, თუ რომელ ტექნიკას იყენებენ STA-ებისთვის: OFDMA-ს, MIMO-ს, თუ ორივეს ერთად.

Wi-Fi-ში OFDMA-ს შემოტანა ზემოქმედებს MAC-ის და PHY-ს სხვა ფუნქციებზეც. პირველი, TGax-მა შეცვალა OFDMA-ს პარამეტრები, იმისათვის, რომ გაუმჯობესებინა OFDMA-ს ოპერაციების მოქნილობა და ეფექტიანობა. მეორე, TGax-მა შეცვალა PHY-ს ფრეიმის ფორმატი, რათა PHY პრეამბულაში ჩაერთო OFDMA-სთან დაკავშირებული ინფორმაცია. მეტიც, TGax-მა MAC ქვეფენის ინფორმაცია გადაიტანა PHY პრეამბულაში, ვინაიდან ხანდახან შესაძლებელია, მოვახდინოთ პრეამბულის დეკოდირება, მაშინაც კი, როდესაც მთლიანი ფრეიმი დაზიანებულია. მესამე, OFDMA-ს შემოტანამ გამოიწვია მრავალი MAC ცვლილება, რომლებიც დაკავშირებულია, MU ოპერაციასთან და სხვადასხვა თაობის მოწყობილობებს შორის ურთიერთქმედებასთან.

OFDMA-ს გარდა დიდი ძალისხმევა იხმარეს იმისათვის, რომ გაუმჯობესებულიყო გამტარუნარიანობა და შემცირებულიყო ენერგომოხმარება გადაფარულ და მჭიდრო ქსელებში. ახალი მახასიათებლების ჩამონათვალიდან შეგვიძლია გამოვყოთ:

- ძირითადი მომსახურების კომპლექტის (BSS) შეღებვა – 802.11ac-დან და 802.11ah-დან მემკვიდრეობით მიღებული (და გაფართოებული), რომელიც საშუალებას გვაძლევს, განვასხვავოთ BSS-ებს შორის და BSS-ებს შიდა ფრეიმები მათი პრეამბულების საფუძველზე, თუნდაც ფრეიმის სასარგებლო დატვირთვები დაზიანებული იყოს კონფლიქტებით.
- მემკვიდრეობით მიღებული გადამტანის ვირტუალური ზონდირების რამდენიმე მოდიფიკაცია, რომელიც ცნობილია, როგორც ქსელის განაწილების ვექტორი (NAV).

- ვირტუალიზაცია.
- მიკროძილის ოპერაცია, რომელიც საშუალებას აძლევს STA-ს, გამოერთოს თავისი რადიომოწყობილობა, მხოლოდ სხვა უცხო ფრეიმის ხანგრძლივობის განმავლობაში.
- გაღვიძების სამიზნე დროის (TWT) გადამუშავებული ვერსია, რომელიც თავდაპირველად შემოიტანეს 802.11ah-ში.

ამას გარდა, მნიშვნელოვანი სამუშაოები ჩატარდა, იმისათვის, რომ გაუმჯობესებულიყო სივრცის განმეორებითი გამოყენება მჭიდრო განლაგების პირობებში მგრძობელობითი ზღურბლის და გადაცემის სიმძლავრის ცვლილებების მეშვეობით. უნდა აღინიშნოს, რომ ამ თემას ყველაზე ხშირად განიხილავდნენ TGax-ის მიმდინარე სამუშაოებში, ვინაიდან მან მნიშვნელოვნად გაუმჯობესა ქსელის ფუნქციონირება.

1.1 ცხრილი წარმოგვიდგენს 802.11ax-ის ძირითად ახალ მახასიათებლებს, რომლებსაც შემდგომ უფრო დეტალურად აღვწერთ.

### 1.3 ფიზიკური ფენა: მოდულაცია, კოდირება და ფრეიმის ფორმატი

#### 1.3.1 მოდულაცია და კოდირება

802.11ax-ის PHY იყენებს თავისი წინამორბედის 802.11ac-ს ზოგიერთ ასპექტს. 802.11ac-ს მსგავსად ის დაფუძნებულია მულტიპლექსირებაზე ორთოგონალური სიხშირული დაყოფით (OFDM) და მხარს უჭერს ოპერირებას 20 მჰც, 40 მჰც, 80 მჰც, 80+80 მჰც და 160 მჰც არხებში. შევნიშნავთ, რომ, უწყვეტი 160 მჰც არხისაგან განსხვავებით, 80+80 მჰც არხი წარმოადგენს ორი არამომიჯნავე 80 მჰც არხის გაერთიანებას. ტონების რაოდენობის გაზრდის მიზნით, რაც სასურველია OFDMA-ისთვის, TGax-მა ოთხჯერ გაზარდა PHY-ში ფუნქციონირებადი OFDM სიგნალის ხანგრძლივობა 12.8 მკმ-მდე. ასეთი დიდი ზომის OFDM სიმბოლოები უფრო კარგად ებრძვიან სიმბოლოებს შორის არსებულ ინტერფერენციებს, რაც დამახასიათებელია შენობებს გარეთ არსებულ გარემოში მუშაობისთვის და რაც ძალიან მნიშვნელოვანია UL MU გადაცემისთვის, რომელიც შეიძლება განხორციელებულ იქნეს ერთდროულად რამდენიმე მომხმარებლისთვის. მეტიც, სიმბოლოების გადაცემის დროის გახანგრძლივება შესაძლებლობას იძლევა, შემცირდეს დამცავი ინტერვალით (GI) შექმნილი ოვერჰედი. საგულისხმოა, რომ არხში არსებული პირობების გათვალისწინებით, 802.11ax მოწყობილობას შეუძლია განაცალკეოს OFDM სიმბოლოები GI-ს საშუალებით, რომელიც შეიძლება არჩეულ იქნეს სი-

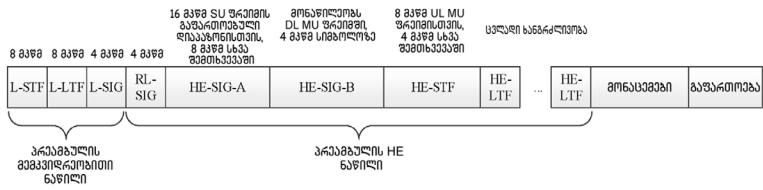
	<b>არსებული ვერსიები</b>	<b>ახალი 802.11ax ვერსია</b>
სინშირული სპექტრი	40 მჰც-მდე 2.4 გჰც (11n) - 160 მჰც-მდე 5 გჰც (11ac) დიაპაზონებში	40 მჰც-მდე 2.4 გჰც და 160 მჰც-მდე 5 გჰც დიაპაზონებში
OFDM-ში სიგნალთა კონსტელაციის ზომა	256-QAM (11ac)	1024-QAM
OFDM სიგნალის ხანგრძლივობა	3.2 მკწმ	12.8 მკწმ
OFDM-ის დამცავი ინტერვალი	0.4 ან 0.8 მკწმ (10% ან 20% ოვერჰედის შემთხვევაში)	0.8 ან 1.6 ან 3.2 მკწმ (5%, 10% ან 20% ოვერჰედის შემთხვევაში)
MIMO-ს რიგი	4 (11n), 8 (11ac)	8
გადაცემის მაქსიმალური სიჩქარე	დაახლოებით 7 გბიტ/წმ	დაახლოებით 9.6 გბიტ/წმ
არხზე საბაზისო წვდომა	CSMA/CA	OFDMA CSMA/CA-ს თავზე
არხზე შემთხვევითი წვდომა	EDCA	UL OFDMA შემთხვევითი წვდომით CSMA/CA-ს თავზე
უკონკურენტო წვდომა	PCF, HCCA, RAW (11ah)	ტრიგერზე დაფუძნებული UL OFDMA
MU ტექნოლოგია	MU-MIMO (11ac)	MU-MIMO, OFDMA
MU-ს გადაცემის მიმართულება	DL (11ac)	DL და UL
ფრაგმენტაცია	სტატიკური	მოქნილი
აგრეგაცია	A-MSDU, A-MPDU (11n) ფრაგმენტაციის გარეშე	A-MPDU, A-MSDU ფრაგმენტაციით
HE/მემკვიდრეობითი სამართლიანობა		2 EDCA პარამეტრების ჯგუფი
ინტერფერენციებისაგან დაცვა	NAV, RTC/CTS, HCCA TXOP მოლაპარაკება	ორი NAV, დროის წყნარი პერიოდი
სივრცის განმეორებითი გამოყენება	სექტორიზაცია (11ah)	სიმძლავრის და მგრძობელობის ადაპტიური ზღურბლები, ფერი
ენერჯის მართვა	სხვადასხვა	გაუმჯობესებული TWT, გაუმჯობესებული მიკროძილი

**ცხრილი 1.1.** 802.11ax-ის ძირითადი მახასიათებლები

დიდეებიდან (0.8 მკწმ, 1.6 მკწმ და 3.2 მკწმ), რაც საშუალებას იძლევა, შემცირდეს ოვერჰედის სიდიდე 6%-ით, მაშინ, როდესაც 802.11ac-ში GI ოვერჰედი შეადგენს 12%-დან 25%-მდე. 802.11ax-ს ასევე შემოაქვს ახალი მოდულაციის ტექნიკა და არსებულ ორობით ფაზურ მოდულაციას (BPSK) და 16-QAM, 64-QAM და 256-QAM მოდულაციებს ემატება ოფციური 1024-QAM, რომელიც შეიძლება გამოყენებულ იქნეს შენობის შიგნით ფუნქციონირებისას ძალიან კარგი საარხო პირობებისთვის, ანუ მაღალი SINR-ისთვის. შეცდომების გამასწორებელ ხვევად კოდებთან ან დაბალი სიმკვრივის ლუწობის შემომოწმებელ (LDPC) კოდებთან ერთად, რომლებსაც აქვთ სიჩქარეები 1/2, 2/3, 3/4 და 5/6, ეს მოდულაციები ახდენენ 9.6 გბიტ/წმ-მდე მონაცემთა გადაცემის სიჩქარეების გენერირებას. ასეთი მაღალი სიჩქარეები მიიღწევა, თუ კოდის სიჩქარე 5/6-ია და მას იყენებენ 160 მჰც ან 80+80 მჰც არხში 8 სივრცითი ნაკადით და GI 0.8 მკწმ-ის ტოლია. ამას გარდა 802.11ax აღწერს ოფციურ მოდულაციას დუალური გადამტანით (DCM). ეს უკანასკნელი აუმჯობესებს გადაცემის რობასტულობას ერთი და იმავე სიგნალის ტონების წყვილზე განთავსებით, რომლებიც ძალიანაა დამორებული სიხშირულ დომენში. TGax-ის მიერ ჩატარებული კვლევების მიხედვით ასეთი ტექნოლოგია საშუალებას იძლევა, გაუმკლავდეს ზოლსშიდა ინტერფერენციებს და უზრუნველყოფს 2 დბზე მეტ მოგებას ჰაკეტზე შეცდომის კოეფიციენტის (PER) მნიშვნელობებისთვის. აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ ერთი და იმავე მონაცემების ორჯერ გადაცემის გამო DCM ორჯერ ამცირებს მონაცემთა გადაცემის სიჩქარეს და ამიტომ DCM-ის გამოყენება მიზანშეწონილია მხოლოდ შედარებით რობასტული მოდულაცია-კოდირების სქემებისთვის (MCSs), როგორებიცაა MCS0, MCS1, MCS3 და MCS4.

### 1.3.2 PHY ფრეიმის ფორმატი

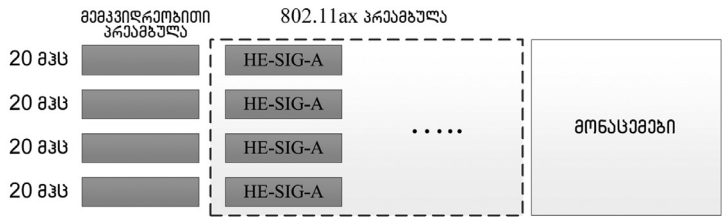
IEEE 802.11ax მიერ განსაზღვრულია ფიზიკური ფენის პროტოკოლის მონაცემთა ბლოკის (PPDU) ოთხი ფორმა: ერთმომხმარებლიანი (SU) გადაცემისთვის, გაფართოებული დიაპაზონის SU გადაცემისთვის (აქ გადაცემა ხდება 20 მჰც არხში და მას იყენებენ შედარებით მარტივი MCS სქემით MIMO-ს გარეშე), DL MU გადაცემისთვის და UL MU გადაცემისთვის. ეს ოთხი განსხვავებული ფრეიმის ტიპი ახდენს საბაზისო ფრეიმის სტრუქტურის გაფართოებას შერჩეული ველებით, რომლებიც სპეციალიზებულია სხვადასხვა ფრეიმის ტიპებისთვის (იხ. ნახ. 1.2). DL MU გადაცემის განსაკუთრებული თავისებურება მდგომარეობს იმაში, რომ ფრეიმი შეიცავს საერთო პრეამბულას, რომელიც აღწერს, თუ რომელი ტონების



**ნახ. 1.2.** 802.11ax-ის PHY ფრეიმის ფორმატი: L – მემკვიდრეობითი, STF – ტრენინგის მოკლე ველი, LTF – ტრენინგის გრძელი ველი, RL-SIG – L სიგნალის გამეორება, A - აუცილებელი ველი, B - ოფციური ველი

დეკოდირება უნდა მოახდინოს კონკრეტულმა მიმღებმა იმისათვის, რომ მიიღოს მონაცემთა ველის საკუთარი ნაწილი. ანალოგიურად, UL MU გადაცემისას, პრეამბულა საერთოა და ის სხივდება ყველა STA-სგან. ამის შემდეგ, ყველა STA გადასცემს მონაცემთა ველიდან მისთვის განკუთვნილ ნაწილს, რისთვისაც იყენებს წინასწარ განსაზღვრული ტონების ერთობლიობას.

ფრეიმის ყველა ამ ტიპისთვის ხორციელდება პრეამბულის დუბლირება გადასაცემად განკუთვნილი სიხშირული ზოლის ყოველ 20 მჰც ქვეარხში და ის შედგება ორი ნაწილისაგან: 802.11ax-მდე არსებული და მემკვიდრეობით მიღებული ნაწილისაგან და ახალი მაღალი ეფექტიანობის (HE) ნაწილისაგან (იხ. ნახ. 1.3). მაშინ, როდესაც პირველს იყენებენ უკუთავსებადობისთვის, მეორე უზრუნველყოფს გადაცემას 802.11ax-ში შემავალი ახალი ფუნქციონალური ნაწილების გამოყენებით და ის შეიძლება დეკოდირებულ იქნეს მხოლოდ 802.11ax მოწყობილობებით.



**ნახ. 1.3.** მემკვიდრეობითი პრეამბულა და 802.11ax პრეამბულა

მემკვიდრეობითი ნაწილი შეიცავს ტრენინგის ველებს, რომლებიც ახდენს გადამცემისა და მიმღების სინქრონიზაციას, და მემკვიდრეობითი სიგნალის ველს (L-SIG), რომელიც აღწერს პარამეტრებს ფრეიმის დანარჩენი ნაწილისთვის. კერძოდ, L-SIG საშუალებას იძლევა გამოითვალოს

ფრეიმის ხანგრძლივობა. მიუხედავად იმისა, რომ მემკვიდრეობითი მოწყობილობები ახდენს ფრეიმის დანარჩენი ნაწილის დეკოდირებას შეცდომებით, ისინი არხს დაკავებულად მიიჩნევენ, იმ შემთხვევაშიც კი, თუ სიგნალის სიმძლავრე ძალიან დაბალია.

მაღალი ინტერფერენციების შემთხვევაში 802.11ax ფრეიმის დეტექტირების გასამარტივებლად ჰრეამბულის HE ნაწილი იწყება L-SIG ველის გამეორებით, რასაც მოჰყვება სავალდებულო HE-SIG-A ველი, ოფციური HE-SIG-B ველი და ტრენინგის ველები (HE-STF და HE-LTF), რომლებიც საჭიროა MIMO-ს კონფიგურირებისთვის.

ახლა განვიხილოთ HE-SIG-A და HE-SIG-B ველები უფრო დეტალურად. HE-SIG-A აწვდის ინფორმაციას MCS-ის შესახებ, სინძირული ზოლის სიგანეზე, სივრცითი ნაკადების რაოდენობასა და სხვა პარამეტრებზე, რომლებიც საჭიროა ფრეიმის დანარჩენი ნაწილის სწორად დეკოდირებისთვის. TGax-მა განახორციელა MAC-ის სიგნალური ნაწილის ელემენტების გადატანა PHY ჰრეამბულაში. ასეთი მიდგომა ფართოდ არის გამოყენებული დაწყებული 802.11ah-დან. იმ გარემოების გათვალისწინებით, რომ ჰრეამბულას აქვს საკმაოდ ხისტი სტრუქტურა და იგი გადაცემულია ყველაზე უფრო პრიმიტიული MCS-ის გამოყენებით, ასეთი დამატებითი ინფორმაციის ღირებულება მაღალია.

ვინაიდან 802.11ax ქსელები განკუთვნილია როგორც შენობის შიგნით, ასევე შენობის გარეთ განთავსებისთვის, გადაცემები მიდრეკილია დოპლერის ეფექტისკენ, რაც ძირითადად გამოწვეულია ისეთი სწრაფად მოძრავი ობიექტებიდან, როგორებიცაა მანქანები და მატარებლები, სიგნალების არეკვლის გამო. მაღალი მობილურობის პირობებში ფუნქციონირების გასაუმჯობესებლად, 802.11ax გვთავაზობს, პერიოდულად ჩასვათ PHY-ში ჰაკეტის სასარგებლო დატვირთვის საცნობარო სიგნალი, მაგალითად, HE-LTF ველის ასლები. ამ საცნობარო სიგნალების წყალობით, არხი შეიძლება შეფასდეს არა მხოლოდ ჰაკეტის ჰრეამბულის მიღების დროს, არამედ მუდმივად მთელი ჰაკეტის მიღების განმავლობაში, რაც ძალიან ნაყოფიერია მაღალსიჩქარიანი კომუნიკაციებისთვის, ანუ, როდესაც არხი სწრაფად ცვალებადია.

ისეთი არხის გამოყენების შემთხვევაში, რომლისთვისაც ზოლი  $\geq 40$  მჰც-ზე, HE-SIG-A ველი დუბლირდება თითოეულ 20 მჰც ქვეარხზე. SU ფრეიმების გაფართოებული დიაპაზონის ვარიანტში, HE-SIG-A-ის გამეორება ხდება ბიტების ინტერლივინგის დამატებითი პროცედურის შემდეგ.

როგორც UL და DL SU გადაცემის შემთხვევაში, ასევე UL MU გადაცემის შემთხვევაში, ყველა საჭირო ინფორმაცია შეიძლება მოთავსდეს



HE-SIG-A-ში, რომელიც შედგება მექვიდრეობითი ნაწილის ორი OFDM სიმბოლოსაგან. ამასთან, DL MU გადაცემის შემთხვევაში, სხვადასხვა მომხმარებლისთვის ინფორმაცია შეიძლება განსხვავდებოდეს და თითოეული მათგანისთვის ცალკე უნდა იყოს მითითებული. ამ შემთხვევაში, ცვლადი სიგრძის დამატებითი HE-SIG-B ველი შედის ფრეიმის პრეამბულაში. კერძოდ, ველი შეიცავს ორ ბლოკს: ერთს საერთო და ერთს კონკრეტული მომხმარებლის შესახებ ინფორმაციით. საერთო ბლოკში აღწერილია OFDMA-სთვის რესურსების გამოყოფა, ხოლო კონკრეტული მომხმარებლის ბლოკი შედგება რამდენიმე ქვეველისაგან, რომლებიც განსაზღვრავს თითოეული რესურსული ერთეულისთვის მის MCS-ს, სივრცითი ნაკადების რაოდენობას და ა.შ.

HE-STF და HE-LTF ველებს იყენებენ MIMO-სთვის. კერძოდ, HE-STF ველის ძირითადი დანიშნულებაა MIMO გადაცემისას გაძლიერების ავტომატური რეგულირების შეფასების გაუმჯობესება, ხოლო HE-LTF ველები მიმღებისთვის იძლევა საშუალებას, რომ შეაფასოს MIMO არხი გადაცემის კონსტელაციის ამსახველ გამოსავლელ მოწყობილობებსა და მიმღებ მოწყობილობებს შორის.

მექვიდრეობითი PHY პროტოკოლის მონაცემთა ბლოკის მსგავსად, მონაცემთა ველი შეიცავს სიგნალის ქვეველს, რომელიც საჭიროა კოდირების/დეკოდირების სკრემბლერის და კოდირებული MAC ფრეიმის ინიციალიზაციისთვის. მონაცემთა ველი გადაიცემა 4-ჯერ უფრო გრძელი OFDM სიმბოლოებით.

სიმბოლოების ხანგრძლივობის ოთხჯერ გაზრდა გულისხმობს მიმღების მხარეს 4-ჯერ მეტ გაანგარიშებას, მაშინ, როდესაც მიმღებისთვის დროის მონაკვეთი, რომლის განმავლობაშიც მან უნდა გააკეთოს ასეთი გამოთვლები დადასტურების ან გამოძახილის უკან გაგზავნის წინ, შემოიფარგლება SIFS-ით. ამან შეიძლება პრობლემები შეუქმნას იაფფასიან Wi-Fi მოწყობილობებს, რომლებიც ვერ შეძლებენ, დროულად მოახდინონ დადასტურების შეტყობინების გენერირება. პრობლემის პირდაპირი გადაწყვეტა – SIFS-ის გაზრდა, არ მიიღეს უკუთავსებადობასთან დაკავშირებული სიძნელების გამო და იმის გამოც, რომ შემცირდებოდა არხის გამოყენების ეფექტიანობა. ამის ნაცვლად, TGax-მა უზრუნველყო ფრეიმის კუდის განანგრძლივების შესაძლებლობა სპეციალური გაფართოების ველის ჩასმით. იმისთვის, რომ მოხდეს ოვერჰედის ამ გაფართოებით გამოწვეული დანახარჯის მინიმიზაცია, მისი ხანგრძლივობა მოქნილია და დამოკიდებულია როგორც მიმღებისთვის განკუთვნილ ფრეიმზე, ასევე სასარგებლო დატვირთვის ზომიზე. კერძოდ, როდესაც

თითოეული STA აცხადებს თავის შესაძლებლობებს, მიუთითებს, რომელი მაქსიმალური გაფართოებაა საჭირო (0, 8 მკწმ თუ 16 მკწმ), იმისათვის, რომ ფრეიმი დამუშავდეს მოცემული MCS-ით და სივრცითი ნაკადების რაოდენობით. აღვნიშნოთ, რომ ეს მნიშვნელობა შეიძლება შემცირდეს, თუ კოდირებული სასარგებლო დატვირთვა არ იყოფა OFDM სიმბოლოს ზომაზე და, ამგვარად, ბოლო OFDM სიმბოლო შეიცავს შევსებას ნულებით. ასეთ შემთხვევაში მიმღებს სჭირდება ნაკლები დრო, იმისათვის, რომ მოახდინოს ასეთი შემცირებული OFDM სიმბოლოსგან მიღებული ბიტების დეკოდირება. კერძოდ, ასეთ შემთხვევაში OFDM-ის ბოლო სიმბოლო იყოფა თანაბარი ზომის 4 სეგმენტად და გაფართოება შეიძლება შემცირდეს მაქსიმალური მოთხოვნილი მნიშვნელობიდან რიცხვით, რომელიც ტოლია ცარიელი სეგმენტების რაოდენობის და 4 მკწმ-ს ნამრავლისა.

## 1.4 MU გადაცემა და არხზე წვდომა

### 1.4.1 802.11ax-ის OFDMA-ს ძირითადი მახასიათებლები

ვინაიდან OFDMA-ს შემუშავება 802.11ax ქსელებისთვის წარმოადგენს არატრინიალურ ამოცანას, შემოთავაზებულ იქნა ამ ამოცანის გადაჭრის მრავალი მიდგომა. საბოლოოდ TGax-მა შეიმუშავა ძალზე მოქნილი და ეფექტიანი მიდგომა, რომელიც შეიძლება გამოყენებულ იქნეს როგორც დეტერმინირებული, ასევე შემთხვევითი წვდომისთვის. გავიხილოთ დეტალურად ეს მიდგომა.

802.11ax-ში არხის რესურსები განაწილებულია დროისა და სიხშირის მიხედვით, მაგრამ იმისათვის, რომ გამარტივდეს რესურსების მართვა და მოწყობილობების ფუნქციონირება და, ასევე, შენარჩუნდეს თავსებადობა უკვე არსებულ მოწყობილობებთან, OFDMA გადაცემა ორგანიზებულია ფრეიმების მიხედვით. ეს ნიშნავს, რომ ფრეიმს შეუძლია გადაიტანოს ინფორმაცია მრავალი STA-დან ან მრავალი STA-სკენ. ასეთ ფრეიმში, სხვადასხვა ტონი განკუთვნილია სხვადასხვა STA-სთვის, მაგრამ ყველა RU-ს ხანგრძლივობა თითოეული ასეთი ფრეიმის შიგნით ერთნაირია. აღვნიშნავთ, რომ RU არის ერთეული OFDMA ტერმინოლოგიაში, რომელიც გამოიყენება WLAN-ში, რათა აღნიშნოს 78.125 კჰც სიხშირის გატარების ზოლის ქვეგადამტანების ჯგუფი (ტონები), რომლებიც გამოიყენება DL და UL გადაცემაში. RU შეიძლება შეიცავდეს 26, 52, 106, 242, 484, 996 ან  $2 \times 996$  ტონს (სამსახურებრივი ტონების ჩათვლით). მთლიანი 20 მჰც ზოლი, 40 მჰც ზოლი, 80 მჰც ზოლი და 80+80 (160) მჰც ზოლი თანმიმდევრულად შეესაბამება 242 ტონის შემცველ RU-ს, 484 ტონის შემცველ

RU-ებს, 996 ტონის შემცველ RU-ებს, და ორ 996 ტონის შემცველ RU-ებს. ერთი ფართო RU შეიძლება დაიყოს ორ დაახლოებით ორჯერ ვიწრო RU-დ. თავის მხრივ, თითოეული მათგანი შეიძლება ისევ დაიყოს ერთმანეთისაგან დამოუკიდებლად. ერთადერთი გამონაკლისია 242 ტონის შემცველი RU, რომელიც შეიძლება შეიცვალოს ორი 106 ტონის შემცველი RU-თი და ერთი 26 ტონის შემცველი RU-თი. თითოეული ზოლისთვის RU-ების მაქსიმალური რაოდენობა მოცემულია 1.2 ცხრილში. MU-MIMO-ს გამოყენებით რვამდე მომხმარებელი შეიძლება განეკუთვნოს ერთ RU-ს. ასევე შესაძლებელია, ოთხამდე სივრცითი ნაკადი განაწილდეს ერთ მომხმარებელზე, თუ სივრცითი ნაკადების ჯამური რაოდენობა არ აღემატება რვას.

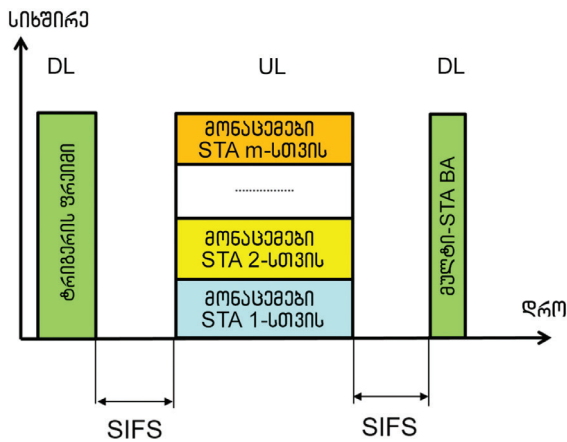
RU-ს ტიპი	20 მჰც	40 მჰც	80 მჰც	160 (80+80) მჰც
26 ტონი	9	18	37	74
52 ტონი	4+1	8+2	16+5	32+10
106 ტონი	2+1	4+2	8+5	16+10
242 ტონი	1	2	4+1	8+2
484 ტონი	-	1	2+1	4+2
996 ტონი	-	-	1	2

**ცხრილი 1.2.** თითოეული სიხშირული ზოლისთვის RU-ების მაქსიმალური რაოდენობა. N+n ნიშნავს „N-ს დამატებული n რაოდენობის 26 ტონის შემცველი RU”

ახლა განვიხილოთ, თუ როგორ არის ორგანიზებული DL და UL OFDMA გადაცემები. DL OFDMA გადაცემის შემთხვევაში საერთო პრეამბულის HE-SIG-B ველი შეიცავს RU-ების განაწილების რუკას, რომელსაც მოსდევს თითოეული მომხმარებლის კონტენტის ველები, რომლებიც აღნიშნავს იმ RU-ებს, რომლებიც განსაზღვრული უნდა იყოს კონკრეტული STA-სთვის და გადაცემის პარამეტრებს (სივრცითი ნაკადების რაოდენობას, MCS-ს, კოდირებას და ა.შ.), რომლებიც გამოყენებული უნდა იყოს ამ STA-ს მიერ. აღვნიშნოთ, რომ RU-ს შეუძლია წარმოადგინოს ან SU ან MU-MIMO განთავსება. უკანასკნელ შემთხვევაში სივრცითი კონფიგურაცია ასევე უნდა იყოს განსაზღვრული და მიწოდებული STA-სთვის.

UL MU გადაცემის ორგანიზება უფრო რთული ამოცანაა. MU გადაცემა Wi-Fi-ში სინქრონიზდება დროის დომენში. იმის გამო, რომ ძნელია მკაცრი დროითი სინქრონიზაციის შენარჩუნება, AP კოორდინაციას უწევს

UL MU გადაცემას შემდეგნაირად. AP გადასცემს მმართველი ფრეიმის ახალ ტიპს – ტრიგერის ფრეიმს, რომელშიც მოცემულია მოახლოებული UL MU გადაცემის საერთო პარამეტრები (ხანგრძლივობა, დამცავი ინტერვალი (GI), რაც ერთი და იგივე იქნება ყველა იმ STA-სთვის, რომელიც მონაწილეობს UL MU გადაცემაში). AP ასევე გამოყოფს RU-ებს STA-ებისთვის და განსაზღვრავს გადაცემის პარამეტრებს თითოეული კონკრეტული STA-სთვის (MCS-ს, კოდირებას და ა.შ.). იმისთვის, რომ მიღწეულ იქნეს სინქრონიზაცია, MU გადაცემა ხორციელდება დაუყოვნებლივ, ანუ SIFS ფრეიმის შემდეგ (იხ. ნახ. 1.4). თუ გავითვალისწინებთ, რომ UL გადაცემისთვის მზადებას შეიძლება უფრო მეტი დრო დასჭირდეს, ვიდრე ეს SIFS-ის ხანგრძლივობაა, AP-ს აქვს შესაძლებლობა, ჩაამატოს ტრიგერის ფრეიმი.



**ნახ. 1.4.** UL OFDMA გადაცემის მაგალითი

UL MU OFDMA გადაცემისთვის AP მიიღებს სიგნალებს სხვადასხვა STA-სგან თითქმის ერთნაირი სიმძლავრის დონით. ამისთვის, 802.11ax განსაზღვრავს სიმძლავრის წინასწარი კორექტირების მექანიზმს, რომლის თანახმად, AP მიუთითებს ტრიგერის ფრეიმში მის მიმდინარე გადაცემის სიმძლავრეს და მიზნობრივი სიგნალის სიმძლავრეს, რომელსაც AP ელოდება, რომ მიიღოს STA-დან შემდგომი UL გადაცემის დროს. ამრიგად, STA-მ იცის AP-ს გადაცემის სიმძლავრე და მიღებული ტრიგერის ფრეიმის სიგნალის სიმძლავრე, და შეუძლია, შეაფასოს AP-სთვის გზაში დანაკარგები. შესაბამისად, მას შეუძლია, გამოთვალოს შესაბამისი გადაცემის სიმძლავრე შემდგომი UL გადაცემისთვის. გასათვალისწინებე-

ლია ის გარემოება, რომ, რადგან AP (და არა STA!) ირჩევს MCS-ს UL გადაცემებისთვის, თითოეული STA ასევე შეიცავს ინფორმაციას მისი UL პოტენციური ენერგეტიკული შესაძლებლობების შესახებ, ანუ სხვაობას მისი გადაცემის მაქსიმალურ სიმძლავრესა და მიმდინარე სიმძლავრეს შორის, რომელიც საჭიროა მისთვის განკუთვნილი MCS-ისთვის.

ეფექტიანობის მისაღწევად, AP-მ უნდა გაანაწილოს RU-ები მხოლოდ იმ STA-ებზე, რომლებსაც აქვთ მონაცემები გადასაცემად. ამისთვის STA-ები AP-ს აცნობებენ მათ ხელთ არსებულ ბუფერული მონაცემების რაოდენობას. ასეთი ანგარიშები შეიძლება მოითხოვოს ან AP-მ, ან STA-ებმა გაგზავნონ დამოუკიდებლად. კიდევ ერთი პრობლემა ჩნდება იმის გამო, რომ AP-მ არ იცის, არის თუ არა არხი STA-ების თვალსაზრისით თავისუფალი. თითოეული STA-სთვის AP ტრიგერის ფრეიმში მიუთითებს, უნდა განაზოცელოს თუ არა STA-მ გადამტანის ზონდირება OFDMA გადაცემამდე. თუ საჭიროა გადამტანის ზონდირება, STA უნდა ასრულებდეს გადამტანის როგორც ვირტუალურ, ისე ფიზიკურ ზონდირებას, მინიმუმ, 20 მჰც არხში ან არხებში, რომლებიც შეიცავს STA-სთვის გამოყოფილ ქვეგადამტანებს. თუ გადამტანის ფიზიკური ზონდირება მიუთითებს დაკავებულ გარემოზე, ანუ STA აფიქსირებს მაღალ ენერგიას, იგი აუქმებს UL გადაცემას. UL გადაცემა აკრძალულია მაშინაც კი, როდესაც ზოგიერთი გადამტანი თავისუფალია, მაგრამ არა ყველა. ამასთან, ზოგ შემთხვევაში STA-ს შეუძლია უგულებელყოს გადამტანის ვირტუალური ზონდირება (ანუ NAV), თუ ის მითითებულია ფრეიმით, რომელიც წარმოიქმნება BSS-ის შიგნით არსებული მეზობლისგან, ან თუ STA აპირებს გადასცეს Ack ან ბლოკური Ack, რომელთა ხანგრძლივობა არ აღემატება გარკვეულ შეთანხმებულ მნიშვნელობას. ამასთან, STA ყოველთვის აუქმებს UL გადაცემას, თუ მისი ხანგრძლივობა აღემატება UL MU გადაცემის ხანგრძლივობას, რომელიც მითითებულია ტრიგერის ფრეიმში.

#### **1.4.2 მახასიათებლების გაუმჯობესება**

802.11ax ასევე საშუალებას იძლევა შესრულდეს UL MU გადაცემა მყისიერად DL MU გადაცემის შემდეგ, რაც შეიძლება სასარგებლო იყოს, მაგალითად, დადასტურების ფრეიმების ერთდროულად გაგზავნისთვის. ამისთვის, DL MU გადაცემა უნდა შეიცავდეს ტრიგერის ფრეიმსაც, რომელიც აღწერს UL RU განაწილებას. მეტიც, ამ შემთხვევაში არსებობს UL MU გადაცემის მოთხოვნის კიდევ ერთი შესაძლებლობა, კერძოდ, DL PPDU-ს MAC სათაურში ინფორმაციის ჩართვით. ანალოგიურად, AP-ს შეუძლია დაადასტუროს UL MU გადაცემა DL MU PPDU-ს საშუალებით

დადასტურების გაგზავნით. აღწერილი იდეების შესაბამისად, 802.11ax ახორციელებს კასკადურ MU გადაცემებსაც, რაც ნიშნავს, რომ გადაცემის შესაძლებლობის (TXOP) ფარგლებში DL MU და UL MU გადაცემები შეიძლება დაფუძნებული იყოს მონაცვლეობით პრინციპზე. გასათვალისწინებელია ის ფაქტიც, რომ კასკადური MU გადაცემების დროს AP-ს შეუძლია ფრეიმების გაცვლა MU წესით STA-ების სხვადასხვა ნაკრებებთან.

MU გადაცემები Wi-Fi-ში უნდა იყოს გათანაბრებული დროის დომენში. ამრიგად, თუ STA-ს აქვს მოკლე ფრეიმი გადასაცემად, ის ან შევსების პროცედურას იყენებს, ან ცდილობს გააერთიანოს იგი სხვა ფრეიმთან. იმ შემთხვევაში, თუ დარჩენილი სივრცე არ არის საკმარისი მთელი ფრეიმის აგრეგაციისთვის, ერთადერთი ვარიანტია შევსება. არხის რესურსების გაფლანგვის თავიდან ასაცილებლად, 802.11ax STA-ს ეძლევა შესაძლებლობა, მოახდინოს ფრეიმის ფრაგმენტაცია, რათა დარჩენილი საეთერო დრო შეავსოს მომხმარებლის სასარგებლო დატვირთვით. გასათვალისწინებელია, რომ მემკვიდრეობით Wi-Fi-ში STA იყენებს ფრაგმენტაციას მხოლოდ მაშინ, როდესაც ფრეიმის ზომა აღემატება ფრაგმენტაციის ზღურბლურ მნიშვნელობას. მეტიც, აკრძალულია აგრეგაციისა და ფრაგმენტაციის ერთად გამოყენება. ეფექტიანობის კიდევ უფრო გასაუმჯობესებლად 802.11ax STA-ს შეუძლია მოახდინოს ფრეიმების აგრეგაცია სხვადასხვა წვდომის კატეგორიებიდან. ამგვარ მიდგომას იყენებენ 802.11ac DL MU MIMO-შიც.

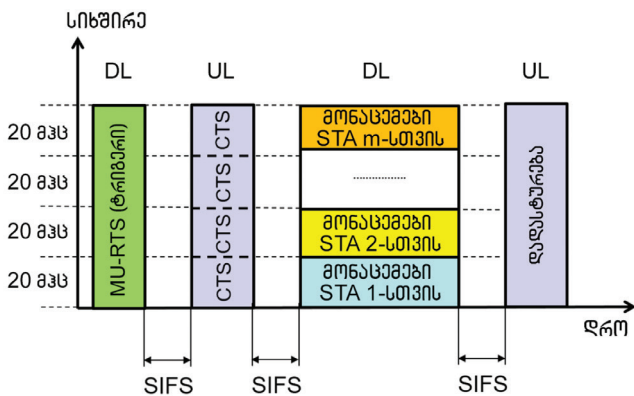
ვინაიდან რამდენიმე ფრაგმენტის გაერთიანება გართულებულია, TGax-მა იპოვა კომპრომისი და განსაზღვრა HE ფრაგმენტაციის რამდენიმე ოფციური დონე. პირველი დონე იძლევა მხოლოდ ერთი ფრაგმენტის გაგზავნის საშუალებას ყოველგვარი გაერთიანების გარეშე. მეორე დონე საშუალებას აძლევს STA-ს, გააერთიანოს არაუმეტეს ერთი ფრაგმენტი თითოეულ MAC სერვისის მონაცემთა ბლოკიდან (MSDU) A-MPDU-ში. დაბოლოს, მესამე დონე იძლევა ორი ან მეტი ფრაგმენტის გაერთიანების საშუალებას თითოეულ MSDU-დან A-MPDU-ში.

### **1.4.3 ტრიგერის სპეციალური ფრეიმები**

OFDMA საშუალებას იძლევა, გაუმკლავდეს სიხშირის მიმართ შერჩევით ინტერფერენციებს STA-ებისთვის საუკეთესო ქვეგადამტანების მინიჭებით. გარდა ამისა, ის ამცირებს ოვერჰედს, რომელიც განსაზღვრულია კონფლიქტების პერიოდისას განმეორებითი გადაცემის ლოდინის, ანუ ბექოფის დროით, ფრეიმებს შორის არსებული ინტერვალებით, პრეამბულებით და PHY სათაურებით, რომელთაც გადააქვთ საერთო ინფო-

რმაცია ყველა STA-სთვის DL გადაცემის შემთხვევაში. ოვერჰედი უფრო დიდია მოკლე მმართველი ფრეიმებისთვის, რომელთათვისაც OFDMA განსაკუთრებით ხელსაყრელია. ამრიგად, მონაცემთა და მმართველი ფრეიმებისთვის ძირითადი ტრიგერის ფრეიმის გარდა, 802.11ax-ს აქვს ტრიგერის სპეციალური ფრეიმები, რომლებიც ახდენენ „მოთხოვნა გაგზავნაზე“ (RTS) და „მზადყოფნა გაგზავნაზე“ (CTS) მექანიზმების ინიცირებას ხელსაყრელ ჰარალელურ რეჟიმში, ითხოვენ STA-ების ჯგუფიდან ბლოკურ დადასტურებებს და აგროვებენ სხივების ფორმირების შესახებ ანგარიშებს ან ბუფერის სტატუსის შესახებ ანგარიშებს (BSRs). ახლა განვიხილოთ უფრო დეტალურად, თუ როგორ იყენებენ ამ ფრეიმებს.

DL MU გადაცემის დამალული კვანძებისგან დასაცავად, TGax-მა შემოიტანა MU-RTS/CTS კვიტირება (ინფორმაციის სტრუქტურული ერთეულის მიღება/გადაცემის დადასტურება). 802.11ax-ში UL MU გადაცემის წყალობით CTS ფრეიმების გაგზავნა ერთდროულად შეიძლება. MU-RTS/CTS ფრეიმების ძირითადი თავისებურება ის არის, რომ CTS ფრეიმი გადაეცემა ძირითადი 20 მჰც, 40 მჰც, 80 მჰც არხით ან მთლიანი 160 მჰც ან 80+80 მჰც არხით, რომელიც დუბლირებულია თითოეულ 20 მჰც ქვეარხზე მემკვიდრეობით მიღებული CTS ფრეიმის ფორმატის გამოყენებით. არხი, რომელსაც გამოიყენებს კონკრეტული STA, რათა გადასცეს CTS, განისაზღვრება MU-RTS-ით და უნდა შეიცავდეს ყველა იმ ქვეგადამტანს, რომელიც გამოყენებული იქნება STA-ზე შემდეგი გადაცემისთვის. ეს გაკეთებულია NAV-ის დასაყენებლად ყველა მემკვიდრეობით STA-ში, რომლებიც იღებს ამ CTS-ს, და ამით გადაცემა დაცულია კონფლიქტებისაგან.



ნახ. 1.5. MU-RTS/CTS გაცვლის მაგალითი

ეს პროტოკოლი საშუალებას აძლევს რამდენიმე მიმღებს, ერთდროულად გადასცენ CTS ფრეიმები, თუმცა ეს CTS ფრეიმები აბსოლუტურად თანაბარია PHY თვალსაზრისით, ამიტომ ისინი არ შედის კონფლიქტში ერთმანეთთან (იხილეთ ნახ. 1.5). მიუხედავად ამისა, ამგვარ მიდგომას აქვს მნიშვნელოვანი შეზღუდვა. მას შემდეგ, რაც მიიღო ერთნაირ არხში რამდენიმე თანაბარი CTS, AP-ს არ შეუძლია განსაზღვროს, თუ რომელი მიმღები ან მიმღებები აგზავნიან CTS-ს. ასეთმა შეზღუდვამ შეიძლება აიძულოს AP, ან არ დაგეგმოს ჰარალებული გადაცემები, რომლებიც იკავებს ქვეგადამტანებს იმავე 20 მჰც არხიდან, ან უგულბებლად იყოს ის ფაქტი, რომ ზოგიერთმა მიმღებმა შეიძლება არ გასცეს პასუხი CTS-ს. ვინაიდან ორივე შემთხვევაში გზამ შეიძლება გააუარესოს მანქანათმშენებლები, აუცილებელია უკეთესი გამოსავლის მოძებნა.

802.11ax-მ შემოგვთავაზა UL MU გადაცემის დადასტურების დამატებითი გზა ახალი მულტი-STA ბლოკური დადასტურების (BA) ფრეიმების გაგზავნით. არსებული ტრაფიკის განმსაზღვრელი მულტი-BA ფრეიმის მსგავსად, რომელსაც იყენებენ სხვადასხვა წვდომის კატეგორიებიდან მიღებული ფრეიმების ჯგუფის დასადასტურებლად, მულტი-STA BA ფრეიმს იყენებენ Ack-ების ან BA-ების შესაცვლელად რამდენიმე STA-სთვის. გადაცემის დროის შესამცირებლად, მულტი-STA BA ფრეიმის გაგზავნა შესაძლებელია მექვიდრეობით მიღებული მეთოდით, მხოლოდ მექვიდრეობითი 802.11a პრეამბულით. მულტი-STA BA-ს შეუძლია შეასრულოს BA-ს ან Ack-ს როლი.

802.11ax-ით განსაზღვრული კიდევ ერთი ახალი ფრეიმი არის MU ბლოკური დადასტურების მოთხოვნის (BAR) ფრეიმი, რომელიც წარმოადგენს ტრიგერის ფრეიმის ვარიანტს. მას იყენებენ UL MU გადაცემაში მრავალი STA-სგან დადასტურების მიღებაზე მოთხოვნის გასაგზავნად ინდივიდუალური BAR ფრეიმების გაგზავნის ნაცვლად. ანალოგიურად, 802.11ax განსაზღვრავს ჯგუფურ ტრანსლაციას განმეორებითი მცდელობებით (GCR) – GCR MU BAR, იმისათვის, რომ მოხდეს გამოკითხვა დადასტურებათა შესახებ განმეორებითი მცდელობებით, რომელიც ჯგუფური გადაცემის ახალი მეთოდია, დანერგილი 802.11ax-ში. დადასტურების გარდა, MU BAR ფრეიმის მიმღებს შეუძლია გადასცეს სხვა მონაცემები ან მმართველი ფრეიმი, თუ ის არ აღემატება მითითებულ UL MU ხანგრძლივობას.

დაბოლოს, 802.11ax განსაზღვრავს ტრიგერის სპეციალურ ფრეიმებს, რომლებსაც იყენებენ სხივების ფორმირების ან არხის შესახებ ინფორმაციის მოთხოვნის მიზნით.



#### 1.4.4 UL OFDMA შემთხვევითი წვდომით

ზემოთ აღწერილი UL MU დაგეგმილი წვდომის გარდა, TGax-მა შექმნა დამატებითი მექანიზმი, რომელიც საშუალებას იძლევა განზოცივლდეს UL OFDMA შემთხვევითი გადაცემები. ასეთი ფუნქცია განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია, როდესაც AP-მ არ იცის, თუ რომელ ასოცირებულ STA-ებს აქვთ გადასაცემი მონაცემები, ან როდესაც არასოცირებულ STA-ს სურს გადასცეს ასოციაციის მოთხოვნა. EDCA არ არის ეფექტიანი მოკლე გადაცემებისთვის, რადგან ფორმირდება დიდი ოვერჰედი, გამოწვეული PHY სათაურებით და ფრეიმთაშორისი სივრცეებით.

შემუშავებული შემთხვევითი წვდომა მსგავსია ლიტერატურიდან ცნობილი მრავალარხიანი სემენტირებული ALOHA სისტემისა, კერძოდ, ტრიგერის ფრეიმის საშუალებით შეიძლება გამოიყოს რამდენიმე RU შემთხვევითი წვდომისთვის. ამასთან, თუ ზოგიერთი RU-სთვის მომხმარებლის იდენტიფიკატორი არის 0 ან 2045, ფრეიმში შესაბამისი ჩანაწერი განსაზღვრავს მომიჯნავე RU-ების ჯგუფს შემთხვევითი წვდომისთვის, რომელთა გამოყენება შესაძლებელია ასოცირებული და არასოცირებული STA-ების შესაბამისად. RU ჯგუფები თანაბარი ზომისაა და აქვთ ერთი და იმავე გადაცემის ჰარამეტრები. მომიჯნავე RU-ების რაოდენობასთან ერთად, AP-მ შეიძლება მიუთითოს, რომ TXOP-ის ბოლომდე არცერთი სხვა RU არ არის დაგეგმილი გამოსაყენებლად შემთხვევითი წვდომისთვის კასკადური MU გადაცემების სერიაში.

იმის გადასაწყვეტად, აწარმოონ თუ არა გადაცემა და რომელი RU-ის გამოყენებით, STA-ები იყენებენ ეგრეთ წოდებულ OFDMA-ს ბექოფის პროცედურა OBO-ს. თითოეული STA ირჩევს შემთხვევით მნიშვნელობას  $[0, CW]$ -დან, სადაც CW არის OFDMA-ს კონკურენციის ფანჯარა (CW). თუ OBO-ს მიმდინარე მნიშვნელობა ნაკლებია ტრიგერის ფრეიმის მიერ შემთხვევითი წვდომისთვის გამოყოფილი RU-ების რაოდენობაზე, STA შემთხვევითი წესით ირჩევს RU-ს შემთხვევითი წვდომისთვის გამოყოფილი ჯგუფიდან და გადასცემს ფრეიმს ამ RU-ს გამოყენებით. წინააღმდეგ შემთხვევაში, STA ამცირებს OBO-ს შემთხვევითი წვდომისთვის გამოყოფილი RU-ების რაოდენობით და ელოდება ტრიგერის შემდეგ ფრეიმს, რომელიც შეიცავს RU-ებს შემთხვევითი წვდომისთვის. გადაცემის მცდელობის წარუმატებლობის შემთხვევაში, STA აორმაგებს CW-ს, სანამ არ მიაღწევს მაქსიმალურ CWmax მნიშვნელობას და არ აირჩევს OBO-ს მნიშვნელობას ახალი ინტერვალიდან. თუ გადაცემის მცდელობა წარმატებულია, STA ადადგენს CW-ს მინიმალური მნიშვნელობით CWmin. CWmax და CWmin AP-ს მიერ მითითებულია შუქურებში და ზონდირე-

ბაზე რეაგირების ფრეიმებში. ვინაიდან შემთხვევითი წვდომა ნაკლებად ეფექტიანია, ვიდრე დაგეგმილი წვდომა, მისი გამოყენება მიზანშეწონილია მხოლოდ მოკლე პაკეტების გადაცემისთვის და BSR-სთვის. ამ უკანასკნელ შემთხვევაში, STA-ს, რომელსაც აქვს მონაცემები გადასაცემად, შეუძლია შექმნას BSR და გააგზავნოს ის შემთხვევითი წვდომით, რათა სთხოვოს AP-ს არხის რესურსები. აღსანიშნავია, რომ ასეთი სქემა უფრო ეფექტიანი აღმოჩნდა, ვიდრე სუფთა UL OFDMA შემთხვევითი წვდომით, როგორც ეს დადასტურებულია ლიტერატურაში არსებული კვლევებით.

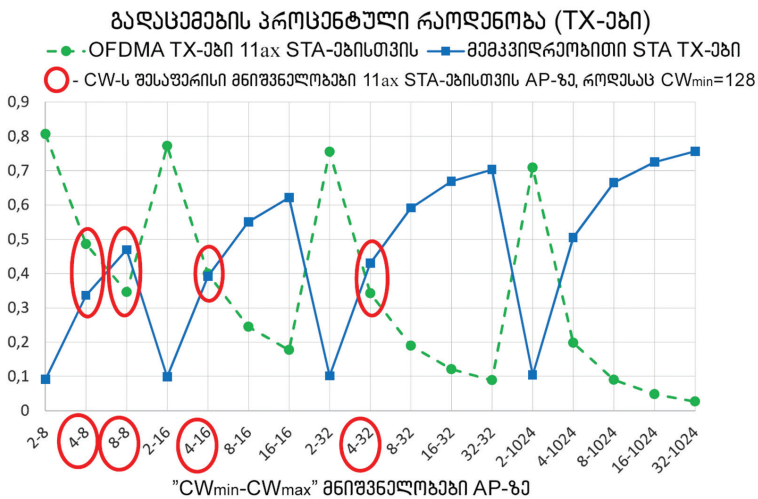
#### **1.4.5 EDCA გაუმჯობესებანი**

802.11ax ქსელებში, OFDMA მუშაობს მემკვიდრეობითი მექანიზმის – მრავალჯერადი წვდომა გადამტანის ზონდირებით და კონფლიქტების თავიდან აცილებით (CSMA/CA) – თავზე, რომელსაც უწოდებენ EDCA-ს. ეს ნიშნავს, რომ ტრიგერის ფრეიმის გადასაცემად, AP-მ უნდა იბრძოდლოს არხისთვის სხვა STA-ებთან. განვიხილოთ AP-ს შემცველი ქსელი და რამდენიმე STA, რომლებსაც აქვთ UL ტრაფიკი. ვინაიდან STA-ების რაოდენობა, როგორც წესი, ბევრად მეტია ერთზე, AP იშვიათად იმარჯვებს შეჯიბრებაში, თუ AP იყენებს არხზე წვდომის იმავე პარამეტრებს. ამასთან, როდესაც AP ამ პროცესში აღწევს წარმატებას, იგი აგზავნის ტრიგერის ფრეიმს, რათა გამოეყოს რესურსები ასოცირებული STA-ებისთვის. როგორც ადრე აღვნიშნეთ OFDMA ბევრად უფრო ეფექტიანია, ვიდრე EDCA. ასე რომ, უფრო მაღალი გამტარუნარიანობის მისაღწევად STA-ებს იშვიათად უნდა ჰქონდეთ წვდომა არხზე EDCA-თი, და მათ თითქმის ყოველთვის უნდა გამოიყენონ OFDMA. სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ, AP-მ თითქმის ყოველთვის უნდა გაიმარჯვოს ამ კონკურენციაში. საბედნიეროდ, AP-ს შეუძლია შეცვალოს EDCA პარამეტრები ყველა ასოცირებული STA-სთვის, ამ პარამეტრების შექურებით გადაცემით. ამრიგად, CWmin და CWmax მაღალი მნიშვნელობების დაყენებით AP-ს შეუძლია, თითქმის აკრძალოს EDCA გადაცემები ქსელში.

პრობლემა წარმოიქმნება მაშინ, თუ ქსელში არსებობს მემკვიდრეობითი STA-ები, რომელთაც არ შეუძლიათ გამოიყენონ OFDMA გადაცემა. ვინაიდან EDCA პარამეტრების ინდივიდუალურად დაყენება შეუძლებელია, CWmin და CWmax იმავე მაღალი მნიშვნელობების დაყენება როგორც 802.11ax-სთვის, ასევე მემკვიდრეობითი STA-ებისთვის, დაბლოკავს მემკვიდრეობით STA-ებს. ამან შეიძლება გამოიწვიოს სიტუაცია, როდესაც მემკვიდრეობით მიღებული აპარატურის კლიენტების საქმიანობა მნიშვნელოვნად გაუარესდება. კიდევ ერთი პრობლემა დაკავშირებულია

არასწორად ფუნქციონირებად AP-სთან, რომელიც გამოყოფს ნაკლებ RU-ებს კონკურენტული ვენდორის კლიენტისთვის. ამგვარი პრობლემების თავიდან ასაცილებლად, TGax-ს შემოაქვს EDCA პარამეტრების მეორე ნაკრები, რომელსაც იყენებენ მხოლოდ ის 802.11ax STA-ები, რომელთაც მიენიჭათ RU-ები გარკვეული წინა დროითი ინტერვალის განმავლობაში.

ნახ. 1.6 წარმოადგენს გამოთვლების შედეგებს ქსელის სტრუქტურისთვის, რომელიც შეიცავს ათ მეგვიდრეობით STA-ს და ათ 802.11ax STA-ს. ფრეიმთაშორისი სივრცის საარბიტრაჟო ნომერი (AIFSN) ერთი და იგივეა ყველა მოწყობილობისთვის. მეგვიდრეობითი STA-ები იყენებენ ნაგულისხმევ CW-ს ლიმიტებს: CWmin = 16, CWmax = 1024. 802.11ax STA-ებისთვის, CWmin = 128, CWmax = 1024, ხოლო AP-ს CW-ს საზღვრები იცვლება. ნახ. 1.6 გვიჩვენებს, რომ EDCA პარამეტრების მოწესრიგებით ჩვენ შეგვიძლია განვახორციელოთ არხის რესურსის გაზიარება, როგორც სამართლიანი, ისე ეფექტიანი ფორმით, ანუ 802.11ax STA-ები თითქმის ყოველთვის იყენებენ OFDMA გადაცემებს, ხოლო მეგვიდრეობითი STA-ები მიიღებენ არხის იმდენ დროს, როგორც იღებდნენ 802.11ax-მდე არსებულ ქსელში. ნახ. 1.6-ზე CWmin-ის და CWmax-ის ასეთი შესაფერისი მნიშვნელობები AP-ზე აღნიშნულია წითელი ოვლებით.



**ნახ. 1.6.** OFDMA UL MU გადაცემების პროცენტის და მეგვიდრეობითი STA გადაცემების პროცენტის დამოკიდებულება AP CW-ს პარამეტრებზე

TGax-მა ასევე გააუმჯობესა RTS/CTS მექანიზმი, რაც ხელს უწყობს და-მაღული კვანძებისგან კონფლიქტების შერბილებას და ამცირებს კონ-ფლიქტების ხანგრძლივობას. ისტორიულად RTS/CTS მექანიზმის გამო-ყენება განისაზღვრება გადაცემული მონაცემთა ფრეიმის სიგრძით. თუ ფრეიმის სიგრძე აღემატება RTS-ის ზღურბლოვ მნიშვნელობას, მონა-ცემთა გადაცემას წინ უსწრებს RTS/CTS კვიტირება. TGax-მა შემოგვთავაზა ალტერნატიული RTS/CTS მექანიზმი, რომელსაც აქვს ორი ძირითადი განსხვავება. პირველი, მექანიზმის გამოყენება განისაზღვრება გადაცე-მის ხანგრძლივობით და არა ფრეიმის სიგრძით, რაც ხსნის მექანიზმის სახელს – ხანგრძლივობაზე დაფუძნებული RTS/CTS ზღურბლი. ცხადია, უფრო ბუნებრივია ფოკუსირება გადაცემის ხანგრძლივობაზე, ვიდრე პა-კეტის სიგრძეზე, რადგან მაღალი MCS-ის პირობებში საკმაოდ გრძელი ფრეიმიც კი გადაიცემა საკმარისად სწრაფად, რასაც, საბოლოო ჯამში, მივყავართ შედარებით დიდ ოვერჰედამდე, რაც გამოწვეულია RTS/CTS კვიტირებით, რომელიც განპირობებულია ნელი MCS-ით. მეორე, RTS/CTS ზღურბლზე დაფუძნებული ხანგრძლივობის მნიშვნელობა ექცევა AP-ს მართვის ქვეშ, რომელსაც შეუძლია, უკეთესად განსაზღვროს ქსელში არსებული სიტუაცია და მიუთითოს ზღურბლის მნიშვნელობა ასოცირე-ბულ STA-ებს. ამგვარად, AP-ს შეუძლია შეამციროს ზღურბლი, თუ მოსა-ლოდნელია დამალული კვანძების მხრიდან ჩარევა მჭიდრო გარემოში ან, წინააღმდეგ შემთხვევაში, გაზარდოს იგი, რათა შეამციროს გადაცე-მის ოვერჰედი და მოახდინოს ქსელის რესურსების გამოყენების ოპტი-მიზება.

## **1.5 გადაფარვის მართვა და სივრცის განმეორებითი გამოყენება 802.11ax-ში**

ვინაიდან მჭიდრო განლაგების სტრუქტურა ძალიან მნიშვნელოვანია TGax-ისთვის, უამრავი დისკუსია გაიმართა, თუ როგორ უნდა გაუმჯობე-სებულიყო მუშაობა მჭიდრო ქსელების შემთხვევაში. ამ პრობლემასთან დაკავშირებით TGax, ერთი მხრივ, შეეცადა, შეემცირებინა ქსელებს შო-რის ინტერფერენციები და, მეორე მხრივ, უზრუნველყო სივრცის გა-ნმეორებითი გამოყენების შესაძლებლობა, რაც ნიშნავს ერთდროულ გადაცემებს გადაფარულ ქსელებში და რაც ზრდის მთლიან გამტარუ-ნარიანობას. TGax-ის მნიშვნელოვანი ძალისხმევა უკავშირდებოდა გა-დამტანის ზონდირებას, დინამიური მგრძობელობის ზღურბლებს და გადაცემისას სიმძლავრის დინამიურ მართვას. აქ მოკლედ აღვწერთ მი-ღებულ გადაწყვეტილებებს.

### 1.5.1 BSS-ის ფერი

იმისთვის, რომ განვსაზღვროთ, თუ რომელი BSS-ა ფრეიმის შემქმნელი, ისე, რომ არ მოხდეს მთლიანი ფრეიმის დეკოდირება, 802.11ax იყენებს BSS-ის არაუნიკალურ ID იდენტიფიკატორს, რომელსაც უწოდებენ BSS-ის ფერს და რომელსაც გადასცემენ ფრეიმის პრეამბულაში. თავდაპირველად BSS-ის ფერის ველი შეიცავდა 3 ბიტს, რომელიც პირველად გამოიყენეს 802.11ah-ში. ამ დროს მიზანი იყო ენერჯის მოხმარების შემცირება, ვინაიდან მიმღებს შესაძლებლობა ეძლეოდა, შეეწყვიტა იმ ფრეიმის დეკოდირება, რომელიც მოდიოდა უცხო BSS-იდან. ვინაიდან BSS-ის ფერი არჩეულია შემთხვევითი წესით AP-ს მიერ, 802.11ax-ში ორი მეზობელი BSS-ის ფერი შესაძლებელია ერთმანეთს დაემთხვეს ან კონფლიქტში მოვიდეს ერთმანეთთან. იმისთვის რომ შეემცირებინათ BSS-ის ფერებს შორის კონფლიქტის ალბათობა, TGax დათანხმდა, BSS-ის ფერის ველის სიგრძე 6 ბიტამდე გაეზარდა. კონფლიქტის წარმოშობის შემთხვევაში STA-ებს, რომლებიც დაკავშირებულია AP-სთან, შეუძლიათ აცნობონ მას კონფლიქტის შესახებ და AP-მ შეიძლება დაიწყოს BSS-ის ფერის შეცვლის პროცედურა. ამისთვის ის აცხადებს BSS-ის მომავალ ფერს და დროის მომენტს, როდესაც ფერი უნდა შეიცვალოს შექურების მეშვეობით სპეციალური საინფორმაციო ელემენტის გადაცემის გზით. ამგვარად, ყველა STA-ს, თუნდაც ათეულს, შეუძლია მიიღოს ინფორმაცია BSS-ის ფერის შეცვლის შესახებ. შესაბამისად, ფერის მინიჭება საშუალებას აძლევს მოწყობილობებს, რომ განასხვავონ გადაცემის პროცესები მათი საკუთარი და მეზობელი ქსელებიდან. BSS-ის იდენტიფიკაციას BSS-ის ფერის ველის მიხედვით იყენებენ არხზე წვდომის წესების დადგენისა და ენერჯის დაზოგვის მექანიზმებისთვის. კონკრეტული ფრეიმისთვის BSS-ის ფერის გამორთვის საჭიროების შემთხვევაში ამ ფრეიმის BSS-ის ფერის ველი უნდა დაყენდეს ნულზე.

### 1.5.2 ორი NAV-ის გამოყენება

ორი NAV-ის გამოყენება 802.11ax-ის დამახასიათებელი თავისებურებაა. Wi-Fi არხზე წვდომას ახორციელებს „საუბრამდე მოსმენის“ პრინციპით. ეს ნიშნავს, რომ STA ახორციელებს გადამტანის ზონდირების პროცედურას მანამდე, სანამ ფრეიმს გადასცემდეს. არხი დაკავებულია ითვლება შემდეგ შემთხვევებში:

- 1) თუ გადამტანის ზონდირების პროცესში STA აღმოაჩენს ფრეიმის პრეამბულას, ის განიხილავს არხს, როგორც ფრეიმის ხანგრძლივობის განმავლობაში დაკავებულს, რის აღნიშვნაც ხდება პრეამბულაში.

2) თუ გადამტანის ზონდირების პროცესში STA აღმოაჩენს უცნობ სიგნალს, რომელიც 20 დბმ-ით აღემატება მგრძნობელობის მინიმალური ზღურბლის დონეს.

3) თუ ნაჩვენებია, რომ არხი ვირტუალურად დაკავებულია.

Wi-Fi-ში გადამტანის ვირტუალურ ზონდირებას NAV-ს უწოდებენ და ეს პროცესი ორგანიზებულია შემდეგნაირად. MAC სათაურში STA მიუთითებს NAV-ის მნიშვნელობას, ანუ რა დროის განმავლობაში დაიკავებს არხს შემდგომი ფრეიმების გაცვლის პროცესი. ფრეიმის სწორად დეკოდირების შემდეგ სხვა STA-ები დააყენებენ NAV-ს, ანუ ისინი არხს განიხილავენ, როგორც დაკავებულს მითითებული დროის განმავლობაში. თუ STA მიიღებს ფრეიმს, რომელიც მიუთითებს NAV-ის უფრო მეტ მნიშვნელობას, ის გაზრდის მის NAV-ს; მაგრამ STA არავითარ შემთხვევაში არ შეამცირებს NAV-ის მნიშვნელობას, თუნდაც მითითებული NAV-ის მნიშვნელობა უფრო მცირე იყოს. STA მოახდენს მისი NAV-ის ანულირებას, თუ ის მიიღებს კონფლიქტისაგან თავისუფალ ბოლო ფრეიმს.

802.11ax-მდე არსებულ Wi-Fi სქემებში STA-ები არ იღებდნენ მხედველობაში იმას, თუ რომელი ფრეიმით იყო დადგენილი NAV-ის მნიშვნელობა. თუმცა ამას შეიძლება მივეყვანეთ შემდგომ არასწორ ფუნქციონირებამდე. დავეშვათ, ფრეიმი ერთსა და იმავე BSS-იდან ადგენს NAV-ის მნიშვნელობას STA-სთვის. ამის შემდგომ STA იღებს უკონფლიქტო პერიოდის დასრულების ფრეიმს მასთან გადაფარული BSS-იდან, ანუ OBSS-იდან. არსებული წესების თანახმად, STA-მ უნდა გადატვირთოს NAV და ის ამის შემდეგ აღარ განიხილავს გარემოს, როგორც ვირტუალურად დაკავებულს. იმის გამო, რომ STA აღარ ახდენს რეაგირებას ქსელში არსებულ გადაცემაზე, რისგანაც ის დაცული იყო NAV-ის მიერ, მან შეიძლება დაიწყოს თავისი პირადი გადაცემა, რაც გამოიწვევს კონფლიქტს. ვინაიდან STA-ების მჭიდრო განლაგება ადრე არ იყო ჩვეულებრივი მოვლენა, ასეთი ვითარება ნაკლებად იყო შესწავლილი. თუმცა ეს დასაბუთება აღარ არის მართებული 802.11ax ქსელებისთვის. ამიტომ იმისთვის, რომ თავიდან იქნეს აცილებული NAV-ის გადატვირთვა უკონფლიქტო პერიოდის დასრულების ფრეიმისაგან, რომელიც მოდის OBSS-იდან, 802.11ax-ში STA-ები მხარს უჭერენ ორ NAV-ს: ერთს, საკუთარი BSS-ისთვის, ხოლო მეორეს, ყველა გადაფარული BSS-ისთვის და ისინი ცალ-ცალკე მოახდენენ NAV-ების მოდიფიცირებას.

### **1.5.3 დროის წყნარი პერიოდი**

სპეციალიზებული (Ad Hoc) და პირდაპირი ლინკების გამოყენება პერსპექტიული გადაწყვეტილებებია, რაც ამცირებს არხის დაკავების დროს.

აღვნიშნავთ, რომ პირდაპირი ლინკები ორ STA-ს, რომლებიც დაკავშირებულია ერთსა და იმავე AP-სთან, საშუალებას აძლევენ, დაუკავშირდნენ ერთმანეთს პირდაპირ, AP-ს, როგორც რეტრანსლატორის, გარეშე. ამასთან, 802.11ax ქსელის უშუალო სიახლოვეს ჩატარებულმა ასეთმა ოპერაციებმა შეიძლება გაზარდოს საერთო ინტერფერენციები და გამოიწვიოს მუშაობის მნიშვნელოვანი დეგრადაცია. ამ პრობლემის მოსაგვარებლად, 802.11ax განსაზღვრავს დროის წყნარი პერიოდის (QTP) მექანიზმს. QTP საშუალებას აძლევს STA-ს მოითხოვოს AP QTP-სთვის, რომელიც წარმოადგენს პერიოდული დროის ინტერვალების სერიას, თანაბარი ხანგრძლივობით და რომელსაც იყენებენ Ad Hoc ან პირდაპირი ლინკების მუშაობისთვის. QTP აღიწერება პირველი დარეზერვებული ინტერვალის წანაცვლებით, ინტერვალების ხანგრძლივობითა და პერიოდით, და მოთხოვნილი ინტერვალების მთლიანი რაოდენობით. თუ AP აკმაყოფილებს მოთხოვნას, იგი ავრცელებს ინფორმაციას დარეზერვებული QTP-ს შესახებ და უკრძალავს სხვა STA-ებს QTP-ის განმავლობაში არხზე წვდომას.

#### **1.5.4 მგრძობიარობის ზღურბლთან მორგება და გადაცემის სიმძლავრე**

სივრცის განმეორებით გამოყენების გასაუმჯობესებლად შესაძლოა გამოსავალია მჭიდრო განლაგების პირობებში გადამტანის ზონდირების მექანიზმების გამართვა, მაგალითად, მგრძობიარობის დინამიკური მართვის (DSC) გამოყენებით. DSC-ს იდეა ემყარება გადამტანის ზონდირების ზღურბლის დინამიკურ კორექტირებას, რომელსაც უწოდებენ DSC ზღურბლს და რომელიც განსაზღვრავს, თუ როდის მიიჩნევს STA გარემოს დაკავებულად. ცხადია, რომ BSS-ში გადაცემების დროს OBSS-ისგან დაბლოკვის თავიდან ასაცილებლად, DSC-ის ზღურბლი უნდა გაიზარდოს. ამის მიუხედავად, BSS-ის შიგნით ყველა მოწყობილობას შორის კომუნიკაციის დასაშვებად, DSC ზღურბლი საკმარისად მცირე უნდა იყოს, რომ არ მოხდეს გადაცემის გამოტოვება ამ BSS-ში.

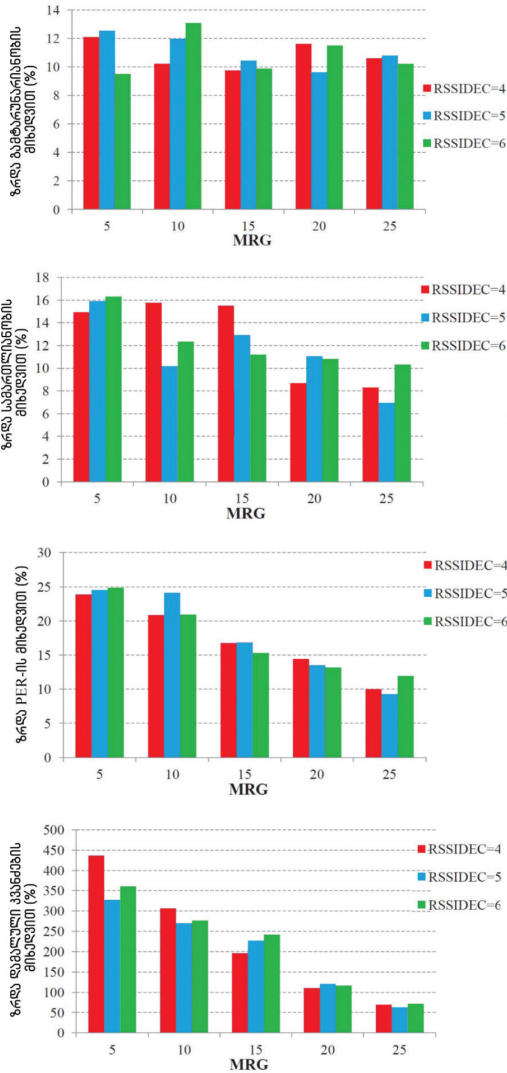
ლიტერატურაში STA-ებისთვის შემოთავაზებულია შემდეგი DSC ზღურბლის დაყენება:  $TX\_PWR - \max \{ \text{გზაში დანაკარგები} (AP, i) \} - MRG$ , სადაც მაქსიმუმი აღებულია ყველა i-ური STA-სთვის, რომელიც ეკუთვნის BSS-ს, TX\_PWR არის AP-ს გადაცემის სიმძლავრე, გზაში დანაკარგები (AP, i) არის სიგნალის მილევა AP-სა და i-ურ STA-ს შორის და MRG ზღვარი არის დაყენებას დაქვემდებარებული პარამეტრი, რეკომენდებული მნიშვნელობით დიაპაზონში 18 დბ-დან 25 დბ-ს ჩათვლით.

ვინაიდან შეიძლება რთული იყოს AP-ების TX\_PWR-ის მიღება და მიღების შეფასება, შემოთავაზებულ იქნა შემდეგი პრაქტიკული გზა. თითოეული STA მხარს უჭერს AP-სგან შუქურებით მიღებული სიგნალის სიმძლავრის ინდიკატორის (RSSI) გასაშუალებელ მნიშვნელობას (AvgRSSI) და ადგენს DSC-ს ზღურბლურ AvgRSSI – MRG სიდიდეს. ამასთან, მიღევა შეიძლება გაიზარდოს ისე, რომ AP-ს შუქურას სიგნალის სიმძლავრე ნაკლები იყოს (AvgRSSI – MRG)-ზე და STA დაიწყებს შუქურების სიგნალების იგნორირებას. ასეთი არასასურველი ქცევის თავიდან ასაცილებლად შემოთავაზებულია AvgRSSI-ს შემცირება RSSIDEC დეციბელით (გარკვეული მუდმივი მნიშვნელობით, სადაც DEC აღნიშნავს ათობით ფორმას), თუ ზედიზედ რამდენიმე შუქურას სიგნალი დაიკარგება. ამრიგად, განიხილება DSC ზღურბლის ავტომატურად შემცირება. შეისწავლეს MRG და RSSIDEC პარამეტრების მნიშვნელობების ვარიირება, შემოთავაზებული სქემის ეფექტიანობის შესაფასებლად, აგრევირებული გამტარუნარიანობის, სამართლიანობის (გაანგარიშებულია ჯეინის სამართლიანობის ინდექსის მიხედვით), დამალული კვანძების რაოდენობისა და PER-ის მიხედვით (ნაწ. 1.7). კვლევის შედეგები აჩვენებს DSC-ით განსაზღვრული ამ მაჩვენებლების ზრდას, მემკვიდრეობით მიღებული გადამტანის მუდმივი ზღურბლით ზონდირებასთან შედარებით. ამრიგად, მოგება გამტარუნარიანობისა და სამართლიანობის თვალსაზრისით მიიღწევა დამალული კვანძების მეტი რაოდენობის და, შესაბამისად, გაზრდილი PER-ის ხარჯზე. ერთი მხრივ, ბუნებრივია ვიფიქროთ, რომ DSC-მ შეიძლება შეამციროს სამართლიანობა, რადგან AP-სთან სიახლოვეში STA-ები ადგენენ უფრო მაღალ DSC ზღურბლს და აქვთ პაკეტის გადაცემის უფრო მეტი შანსი. მაგრამ, მეორე მხრივ, DSC ამცირებს ხილვადი კვანძების რაოდენობას, რაც საშუალებას იძლევა, მიღწეულ იქნეს მოგება სამართლიანობის თვალსაზრისით. შედეგების გაანალიზების შემდეგ გასცეს MRG-ის 20-სა და RSSIDEC-ის 6-ზე დაყენების რეკომენდაცია.

DSC ამცირებს ხილული STA-ების რაოდენობას და ზრდის დამალული STA-ების რიცხვს. ამ საკითხის გადასაჭრელად შემოთავაზებულია სხვადასხვა მეთოდი. ერთ-ერთი მათგანი იყენებს RTS/CTS მექანიზმს DSC-სთან ერთად. ეს მიდგომა შეფასებულია და მისი ეფექტიანობა დადასტურებულია.

სივრცის განმეორებით გამოყენებას და კონფლიქტის თავიდან აცილებას შორის ბალანსირების მიზნით TGax-მა გადაწყვიტა, დაეკავშირებინა OBSS ფრეიმებისთვის მგრძობელობის ზღურბლის (ეწოდება OBSS-ს პრეამბულის დეტექტირების ზღურბლი (OBSS\_PD)) ცვლილე-





**ნახ. 1.7.** გამტარუნარიანობის, PER-ის და დამალული კვანძების რაოდენობის ზრდა DSC-ის გამოყენებით

ბები და გადაცემის სიმძლავრე (TX\_PWR) მარტივი წესის შესაბამისად: რაც უფრო მაღალია OBSS\_PD, მით უფრო დაბალია TX\_PWR. ასეთ წესს შემდეგი ახსნა აქვს. სტანდარტულად (By default) STA გადასცემს TX\_PWR

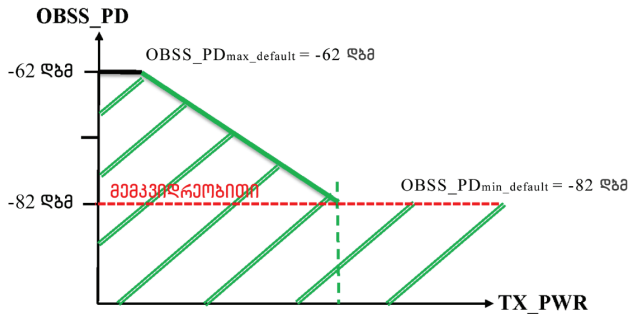
სიმძლავრის სიგნალებს და მიაჩნია, რომ გარემო უმოქმედოა, თუ სიგნალის სიმძლავრე ნაკლებია  $OBSS\_PD = -82$  დბმ სიდიდეზე. დავუშვათ, რომ STA იღებს სიგნალს  $OBSS\_STA$ -დან, რაც  $X$  დბ-ით მეტია  $-82$  დბმ-ზე. ეს ნიშნავს, რომ  $STA$ -სა და  $OBSS\_STA$ -ს შორის მიღევა  $X$  დბ-ით უფრო სუსტია, ვიდრე ეს საჭიროა, რომ გარემო განხილული იყოს როგორც უმოქმედო. თუ  $STA$ -ს ამ შემთხვევაში ახალი გადაცემის დაწყება სურს, მან პირველ რიგში უნდა გაზარდოს მისი  $OBSS\_PD$   $X$  დბმ-ით და მეორეც, უნდა შეამციროს მისი გადაცემის სიმძლავრე ასევე  $X$  დბ-ით, რათა არ წარმოიქმნას უზარმაზარი ინტერფერენციები  $OBSS\_STA$ -ის განთავსების ადგილზე (ნახ. 1.8).

$STA$ -ებს შეუძლიათ, დინამიკურად შეცვალონ თავიანთი  $OBSS\_PD$  და  $TX\_PWR$  პარამეტრები. ბექოფის დროს,  $STA$  აყენებს თავის  $OBSS\_PD$ -ის გარკვეულ მნიშვნელობას. ყოველ ჯერზე, როდესაც იგი ზონდირებით ამჟღავნებს პაკეტის დაწყებას, ის აჩერებს მის ბექოფს. მას შემდეგ, რაც  $STA$  გაიგებს, რომ ეს პაკეტი ეკუთვნის  $OBSS$ -ს, მას შეუძლია განაახლოს ბექოფი პაკეტის დასრულებამდეც კი, თუ სიგნალის სიმძლავრე ნაკლებია  $OBSS\_PD$ -ზე და სხვა პირობები (მაგალითად, NAV) არ არის საჭირო, რომ არხი ჩაითვალოს დაკავებულად. როდესაც  $STA$  მოიპოვებს არხზე წვდომას, მას შეუძლია დაიწყოს გადაცემა ისეთი სიმძლავრით, რომელიც არ აღემატება  $OBSS\_PD$ -ის გამოყენებულ მნიშვნელობას. სიმძლავრის ასეთ დონეს იყენებენ  $TXOP$ -ის ბოლომდე.

$AP$ -მ შეიძლება მიუთითოს  $OBSS$ -ის ფერები, რომელთათვისაც იყენებენ აღწერილი წესს. სივრცის განმეორებითი გამოყენების მაქსიმალური სარგებლის მისაღწევად, ეს წესი უნდა იქნეს გამოყენებული ისეთი  $BSS$ -ებისთვის, რომელთა სიგნალის დონე გაცილებით დაბალია, ვიდრე ეს არის ასოცირებული  $STA$ -ებისგან მიღებული სიგნალებისთვის. აღვნიშნავთ, რომ ალგორითმი იმის შესახებ, თუ როგორ უნდა იქნეს მიღებული გადაწყვეტილება, განხილული სტანდარტის ფარგლებს სცილდება.

### **1.5.5 არხების შეკავშირება და პრეამბულის პერფორაცია**

802.11ac-ში  $STA$ -ებს შეუძლიათ ადაპტიურად შეარჩიონ სინშირის გატარების ზოლი, რომელშიც კონკრეტული ფრეიმი გადაიცემა. კერძოდ, სტანდარტი განსაზღვრავს არხების იერარქიას, რაც ნაჩვენებია ნახ. 1.9-ზე. მას შემდეგ, რაც  $STA$ -მ EDCA წესების შესაბამისად მიაღწია არხზე წვდომას 20 მჰც ძირითად არხზე, მას შეუძლია დახარჯოს სინშირის გატარების ზოლი მეორადი არხების ეტაპობრივი შერწყმით, თუ ისინი აქტიური არ არის. სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ, თუ მეორადი 20 მჰც არხი უმოქმე-



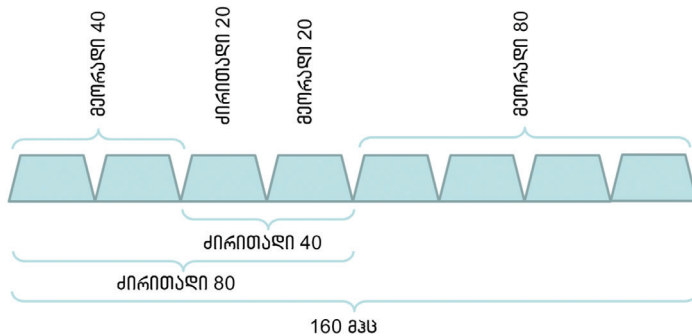
**ნახ. 1.8.** OBSS\_PD და TX\_PWR რეგულირების ილუსტრაცია 20 მჰც არხში

დოა, STA-ს შეუძლია გადასცეს 40 მჰც სიხშირის გატარების ზოლში. თუ როგორც მეორადი 20 მჰც, ასევე მეორადი 40 მჰც არხი უმოქმედოა, მაშინ შეიძლება გამოყენებულ იქნეს 80 მჰც სიხშირის გატარების ზოლი. ამის საპირისპიროდ, მაშინაც კი, თუ მეორადი 40 მჰც არხი უმოქმედოა, მაგრამ მეორადი 20 მჰც არხი დაკავებულია, STA-ს შეუძლია გადასცეს მხოლოდ ძირითად 20 მჰც არხში. ეს შეზღუდვა განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია მჭიდრო ქსელებისთვის, სადაც კონკრეტული BSS-ის მეორადი 20 მჰც არხი შეიძლება იყოს ძირითადი 20 მჰც არხის სხვა მათგანისთვის.

მჭიდრო გარემოში არხების შეკავშირების ეფექტიანობის გასაუმჯობესებლად, 802.11ax გვთავაზობს ახალ დამატებით ფუნქციას, რომელსაც პრეამბულის პერფორაცია ეწოდება. 80 მჰც-ის ტოლ ან მეტი სიდიდის ზოლის არხში MU OFDMA გადაცემისთვის შეიძლება განხორციელდეს ერთი ან მეტი დაკავებული 20 მჰც არხის პერფორაცია. ეს ნიშნავს, რომ ფრეიმის პრეამბულა არ არის გადაცემული და RU არ არის გამოყოფილი ამ ქვეარხებში. მჭიდრო განლაგებისას, ასეთი ფუნქცია საშუალებას იძლევა, არხის რესურსები ბევრად უფრო მოქნილი გზით იქნეს გამოყენებული.

### 1.5.6 ვირტუალიზაცია

თანამედროვე AP-ს ერთ-ერთი გავრცელებული მახასიათებელია რამდენიმე ვირტუალური AP-ს (VAP) მხარდაჭერა. ეს ნიშნავს, რომ ერთ ფიზიკურ მოწყობილობას შეუძლია შექმნას მრავალი დამოუკიდებელი BSS, რაც ზოგიერთ აპარატში 32 VAP-ს აღწევს. ეს შეიძლება გამოყენებული იყოს, როდესაც, მაგალითად, მსურველს სურს Wi-Fi-ს სტუმარი ქსელის დამორება შიდა კორპორაციული ქსელისგან ისე, რომ არ მოხდეს და-



**ნახ. 1.9.** 802.11ac ქსელის ძირითადი და მეორადი არხები

მატებითი AP-ს დაყენება. არსებული VAP-ების ერთ-ერთი ნაკლოვანება ის არის, რომ ყველა VAP-ისთვის უამრავი სერვისული ინფორმაცია შეიძლება ერთი და იგივე იყოს, მაგრამ იგი თითოეულ მათგანს ცალ-ცალკე გადასცემს. ოვერჰედის შესამცირებლად, 802.11ax უზრუნველყოფს მრავალჯერადი BSS იდენტიფიკატორების (BSSIDs) მხარდაჭერას, რაც საშუალებას იძლევა, ერთი და იმავე ინფორმაციის გაგზავნა ყველა BSS-ისთვის ერთდროულად განხორციელდეს, მაგალითად, საერთო შუქურას სიგნალის საშუალებით. მრავალჯერად BSSID-ში მყოფი ყველა BSS იყენებს ერთსა და იმავე BSS ფერს და BSS-ების ფრეიმები მრავალჯერადი BSSID ნაკრებიდან განიხილება, როგორც BSS-ების შიდა ფრეიმები.

## 1.6 ენერჯის მართვა 802.11ax-ში

### 1.6.1 ენერჯის მემკვიდრეობითი მართვა

802.11 ქსელში ენერჯის მართვა ემყარება ალტერნატივას ორ მდგომარეობას – მღვიძარესა და მთვლემარეს – შორის. მღვიძარე მდგომარეობაში, STA-ს შეუძლია გადასცეს და მიიღოს ფრეიმები, ხოლო მთვლემარე მდგომარეობაში მისი რადიომოწყობილობა გამორთულია. აქტიური STA ყოველთვის მღვიძარეა, ხოლო ენერჯის დამზოგავი PS STA ამ ორ მდგომარეობას შორის მონაცვლეობს.

ვინაიდან AP-მ არ იცის PS STA-ის მიმდინარე მდგომარეობა, ის ახდენს ყველა იმ ფრეიმის ბუფერინგაციას (გარდა ზოგიერთისა, რომელთა გადაცემაც ხდება დროის რეალურ მასშტაბში), რომლებიც განკუთვნილია მოცემული STA-ისთვის. PS STA-ებისთვის ბუფერული პაკეტების შესახებ ინფორმაციის მისაწოდებლად, AP შუქურებში შეიცავს ტრაფიკის ინდიკატორის რუკას (TIM). PS STA შეიძლება დიდხანს იმყოფებოდეს ძილის

რეჟიმში, თუმცა დროდადრო იღვიძებს, რათა მიიღოს TIM ელემენტის შემცველი შუქურას სიგნალი. მან შეიძლება ასევე ადრე გაიღვიძოს, თუ გადასაცემი აქვს ფრეიმი. ამ შემთხვევაში არხზე წვდომის დაწყებამდე STA უნდა დაელოდოს ფრეიმის მიღებას. თუ შუქურა მიუთითებს, რომ STA-სთვის ბუფერული პაკეტი არ არის განკუთვნილი, ის ბრუნდება მთვლემარე მდგომარეობაში. წინააღმდეგ შემთხვევაში STA აგზავნის PS-გამოკითხვის ფრეიმს. PS-გამოკითხვაზე გამოძახილის მიღების შემდეგ AP აგზავნის ბუფერულ ფრეიმებს.

მიუხედავად იმისა, რომ აღწერილი კონცეფცია საკმაოდ მარტივია, იგი შექმნილი იყო საკმაოდ დაბალი დატვირთვისთვის და მორგებული იყო შემთხვევით წვდომაზე. 802.11ax-ის მჭიდრო ქსელებისთვის დამახასიათებელ სქემაში, ტრაფიკის მაღალი დატვირთვით და ენერგიით შეზღუდული სმარტფონებისა და ლეპტოპების დიდი რაოდენობით, 802.11-ის წინა ვერსიებიდან მეგვიდრეობით მიღებული ენერგიის დაზოგვის მექანიზმები არაეფექტიანია. პირველი, მოწყობილობები შეიძლება „დაევიდოს“, ანუ PS STA-ები შეიძლება დარჩეს მღვიძარე მდგომარეობაში დიდი ხნის განმავლობაში, როდესაც ტრაფიკი გადაეცემა სხვა STA-ებს. მეორე, AP ვერ შეძლებს ტრაფიკის მიწოდებას გამოკითხვის გარეშე. მესამე, PS-გამოკითხვები იძლევა მხოლოდ SU გადაცემების შესაძლებლობას, რაც MU გადაცემებზე ნაკლებად ეფექტიანია. დაბოლოს, PS-გამოკითხვებით გამოწვეული ოვერჰედი შედარებით დიდია. 802.11ax-მდე მოქმედი სტანდარტი ასევე შეიცავდა რამდენიმე მეთოდს, რომლის საშუალებითაც შესაძლებელია, წინასწარ დაიგეგმოს მომსახურების პერიოდები, როდესაც PS STA-ებს შეუძლიათ გადასცენ ან ამოიღონ ბუფერში განთავსებული პაკეტები AP-დან. ეს მეთოდები ღრმად არის დაკავშირებული HCCA ფუნქციონირებასთან, რომელიც არ არის რეალიზებული მზა მოწყობილობებში. ამის გარდა, ეს მეთოდები არ არის შესაფერისი OFDMA გადაცემისთვის.

TGax-ის მიერ შემუშავებული გაუმჯობესების მთავარი იდეა ისაა, რომ მხოლოდ მოქმედი STA-ის გადამცემი/მიმღები უნდა იყოს მღვიძარე მდგომარეობაში, ხოლო ყველა სხვა STA-მ შეიძლება გამორთოს თავისი რადიოკავშირი. ეს შეიძლება გაკეთდეს შემდეგი გზით: პირველი, 802.11ax STA-ები შეიძლება დარჩეს ე.წ. მიკროძილის რეჟიმში, ანუ მათ შეუძლიათ გამორთონ თავიანთი საეთერო ინტერფეისის ზოგიერთი გადაცემის დროს, როდესაც ისინი ვერ იქნებიან ჩართული ფრეიმების გაცვლის პროცესში. მეორე, TGax იყენებს TWT მექანიზმს, რომელიც შექმ-

ნილია მომსახურების პერიოდების დაგეგმვისთვის და ის არ საჭიროებს HCCA-სთან დაკავშირებული რთული პროცედურების გამოყენებას.

### **1.6.2 მიკროძილი**

მიკროძილის გამოყენების პრინციპი დაინერგა 802.11ac-ში. ამ ვერსიაში PHY სათაური შეიცავს ინფორმაციას, რომელიც მიუთითებს ფრეიმში მონაწილე გადაცემ(ებ)ს და მიმღებ(ებ)ს. ამრიგად, ყველა სხვა STA-ს შეუძლია ფრეიმის ხანგრძლივობის განმავლობაში მთვლემარე მდგომარეობაში გადასვლა. 802.11ax ავითარებს ამ იდეას და საშუალებას აძლევს STA-ს, იყოს მთვლემარე მდგომარეობაში UL გადაცემის განმავლობაში ან სხვა STA-ის გადაცემის შესაძლებლობის (TXOP) გაჩენის შემთხვევაში იმავე BSS-ში. ამისთვის HE-SIG-A ველი შეიცავს ისეთ ინფორმაციას, როგორცაა BSS-ის ფერი, TXOP-ის დარჩენილი ხანგრძლივობა, გადაცემის მიმართულება (UL ან DL) და ა.შ. კერძოდ, თუ ფრეიმი ერთნაირი ფერისაა და ეს არის ან UL ფრეიმი, ან DL MU ფრეიმი, რომელიც არ არის განკუთვნილი მოცემული STA-სთვის, STA-ს შეუძლია დარწმუნდეს, რომ მას არ გადაეცემა რაიმე ფრეიმი TXOP-ის ბოლომდე და შეუძლია გადასვლა მთვლემარე მდგომარეობაში.

### **1.6.3 გაღვიძების სამიზნე დრო**

იმისთვის, რომ მოხდეს STA-ებს შორის კონფლიქტების მინიმიზაცია და, ასევე, შემცირდეს მოხმარებული ენერჯია, TGax-მა გააუმჯობესა TWT მექანიზმი, რომელიც პირველად შემოიტანეს 802.11ah-ში. ეს სტანდარტი ახდენს Wi-Fi-ს ადაპტაციას საგანთა ინტერნეტის (IoT) სტრუქტურასთან და მოთხოვნებთან. TWT საშუალებას აძლევს STA-ს (რომელსაც ეწოდება TWT-ს მომთხოვნი STA), პერიოდულად დაუკავშირდეს სხვა STA-ს ან AP-ს (რომელსაც ეწოდება TWT-ს მარეაგირებელი STA), როდესაც TWT-ს მომთხოვნი STA იღვიძებს გარკვეული პერიოდის განმავლობაში (ეწოდება TWT-ს მომსახურების პერიოდი (TWT SP)) და ცვლის ფრეიმებს TWT-ს მარეაგირებელ STA-სთან. ამ მექანიზმის წყალობით, TWT-ს მომთხოვნი STA-ს შეუძლია იმყოფებოდეს მთვლემარე მდგომარეობაში, გარდა TWT SP ინტერვალებისა. შესაბამისად, AP-სთან TWT SP-ების დამყარებით, STA ადარ საჭიროებს გაღვიძებას თუნდაც შუქურასთვის, რამაც შეიძლება მნიშვნელოვნად შეამციროს ენერჯიის მოხმარება.

802.11ax ქსელებში TWT SP-ების ფუნქციონირება შეიძლება იყოს ინდივიდუალურად შეთანხმებული ან სამაუწყებლო.

ინდივიდუალურად შეთანხმებული TWT SP-ების შესახებ მოლაპარაკება ხორციელდება წყვილ მოწყობილობას შორის. მოლაპარაკებების დროს ისინი ერთმანეთს გადასცემენ სპეციალურ ინფორმაციულ ელემენტს, რომელიც შეიცავს TWT-ის პარამეტრებს და შეიძლება ინტერპრეტირებულ იქნეს როგორც თხოვნა, წინადადება, ბრძანება, მონაცვლეობა, მიღება, კარნახი ან უარყოფა. AP-ს ან STA-ს შეუძლია TWT-ის გაწყვეტა TWT-ის გაწყვეტის ფრეიმის გადაცემით.

TWT-ის ყველაზე მნიშვნელოვანი ორი პარამეტრია პირველი TWT SP-ის დაწყება და გადვიძების ინტერვალი, ანუ ინტერვალი ორ მიმდევრობით TWT SP-ს შორის. ეს ორი პარამეტრი განსაზღვრავს TWT SP-ების მთელ სერიას. ამათ გარდა, STA-ები მოლაპარაკებებს აწარმოებენ პარამეტრების შემდეგ ჩამონათვალოზე:

- გადვიძების მინიმალური ხანგრძლივობა, რომელიც მიუთითებს TWT SP-ს მინიმალურ მნიშვნელობას, რის შემდეგაც TWT-ის მომთხოვნი STA შეიძლება დაბრუნდეს მთვლემარე მდგომარეობაში, მაშინაც კი, თუ მან ფრეიმი არ მიიღო. საჭიროების შემთხვევაში, კონკრეტული SP შეიძლება მოჭრილი იყოს ამ მნიშვნელობის ქვემოთაც კი, მაგალითად, ფრეიმის გადაცემით, სადაც დაყენებული იქნება მომსახურების დასრულების პერიოდის (EOSP) ალაში.

- რომელი ტიპის ფრეიმები უნდა გადაიცეს TWT SP-ების ფარგლებში.
- უნდა მოხდეს თუ არა გადაცემა ძირითადი 20 მჰც არხით.
- დაცული უნდა იყოს თუ არა TWT SP NAV დამცავი მექანიზმით, მაგალითად, (MU-) RTS/CTS პროტოკოლით ან CTS-მხოლოდ პროტოკოლით.
- შესაძლებელია თუ არა, რომ TWT-ს რეაგირებადი STA იყოს მთვლემარე მდგომარეობაში TWT SP-ს გარეთ.

- უნდა გამოჰკითხოს თუ არა STA-მ, რომელიც ითხოვს TWT-ს, სხვა STA, რომელიც პასუხს სცემს TWT-ზე თითოეული TWT SP-ის დასაწყისში, იმის დასადგენად, ფხიზლობს თუ არა იგი; თუ TWT-ზე მოპასუხე STA უგზავნის ფრეიმებს TWT-ის მთხოვნელ STA-ის გამოკითხვის გარეშე.

- არის თუ არა TWT SP-ები ტრიგერზე დაფუძნებული. აქ უნდა აღინიშნოს, რომ ტრიგერზე დაფუძნებული TWT SP-ები ხელსაყრელია UL MU ოპერაციისთვის და მხოლოდ მაშინ არის შესაძლებელი, თუ TWT-ზე რეაგირებადი STA არის AP. ასეთი TWT SP-ების ფარგლებში, AP-მ უნდა გამოგზავნოს, მინიმუმ, ერთი ტრიგერის ფრეიმი, რომელიც გამოყოფს რესურსებს STA-ზე და რომელიც TWT-ს მოითხოვს. ტრიგერზე დაფუძნებული TWT SP-ები ძალიან ნაყოფიერი ენერჯის დამზოგავებია STA-ებისთვის. პირველი, ისინი უზრუნველყოფს UL OFDMA გადაცემის ყველა სარგე-

ბელს, რომლებიც აღწერილი იყო 1.4 პარაგრაფში. მეორეც, სტანდარტის თანახმად, გაღვიძების შემდეგ, STA-ს დაუყოვნებლივ არ შეუძლია გადაცემის დაწყება, სანამ არ დაელოდება ფრეიმს, რომელსაც შეუძლია შექმნას მისი NAV, ან არ ამოიწურება გარკვეული ტაიმ-აუტის დრო. ტრიგერების ფრეიმები საშუალებას აძლევს STA-ს, შეამციროს ლოკინის დრო.

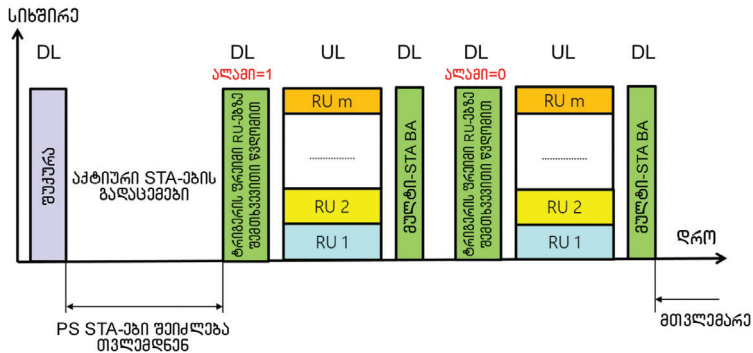
TWT-ის მთხოვნელმა STA-მ არ უნდა დაიწყოს ფრეიმების გადაცემა TWT-ზე მოპასუხე STA-ის მიმართულებით, ტრიგერზე დაფუძნებული TWT SP-ების შიგნით და ყველა მოლაპარაკებაში მყოფ TWT SP-ებს გარეთ, რათა თავიდან იქნეს აცილებული კონფლიქტები მიმდინარე დამალულ გადაცემებთან.

სამაუწყებლო TWT SP-ები ინდივიდუალურად შეთანხმებულთა მსგავსია, მცირე განსხვავებებით. კერძოდ, ისინი არ ექვემდებარება მოლაპარაკებებს, მაგრამ დაგეგმილია AP-ს მიერ, რომელიც ავრცელებს მათ შესახებ ინფორმაციას შუქურების მეშვეობით. იმ STA-ებმა, რომლებმაც მიიღეს ეს ინფორმაცია, მაგრამ არ შექმნეს ინდივიდუალური TWT SP-ები AP-სთან, უნდა გადასცენ ინფორმაცია მხოლოდ გამოცხადებულ სამაუწყებლო TWT SP-ების ფრეიმში. შესაბამისად, ეს STA-ები შეიძლება ყოველთვის იყვნენ მთვლემარე მდგომარეობაში, გარდა TWT SP-ებისა და ზოგიერთი შუქურას მოქმედებისა.

სამაუწყებლო TWT SP-ები ძალიან ნაყოფიერია UL OFDMA-ის შემთხვევით წვდომასთან ერთობლიობაში. კერძოდ, AP-ს შეუძლია დაგეგმოს ტრიგერის ფრეიმების სერია. AP იყენებს სამაუწყებლო TWT-ს, იმისათვის, რომ წინასწარ აცნობოს STA-ს ტრიგერის პირველი ფრეიმის გადაცემის სამიზნე დროის შესახებ. STA-ებისთვის ტრიგერების შემდგომი ფრეიმების შესახებ შეტყობინების მისაწოდებლად AP აყენებს სპეციალურ ალამს ტრიგერის ყველა ფრეიმში, გარდა ბოლოსი. ეს ალამი ნიშნავს, რომ შემთხვევითი წვდომისთვის განკუთვნილი სხვა ტრიგერის ფრეიმი მიჰყვება მიმდინარე UL გადაცემას და DL Ack-ებს, ასეთების არსებობის შემთხვევაში (იხ. ნახ. 1.10). ვინაიდან ტრიგერის ფრეიმი შეიცავს შემდგომი გადაცემის ხანგრძლივობასაც, STA-ები შეიძლება იყვნენ მთვლემარე მდგომარეობაში ტრიგერის შემდეგ ფრეიმამდე, რომელიც გამოყოფს RU-ებს შემთხვევითი წვდომისთვის.

დაბოლოს, შუქურებით გაღვიძება შეიძლება თავიდან იქნეს აცილებული შემდეგი გზით. TWT სიგნალის საშუალებით, STA-ს შეუძლია AP-სთან მოლაპარაკება ინტერვალზე, რომლის განმავლობაში STA არ გაიღვიძებს შუქურების სიგნალების მისაღებად.





**ნახ. 1.10.** ენერჯის დაზოგვის მაგალითი OFDMA UL-ისთვის შემთხვევითი წვდომით

### 1.7 პირველი თავის დასკვნები

IEEE 802.11ax-ის მთავარ ამოცანას წარმოადგენს Wi-Fi-ის განთავსების პროცესში გამტარუნარიანობის სიმკვრივის მნიშვნელოვანი ზრდა. სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ, ის მიზნად ისახავს გამტარუნარიანობის გაზრდას თითოეული არეალისთვის, რაც განსხვავდება IEEE 802.11-ში განხორციელებული ადრინდელი ცვლილებების ძირითადი მიზნის – აბსოლუტური გამტარუნარიანობის ზრდისაგან უფრო მოწინავე მოდულაციისა და კოდირების სქემების მეშვეობით. როგორც ამ თავშია განხილული, ახალ 802.11ax შესწორებას მნიშვნელოვანი სიახლეები შემოაქვს და ის მნიშვნელოვნად დაშორებულია წინა Wi-Fi ვერსიებისაგან.

შეიძლება ითქვას, რომ ყველაზე მნიშვნელოვან ინოვაციას წარმოადგენს OFDMA-ის გამოყენება ორივე, DL და UL მიმართულებით. ვფიქრობთ, რომ არხზე წვდომის პარადიგმის ამ ცვლილებამ ახალი Wi-Fi თაობა გარკვეულწილად მიუახლოვა ფიჭური ქსელების მუშაობას, კერძოდ, მათ მეოთხე თაობას. გარდა ამისა, როგორც საფუძვლიანად განვიხილეთ 1.4 პარაგრაფში, რომელიც ეძღვნებოდა OFDMA-ს ახალ ფუნქციონირებას, არა მხოლოდ ტექნიკური დეტალები, არამედ განთავსების პროცესებიც ძალიან განსხვავებულია და ისინი ამართლებს 802.11ax-ით დანერგილ ახალ (და არატრივიალურ) მექანიზმებს. მეტიც, 802.11ax არ შემოიფარგლება მხოლოდ OFDMA-ით. მაგალითად, მას შემოაქვს რამდენიმე მნიშვნელოვანი ინოვაცია, მათ შორის ახალი PHY ფუნქციები, MU-MIMO-ს გაფართოება UL მიმართულებით, გადაფარებადი ქსელებიდან წარმოქმნილი ინტერფერენციების შემსუბუქების ახალი მოქნილი

მექანიზმები და ის ნერგავს ენერჯის მართვის უფრო ეფექტიან მიდგომებსაც, რაც დეტალურადაა განხილული ამ თავში.

სტანდარტი გთავაზობს ახალი ფუნქციების ჩამონათვალს, რომლებიც პოტენციურად სასარგებლოა Wi-Fi ქსელების ეფექტიანობისთვის, ხოლო ამ მახასიათებლისაგან მიღებული რეალური მოგება განისაზღვრება ვენდორზე დამოკიდებული სპეციფიკური ალგორითმებით. ერთ-ერთი ყველაზე მნიშვნელოვანი გამოწვევა უკავშირდება 802.11ax-ის OFDMA-ის დაგეგმვას, რომელმაც უნდა გაითვალისწინოს სტანდარტის თავისებურებები. დამგეგმავი რეალიზდება AP-ში და დიდწილად განსაზღვრავს მთლიანი BSS-ის მუშაობას. მეორე გამოწვევა უკავშირდება მჭიდრო გარემოში ოპტიმალურ მუშაობას. მგრძნობელობის ზღურბლის და გადაცემის სიმძლავრის დინამიკური რეგულირება სტანდარტის ერთ-ერთი ყველაზე მნიშვნელოვანი და, ამავდროულად, რთულად განსახორციელებელი ნაწილია. მესამე გამოწვევა ეხება ენერჯის დაზოგვას, ვინაიდან ის მოითხოვს ბალანსის მოძებნას ენერჯის მოხმარებასა და გამტარუნარიანობას შორის. მაგალითად, მიკროძილის ოპერაციამ და TWT-მ შეიძლება გაზარდონ კონფლიქტის ალბათობა მჭიდრო გარემოში. ამრიგად, 802.11ax ყველა ახალი კომპონენტის ერთობლივი გამოყენებისას არსებობს ერთობლივი ოპტიმიზაციის გარკვეული პრობლემები, რომელთა გადაჭრაც, ალბათ, თანდათანობით მოხდება სტანდარტის პრაქტიკული რეალიზაციის პროცესში.

## განსაკუთრებით მაღალი გამტარუნარიანობის IEEE 802.11be სტანდარტი: ახალი გამოწვევები და შესაძლებლობები

### 2.1 შესავალი

Wi-Fi ალიანსის ბლოკდროინდელი კვლევების თანახმად, დღეისათვის მსოფლიოში იყენებენ 9 მილიარდზე მეტ Wi-Fi მოწყობილობას, რომლებიც მოიცავს პერსონალურ კომპიუტერებს, სმარტფონებს, ტელევიზორებს, ტაბლეტებს, სენსორებს და ა.შ. ვიდეოტრაფიკი არის WLAN-ში ტრაფიკის დომინანტური ტიპი და მისი გამტარუნარიანობის მოთხოვნა კვლავ იზრდება 4k და 8k ვიდეოს გაჩენის გამო, რომელთა არაშეკუმშვადი მონაცემების გადაცემების სიჩქარე შეადგენს 20 გბიტ-ს წამში. იმავდროულად, ფართოდ ვრცელდება ახალი ულტრამაღალი გამტარუნარიანობის და მკაცრად დაბალი შეყოვნების პროგრამები, როგორებიცაა ვირტუალური რეალობა (VR) ან მომატებული რეალობა (AR), კომპიუტერული თამაშები (მაგალითად, 5 მილიწამზე ნაკლები შეყოვნებით ონლაინ თამაშებისთვის), დაშორებული ადგილებიდან მუშაობა ტელეკომუნიკაციის მეშვეობით, ონლაინ ვიდეოკონფერენცია და ღრუბლოვანი კომპიუტერული გამოთვლები. მიუხედავად იმისა, რომ ცოტა ხნის წინ მიღებული და პირველ თავში განხილული IEEE 802.11ax სტანდარტი უფრო მეტ ყურადღებას ამახვილებს ქსელის მუშაობის მახასიათებლებზე და

მომხმარებლის გამოცდილებაზე მჭიდრო განლაგების პირობებში, ზემოხსენებული მაღალი გამტარუნარიანობის და დაბალი შეყოვნების მოთხოვნების დაკმაყოფილება ბევრად აღემატება IEEE 802.11ax-ის შესაძლებლობებს.

ამ ახალ საჭიროებათა დასაკმაყოფილებლად IEEE 802.11 სტანდარტების შემუშავებული ორგანიზაცია აპირებს გამოაქვეყნოს IEEE 802.11ax-ის შემდგომი სტანდარტის ახალი შესწორება IEEE 802.11be EHT, კერძოდ, Wi-Fi 7. რომ შესაბამისობაში ვიყოთ IEEE 802.11be წინადადებებთან, ქვემოთ IEEE 802.11be-სთვის გამოვიყენებთ აკრონიმ EHT-ს, ანუ განსაკუთრებით მაღალ გამტარუნარიანობას. IEEE 802.11be სამუშაო ჯგუფი შეიქმნა 2019 წლის მაისში, რომელმაც დააკონკრეტა ახალი თაობის WLAN-ის მოქმედების სფერო, ანუ ახალი PHY და MAC რეჟიმების, მინიმუმ, 30 გბიტ/წმ მაქსიმალური გამტარუნარიანობის მხარდაჭერა და ოპერატორის მიერ გადაიტანი სიხშირის გამოყენება ზოლში 1 გჰც-დან 7.250 გჰც-ის ჩათვლით, რაც უზრუნველყოფდა ორმხრივ თავსებადობას და თანაცხოვრებას მემკვიდრეობით IEEE 802.11 მოწყობილობებთან 2.4, 5 – 6 გჰც დიაპაზონებში. ამ მიზნების მისაღწევად გამოვლენილი და შესწავლილია EHT-სთან დაკავშირებული გამოწვევები და შემუშავებულია PHY და MAC გაუმჯობესებათა შემცველი რამდენიმე ტექნოლოგია, როგორც პოტენციური გადაწყვეტილებები ამ გამოწვევების დასაძლევად.

### **2.1.1 PHY გაუმჯობესებაანი EHT-ისთვის**

1) სიხშირის გატარების გაფართოებული, 160 მჰც-ზე მეტი ზოლის უზრუნველყოფა: 2.4 გჰც და 5 გჰც დიაპაზონებში შეზღუდული და გადატვირთული არალიცენზირებული სპექტრის გამო, არსებული 802.11 WLAN (მაგალითად, IEEE 802.11ax) ქსელების ფუნქციონირებისას მომსახურება აუცილებლად დაბალი ხარისხისა იქნება. ახალი განვითარებადი პროგრამების, მაგალითად, VR/AR რეალიზაციისას, მინიმუმ, 30 გბიტ/წმ მაქსიმალური გამტარუნარიანობის უზრუნველსაყოფად EHT ითვალისწინებს სიხშირის გატარების ისეთი ახალი ზოლების დამატებას, როგორებიცაა უწყვეტი 240 მჰც, არამომიჯნავე 160+80 მჰც, უწყვეტი 320 მჰც და არამომიჯნავე 160+160 მჰც ზოლები.

2) მულტი-RU-ის მიკუთვნების მხარდაჭერა ერთ მომხმარებელზე: IEEE 802.11ax-ში თითოეულ მომხმარებელს ფრეიმების გადასაცემად ან მათი მიღებისთვის ენიჭება მხოლოდ კონკრეტული RU, რაც მნიშვნელოვნად ზღუდავს სიხშირული სპექტრის რესურსების დაგეგმვის მოქნილობას. ამ პრობლემის გადასაჭრელად და სპექტრული ეფექტიანობის კიდევ უფრო

გასუმჯობესებლად, EHT სამუშაო ჯგუფში მხარდაჭერილია ერთი მომხმარებლისთვის მულტი-RU-ს მინიჭების მიდგომა.

3) ჰიკური მონაცემების სიჩქარის გაუმჯობესებისთვის 4096-QAM-ის შემოტანა: IEEE 802.11ax-ის უმაღლესი რიგის მოდულაციური სქემა არის 1024-QAM, სადაც მოდულირებულ სიმბოლოს გადააქვს 10 ბიტი ინფორმაცია. ჰიკური სიჩქარის შემდგომი გაუმჯობესების მიზნით, EHT-ისთვის რეკომენდებულია 4096-QAM, რომ მოდულირებულ სიმბოლოს ჰქონდეს 12 ბიტის გადატანის შესაძლებლობა. ამიტომ, ხელშეუშლამდგრადი კოდირების იმავე სიჩქარის გათვალისწინებით, EHT-ს შეუძლია მიაღწიოს მონაცემების გადაცემის სიჩქარის 20%-იან ზრდას 1024-QAM-თან შედარებით.

4) პრეამბულის ეფექტიანი ფორმატებისა და პერფორირების მექანიზმების უზრუნველყოფა: EHT პრეამბულის კონსტრუქციამ უნდა უზრუნველყოს უკუთავსებადობა და თანაცხოვრება მეგვიდრეობით PDDU-ებთან, რომლებსაც გადასცემენ 2.4 გჰც, 5 გჰც და 6 გჰც სიხშირულ დიაპაზონებში. გარდა ამისა, შემოთავაზებულ იქნა EHT-დან დაწყებული შემდგომ თაობებთან თავსებადობის პრეამბულები. ვინაიდან EHT-ში მრავალი ახალი ფუნქცია, როგორცაა მულტი-RU და MU-MIMO, კვლავ განხილვის პროცესშია, სხვადასხვა ტექნოლოგიისა და სტრუქტურების მხარდამჭერი ფორმატისა და პრეამბულის დეტალები კვლავ ელოდება საბოლოო შემუშავებას. არხების არაუწყვეტი გზით შეკავშირებით, პრეამბულის ახალი პერფორირება IEEE 802.11ax-ში საშუალებას აძლევს Wi-Fi მოწყობილობას, გადასცეს MU PDDU მთელი სიხშირის გატარების ზოლში (მაგალითად, 80 მჰც, 80+80 მჰც ან 160 მჰც), პრეამბულის პერფორირებული ნაწილის გამოკლებით. თუმცა SU PDDU-ს პრეამბულაში SIG-B ველისა და პერფორირებასთან დაკავშირებული სიგნალიზაციის არარსებობის გამო, SU PDDU-ის არ აქვს უფლება გამოიყენოს პრეამბულის პერფორაცია და ის უნდა გადაიცეს მთელ ხელმისაწვდომ სიხშირის გატარების უწყვეტ ზოლში. ამრიგად, EHT-ში შეიძლება საჭირო გახდეს MU PDDU-ს პერფორირების დიზაინის გაუმჯობესება და SU PDDU-სთვის პერფორირების დიზაინის დამატება.

### **2.1.2 MAC გაუმჯობესებანი EHT-სთვის**

1) მრავალლინკიანი ოპერაციები მკვეთრად გაზრდილი სიხშირის გატარების ზოლით: სულ მცირე, 30 გბიტი/წმ მაქსიმალური გამტარუნარიანობის უზრუნველსაყოფად, EHT აფართოებს თავის სიხშირის გატარების ზოლს მრავალდიაპაზონიანი აგრეგაციით 2.4 გჰც, 5 გჰც და 6 გჰც დიაპა-

ზონებში და, ჯამურად, გამოიყენებს 320 მჰც ზოლს. ამასთან, როდესაც ხორციელდება მრავალდიაპაზონიანი აგრეგაცია, წარმოიქმნება ისეთი გამოწვევები, როგორებიცაა არხის სიხშირის არჩევითობა გაცილებით ფართო და არამომიჯნავ სიხშირული ზოლებისთვის, სხვადასხვა ტიპის მრავალდიაპაზონიანი ოპერაციები და უკუთავსებადობა, ასევე თანაარსებობა არსებულ მეგვიდრეობით STA-ებთან 2.4 გჰც, 5 გჰც და 6 გჰც დიაპაზონებში. მეგვიდრეობით მრავალდიაპაზონიან ოპერაციებში (მაგალითად, როგორიცაა სესიის სწრაფი გადაცემა (FST)), არსებობს შეზღუდვა, რომ MSDU-ებს, რომლებიც მიეკუთვნება ერთი ტრაფიკის იდენტიფიკაციას (TID), შეუძლიათ გამოიყენონ მხოლოდ ერთი ზოლი, რასაც მივყავართ მნიშვნელოვან MAC ოვერჰედთან სესიის გადასაცემად. ამრიგად, გადაცემის მოქნილობის გასაუმჯობესებლად და MAC ოვერჰედის შესამცირებლად, არსებულ MAC მოდელს შეიძლება დასჭირდეს EHT-ის მნიშვნელოვანი გაუმჯობესება, ანუ STA-ს შეუძლია გადასცეს იგივე TID ან სხვადასხვა TID ფრეიმები მრავალი ზოლის მიხედვით ერთდროულად ან არაერთდროულად.

2) გაზრდილი სივრცითი ნაკადებისა და MIMO გაუმჯობესებათა მხარდაჭერა: Wi-Fi მოწყობილობების ზრდის შესაბამისად, ტრაფიკის მზარდი მოთხოვნების დასაკმაყოფილებლად, AP-ებმა ბოლო წლების განმავლობაში განაგრძეს ანტენების რაოდენობის გაზრდა და გააუმჯობესეს სივრცითი მულტიპლექსირების შესაძლებლობები. ამჟამად, IEEE 802.11ax-ში, 8 ანტენით აღჭურვილ AP-ს შეუძლია ერთდროულად მოემსახუროს 8 მომხმარებელს UL/DL გადაცემისთვის, MU-MIMO ტექნოლოგიის საშუალებით. AP-ს სივრცითი მულტიპლექსირების შესაძლებლობის განახლების ტენდენციის შენარჩუნებით, EHT რეკომენდაციას იძლევა, ნაკადების მაქსიმალური რაოდენობა იყოს 16, ქსელის უფრო მაღალი გამტარუნარიანობის მისაღწევად.

3) განაწილებული ოპერაციები მეზობელ AP-ებს შორის: EHT აფართოებს შესაძლებლობას, ხელი შეეწყოს მონაცემთა გაზიარებას და ინფორმაციის მართვას AP-ებს შორის სადენიანი ან უსადენო ლინკების საშუალებით. EHT ამით აუმჯობესებს სპექტრულ ეფექტიანობას, ზრდის ჰიკურ გამტარუნარიანობას და ამცირებს შეყოვნებას. ამ ძირითად თვისებას, რომელიც განასხვავებს EHT-ს IEEE 802.11ax-სგან, მოიხსენიებენ მულტი-AP (MAP) კოორდინაციადა. იგი შეიძლება დაიყოს ჯგუფებად. ესენია: სივრცის კოორდინირებული განმეორებითი გამოყენება (CSR), კოორდინირებული მრავალჯერადი წვდომა არხების ორთოგონალური სიხშირული დაყოფით (OFDMA, C-OFDMA), სხვის კოორდინირებული

ფორმირება (CBF) და ერთობლივი გადაცემა (JTX). კოორდინაციის სხვადასხვა სირთულის შესაბამისად, მულტი-AP გადაცემის რეჟიმების შეჩვენა ხდება არსებული სტრუქტურის მოთხოვნების შესაბამისად.

4) ლინკის გაუმჯობესებული ადაპტაციისა და განმეორებითი გადაცემის მექანიზმი: გადაცემის საიმედოობაც EHT-ს კიდევ ერთი მთავარი საზრუნავია. ამჟამინდელი IEEE 802.11 სისტემები ემყარება MAC პროტოკოლის მონაცემთა ბლოკის (MPDU) განმეორებით გადაცემას, რომ უზრუნველყოფილ იქნეს გადაცემის საიმედოობა შემთხვევით ცვალებად და შეცდომებით გადატვირთულ უსადენო არხებში. პროტოკოლში ავტომატური განმეორებითი მოთხოვნით (ARQ), მიმღები უბრალოდ უფლებელყოფს მცდარ MPDU-(ებ)ს, სანამ არ მიიღებს განმეორებით გადაცემულ MPDU-(ებ)ს. უფრო მაღალი საიმედოობისა და დაბალი შეყოვნების მისაღწევად, გადაცემა ჰიბრიდული ავტომატური განმეორებითი მოთხოვნით (HARQ) უნდა იქნეს გამოყენებული EHT-ში, რაც უზრუნველყოფს „რბილ“ გადაწყვეტილებათა კომბინირებას ან დამატებით კოდურ შემოწმებულ ბიტებს მიმღებში, რითაც უმჯობესდება სწორად დეკოდირების ალბათობა.

ამ თავის დანარჩენი ნაწილი შემდეგნაირად არის ორგანიზებული: 2.2 პარაგრაფში მოცემულია PHY-ის გაუმჯობესების ძირითადი ტექნიკა. 2.3-2.6 პარაგრაფებში ყურადღება გამახვილებულია MAC გაუმჯობესებებზე და PHY და MAC ფენების დამაკავშირებელ მეთოდებზე. კერძოდ, 2.3 პარაგრაფში წარმოდგენილია მრავალლინკიანი აგრეგაცია და შესაბამისი ოპერაციები. 2.4 პარაგრაფი ხაზს უსვამს და წარმოაჩენს MIMO-ს გაუმჯობესებას. 2.5 პარაგრაფში აღწერილია მულტი-AP კოორდინაციის ტექნოლოგიები. 2.6 პარაგრაფი გვთავაზობს ლინკის გაუმჯობესებული ადაპტაციისა და განმეორებითი გადაცემის პროტოკოლებს. 2.7 პარაგრაფში მოცემულია EHT-ს შემდგომი პოტენციური პერსპექტივები. 2.8 პარაგრაფში წარმოდგენილია მეორე თავის ძირითადი დასკვნები.

## 2.2 EHT-ს PHY გაუმჯობესებათა დეტალური ანალიზი

მაღალი გამტარუნარიანობისა და დაბალი შეყოვნების ვიდეოპროგრამების მხარდასაჭერად, როგორებიცაა AR, VR და ონლაინ თამაშები, EHT-ს შემოაქვს PHY გაუმჯობესების რამდენიმე ტექნოლოგია, რაც საშუალებას იძლევა, მიღწეულ იქნეს ულტრამაღალი პიკური გადაცემის სიჩქარე – 30 გბიტ/წმ-მდე:

1) ფართო სიხშირის გატარების ზოლების რეჟიმების გამოყენება, მათ შორის 320 მჰც-ს, 160+160 მჰც-ს, 240 მჰც-ს და 160+80 მჰც-ს, წარმო-

დგინდა როგორც EHT-სთვის გამტარუნარიანობის გაზრდის ერთ-ერთი განმსაზღვრელი ფაქტორი.

2) მხარდაჭერილია მულტი-RU, რომელიც ენიჭება ერთ მომხმარებელს, რაც ხელს შეუწყობს EHT-ში სპექტრული ეფექტიანობის ამაღლებას.

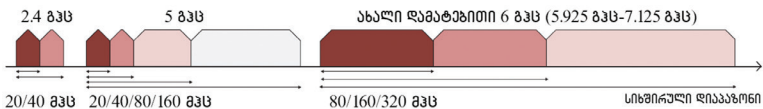
3) გადაცემის პიკური გადაცემის სიჩქარის კიდევ უფრო გაზრდის მიზნით EHT რეკომენდაციას უწევს უფრო მაღალი რიგის მოდულაციის ახალ სტრატეგიებს, კერძოდ, 4096-QAM-ს, IEEE 802.11ax-ში მიღებულ 1024-QAM-სგან განსხვავებით.

4) განიხილება EHT პრეამბულის ორი ფორმატი, შესაბამისად, EHT SU PPDU და EHT MU PPDU. სპექტრული ეფექტიანობის გასაუმჯობესებლად, EHT PHY-მ ასევე უნდა მიიღოს პრეამბულის პერფორაციის ახალი მექანიზმი EHT PPDU-სთვის, რომელიც გადაეცემა ერთ ან მეტ STA-ს.

ამ პარაგრაფში ჩვენ დეტალურად განვიხილავთ ზემოაღნიშნულ PHY გაუმჯობესებებს.

### 2.2.1 სიხშირის გატარების ზოლის ახალი რეჟიმი

ნახ. 2.1-ზე ნაჩვენებია 2.4 გჰც – 5 გჰც სიხშირულ დიაპაზონებში სიხშირის გატარების მაქსიმალურად მიღწევადი ზოლები და ისინი მოიცავს 40 მჰც-ს, რომელიც შედგება ორი მომიჯნავე 20 მჰც-ისგან და მოიცავს 160 მჰც-ს, რომელიც შედგება ორი მომიჯნავე ან არამომიჯნავე 80 მჰც-ისგან. ეს შეიძლება არ აკმაყოფილებდეს მოთხოვნებს ისეთი მაღალი



**ნახ. 2.1.** ხელმისაწვდომი სიხშირის გატარების ზოლები 2.4 გჰც, 5 გჰც და 6 გჰც დიაპაზონებში

გამტარუნარიანობისა და დაბალი შეყოვნების სერვისებისთვის, როგორებიცაა 4k/8k ვიდეო, AR ან VR და ონლაინ თამაშები. ამჟამად ახალი დამატებითი 6 გჰც დიაპაზონი (მაგალითად, აშშ-ში 5.925 გჰც – 7.125 გჰც), რომლის ჯამური სიხშირის გატარების ზოლი შეადგენს 1.2 გჰც-ს, ნაწილობრივ უკვე გახსნილია WLAN-ებისთვის. 6 გჰც დიაპაზონის ახალი მახასიათებლები, მაგალითად, სიხშირის გატარების ზოლი, რომელიც უდრის 320 მჰც-ს, ხელს შეუწყობს EHT-ის მიზნის მიღწევას, კერძოდ, მაქსიმალურ გამტარუნარიანობას, მინიმუმ, 30 გბიტ/წმ სიჩქარით. 320 მჰც



სიხშირის გატარების ზოლი შეიძლება იყოს უწყვეტი და განლაგებული იყოს იმავე 6 გჰც დიაპაზონში ან იყოს არამომიჯნავე და მდებარეობდეს სხვადასხვა დიაპაზონში (მაგალითად, ნაწილობრივ 5 გჰც დიაპაზონში და ნაწილობრივ 6 გჰც დიაპაზონში). WLAN-ში არსებული სიხშირის გატარების ზოლის გაფართოების წესის შესაბამისად, 320 მჰც ზოლი შეიძლება დაიშალოს ორ არამომიჯნავე 160 მჰც ზოლად, რომლებიც განთავსებულია, შესაბამისად, 5 გჰც და 6 გჰც დიაპაზონებში.

2.4 გჰც დიაპაზონში IEEE 802.11n მოწყობილობებს ნება ეძლევათ, გადასცენ 40 მჰც არხში ორი მომიჯნავე 20 მჰც არხის ერთ 40 მჰც არხში აგრეგაციით. მაღალსიჩქარიანი უსადენო კომუნიკაციების მოთხოვნების დასაკმაყოფილებლად IEEE 802.11ac და IEEE 802.11ax სტანდარტებში შემოიტანეს ძირითადი არხების გაზრდის შესაძლებლობა და ამით ნება მიეცათ მობილურ მოწყობილობებს, ეწარმოებინათ გადაცემა 80/160 მჰც არხების გამოყენებით 5 გჰც დიაპაზონში. 6 გჰც დიაპაზონში 1 გჰც-ზე მეტი დამატებითი არალიცენზირებული სიხშირული სპექტრი გახდა ხელმისაწვდომი, რაც მობილურ მოწყობილობებს 320 მჰც-მდე სიხშირის გატარების ზოლში ფუნქციონირების საშუალებას აძლევს.

ამჟამად EHT სამუშაო ჯგუფი განიხილავს მიდგომებს მომიჯნავე და არამომიჯნავე სიხშირის გატარების ზოლების ეფექტიანად გამოყენების მიზნით. ლიტერატურაში შემოთავაზებულია ზოლების გაფართოების მოქნილი სტრატეგია იმისათვის, რომ მიიღონ ფართო სიხშირის გატარების ზოლები მრავალარხიანი აგრეგაციის საშუალებით 2.4 გჰც, 5 გჰც და 6 გჰც დიაპაზონებში, მაგალითად, 20/40 მჰც (2.4 გჰც დიაპაზონში) პლუს 20/40/80/160 მჰც (5 გჰც დიაპაზონში) პლუს 80/160/320 მჰც (6 გჰც დიაპაზონში). კვლევებმა გვიჩვენა, რომ EHT-ისთვის მიზანშეწონილია მხოლოდ უწყვეტი 240 მჰც, არამომიჯნავე (160+80) მჰც, უწყვეტი 320 მჰც და არამომიჯნავე (160+160) მჰც ზოლების გამოყენება. სხვა რეჟიმები (მაგალითად, (20+40+80) მჰც) არ არის მიზანშეწონილი ტექნიკის დიზაინის სირთულის თვალსაზრისით. სიხშირის გატარების ზოლის ახალი 240 მჰც, ანუ (160+80) მჰც რეჟიმი შექმნილია სამი 80 მჰც არხიდან, ხოლო ტონებთან დაკავშირებული გეგმა თითოეული 80 მჰც სეგმენტისთვის იგივეა, რაც 80 მჰც სეგმენტისთვის IEEE 802.11ax-ში. ამასთან, საჭიროა კიდევ უფრო მეტი კვლევის ჩატარება, მაგალითად, არის თუ არა ის ფორმირებული 80 მჰც ზოლის პერფორაციით 320/(160+160) მჰც ზოლიდან. ახალი 320/(160+160) მჰც სიხშირის გატარების ზოლისთვის EHT-მ მხარი უნდა დაუჭიროს დუბლირებული IEEE 802.11ax 160 მჰც ტონების გეგმას OFDMA ტონების გეგმის მისაღებად. ვინაიდან EHT-ის პრეამბულა ამ-

ჟამად შემუშავების პროცესშია, არა-OFDMA 320/(160+160) მჰც ტონების გეგმა ჯერჯერობით არ არის განსაზღვრული. 320/(160+160) მჰც ზოლში OFDMA გადაცემისთვის, ამჟამად განსაზღვრული არ არის დიდი ზომის RU-ების (მაგალითად, 2x996 ტონის შემცველი RU პლუს 484 ტონის შემცველი RU) კომბინაციები. არა-OFDMA PDU-ის შემუშავება ითვალისწინებს პრეამბულის პერფორაციის განხორციელებას SU-სთვის OFDMA ფორმატის ქვეშ, ხოლო ყველა RU ენიჭება ერთსა და იმავე მომხმარებელს. არსებული 20/40/80/160/(80+80) მჰც სიხშირის გატარების ზოლისთვის, EHT-ს შეუძლია გამოიყენოს IEEE 802.11ax ტონების გეგმები. აღსანიშნავია, რომ EHT PDU-ს მონაცემთა ნაწილი იყენებს იმავე ქვეგადამტანის ინტერვალს, რომელსაც IEEE 802.11ax-ში გამოიყენებენ.

### 2.2.2 მულტი-RU მხარდაჭერა

IEEE 802.11ax-ში DL და UL გადაცემისთვის განსაზღვრული RU-ები ასეთია: 26 ტონის შემცველი RU, 52 ტონის შემცველი RU, 106 ტონის შემცველი RU, 242 ტონის შემცველი RU, 484 ტონის შემცველი RU, 996 ტონის შემცველი RU და 2x996 ტონის შემცველი RU. სპექტრული ეფექტიანობის ასამაღლებლად, EHT სამუშაო ჯგუფში მხარი დაუჭირეს მრავალი RU-ის გადაადგილებას, რომლებიც უნდა განესაზღვროს ერთ მომხმარებელს და ახალი 3x996 ტონის შემცველი RU-ის შემოტანას. EHT-ს უკვე აქვს გარკვეული წინასწარი შედეგები მულტი-RU კომბინირებული სქემების, კოდირებისა და ინტერლივინგის სქემების და მულტი-RU სიგნალების შემუშავების პროცესში. კომბინირების სირთულესა და სპექტრულ ეფექტიანობას შორის კომპრომისის მისაღწევად დასაშვებია რამდენიმე შეზღუდული მულტი-RU კომბინაციის გამოყენება იმ შემთხვევაში, თუ სიხშირის გატარების ზოლი ნაკლებია 160 მჰც-ზე ან მისი ტოლია. ეს ნიშნავს, რომ მცირე ზომის RU-ები (242 ტონზე ნაკლების შემცველი) შეიძლება კომბინირებულ იქნეს მხოლოდ მცირე ზომის RU-ებთან და დიდი ზომის RU-ები (242 ტონზე მეტის შემცველი) შეიძლება კომბინირებულ იქნეს მხოლოდ დიდი ზომის RU-ებთან. ამასთან, მცირე ზომის RU-ების და დიდი ზომის RU-ების შერევა არ არის დაშვებული. 2.1 ცხრილში მოცემულია მულტი-RU კომბინაციები სიხშირის გატარების ზოლის სხვადასხვა რეჟიმისთვის EHT-ში, სადაც მცირე ზომის RU-ების კომბინაციამ არ უნდა გადალახოს 20 მჰც არხის საზღვრები, ხოლო 26 ტონის შემცველი RU-ს და 52 ტონის შემცველი RU-ს კომბინაცია 20/40/80 მჰც PDU ფორმატში და, ასევე, 26 ტონის შემცველი RU-ის და 106 ტონის შემცველი RU-ის კომბინაცია 20/40 მჰც PDU ფორმატში დასაშვებად ითვლება. რაც შეეხება დიდი

ზომის RU-ებს, დასაშვები კომბინაციებია 242 ტონის შემცველი RU პლუს 484 ტონის შემცველი RU 80 მჰც OFDMA/არა-OFDMA PDU ფორმატში და 484 ტონის შემცველი RU პლუს 996 ტონის შემცველი RU 160 მჰც OFDMA/არა OFDMA PDU ფორმატში. IEEE 802.11ax-ში OFDMA მხარს უჭერს მხოლოდ 2/4/8/16 მომხმარებელს, ხოლო EHT-ში მულტი-RU-ს მხარდაჭერა საშუალებას იძლევა, განხორციელდეს უფრო მოქნილი მხარდაჭერა მომხმარებლების რაოდენობის სხვა მნიშვნელობებისთვის, მაგალითად, 5 ან 6 მომხმარებლისთვის, და შემოთავაზებულია 3 RU-ს მიკუთვნება ერთი მომხმარებლისთვის. ამასთან, დღემდე EHT ჯგუფს არ მიუღწევია კონსენსუსისთვის ერთი მომხმარებლისთვის მინიჭებული RU-ების მაქსიმალურ რაოდენობაზე.

ტიპი	განსაზღვრება	ნებადართული კომბინაციები
მცირე ზომის RU	26 ტონით, 52 ტონით, 106 ტონით	- RU 26 ტონით პლუს RU 106 ტონით 20/40 მჰც-სთვის
დიდი ზომის RU	242 ტონით, 484 ტონით, 996 ტონით, 2×996 ტონით, 2×996 ტონით	- RU 242 ტონით პლუს RU 484 ტონით 20 მჰც-სთვის - RU 484 ტონით პლუს RU 996 ტონით 160 მჰც-სთვის, RU 242 ტონით პლუს RU 484 ტონით პლუს RU 996 ტონით 160 მჰც-სთვის - RU 484 ტონით პლუს RU 2×996 ტონით 240 მჰც-სთვის, RU 2×996 ტონით 240 მჰც-სთვის - RU 484 ტონით პლუს RU 3×996 ტონით 240 მჰც-სთვის, RU 3×996 ტონით 320 მჰც-სთვის

**ცხრილი 2.1.** გამოყენებული მულტი-RU კომბინაციები სიხშირის გატარების ზოლის სხვადასხვა რეჟიმისთვის EHT-ში

მრავალი RU-ით მონაცემთა გადაცემის თვალსაზრისით მომხმარებლისთვის მინიჭებული კომბინირებული RU-ებისთვის შეიძლება გამოყენებულ იქნეს გადაცემის ისეთი პარამეტრების ერთნაირი ან განსხვავებული ჯგუფები, როგორებიცაა მოდულაციისა და კოდირების სქემები (MCS), ინტერლივინგის სქემები და სივრცით-დროითი ნაკადების რაოდენობა. მონაცემთა კომბინირებული RU-ებით გადასაცემად არსებობს ოთხი მიდგომა: (1) ყველა RU კოდირებულია და მათი ინტერლივინგი

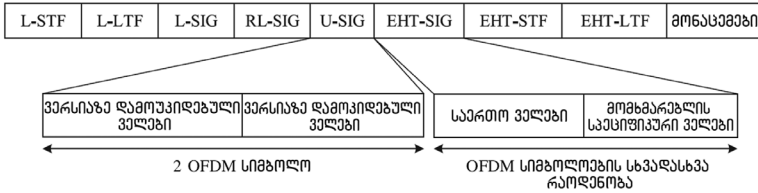
ხორციელდება ერთმანეთისაგან დამოუკიდებლად, (2) მრავალი RU კოდირებულია ერთად, მაგრამ თითოეული RU-ს ინტერლივინგი სრულდება დამოუკიდებლად, (3) კოდირების მიუხედავად მრავალ RU-ს სჭირდება RU-ების მიმდევრობის ინტერლივინგი და (4) მრავალი RU მოქმედებს, როგორც ერთი ლოგიკური/უწყვეტი RU. ამასთან, ამ ჰოტენციურ მიდგომებს სჭირდება ანალიზი და საჭიროა მათი შემდგომი შეფასება აპარატურის სირთულისა და სიგნალური ოვერჰედის შეზღუდვების გათვალისწინებით.

გარდა RU-ს ზომებთან, მულტი-RU კომბინაციებთან და მულტი-RU გადაცემასთან დაკავშირებული საკითხებისა, EHT სამუშაო ჯგუფმა უფრო მეტი ძალისხმევა უნდა გაიდოს მულტი-RU PPDU-ს სიგნალური მხარდაჭერის თვალსაზრისით, მაგალითად, როგორ გამოიყენოს IEEE 802.11ax-ში არსებული სიგნალების გადაცემასთან დაკავშირებული მეთოდები (მაგალითად, სიხშირის გატარების ზოლის ველი, განთავსების ველი ან მომხმარებლის ველი), რომ მიუთითოს მულტი-RU-ს ზომა, ტონის ასახვა და კომბინაცია. განსხვავებით IEEE 802.11ax-ისგან, სადაც უნიკალურ STA-ID-ს იყენებენ STA-სთვის მინიჭებული ერთი RU-სთვის, EHT-ში შესატყვისი STA-ID უნდა იყოს გათვალისწინებული მულტი-RU-ს გამოყენებისთვის.

### **2.2.3 EHT პრეამბულის დიზაინი**

WLAN-ის განვითარების პროცესზე დაკვირვებით ვრწმუნდებით, რომ WLAN-ის თითოეულ სტანდარტს აქვს თავისი სპეციფიკური პრეამბულა, რომელიც უზრუნველყოფს შემდეგ ფუნქციებს: სინქრონიზაციას, არხების შეფასებას, ავტოდეტექტირებას, საჭირო სიგნალიზაციას და ა.შ. IEEE 802.11ax-ის მსგავსად, სხვადასხვა ტექნოლოგიისა და სტრუქტურების მხარდასაჭერად, EHT-მ უნდა განსაზღვროს სულ მცირე ახალი პრეამბულის ფორმატი ისეთი შესაძლო PPDU ფორმატებისთვის, როგორებიცაა EHT SU PPDU, EHT ტრიგერზე დაფუძნებული PPDU, გაფართოებული დიაპაზონის EHT ER SU PPDU და EHT MU PPDU.

როგორც ნაჩვენებია ნახ. 2.2-ზე, EHT PPDU შეიცავს მემკვიდრეობითი ნაწილის ველებს, კერძოდ, გამოყენებულია L-STF, L-LTF, L-SIG, RL-SIG, მაგრამ მათთან ერთად ასევე გვაქვს უნივერსალური SIG (U-SIG), EHT-SIG, EHT-STF, EHT-LTF ველები და მონაცემთა ველი. ამასთან, 2.4 გჰც, 5 გჰც და 6 გჰც დიაპაზონებში მომუშავე მემკვიდრეობით PPDU-სთან უკუთავსებადობის შესანარჩუნებლად მემკვიდრეობის ნაწილის ველი წარმოდგენილი უნდა იქნეს EHT PPDU-ს დასაწყისში, რომელსაც იყენებენ ფრეიმის იდენტიფიკაციის, სინქრონიზაციისა და საჭირო ინფორმაციის გადასაცემად



**ნახ. 2.2.** EHT PDU ფორმატი

(როგორებიცაა MCS-ები და ფრეიმის სიგრძე). PDU-ისთვის, რომლის სიხშირის გატარების ზოლი 160 მჰც ან ნაკლებია, მემკვიდრეობითი ნაწილი დუბლირებულია და მას შეუძლია განმეორებით გამოიყენოს არსებული ტონების როტაცია. ამასთან, PDU-სთვის, რომლის სიხშირის გატარების ზოლი უფრო ფართოა, ვიდრე 160 მჰც, ტონების როტაცია ჯერ კიდევ არ არის განსაზღვრული. IEEE 802.11ax მოწყობილობების იმიტირებისა და სიგრძის შენარჩუნებისათვის EHT PDU-ს L-SIG ველში, L-SIG-ის შემდეგი პირველი სიმბოლო BPSK-თი უნდა იყოს მოდულირებული. RL-SIG ველის ქონა აუცილებელია შენობებს გარეთა გამოყენებებში, L-SIG-ის რობასტულობის გასაუმჯობესებლად და EHT PDU-ს იდენტიფიცირებისთვის ავტომატური დეტექტირების საშუალებით, და ის განსხვავებული უნდა იყოს IEEE 802.11ax PDU-ს RL-SIG ველისაგან.

უკუთავსებადობისთვის EHT ფრეიმის ფორმატი იწყება მემკვიდრეობითი ველებიდან (ანუ გვაქვს L-STF ველი, L-LTF ველი, L-SIG ველი და RL-SIG ველი), რომლებსაც იყენებენ ფრეიმის დეტექტირების, სინქრონიზაციის, საჭირო ინფორმაციის გადატანისთვის (მაგალითად, MCS-ების და ფრეიმის სიგრძის შესახებ). U-SIG ველში, ვერსიისგან დამოუკიდებელი ველები შეიცავს PHY ვერსიის იდენტიფიკატორს, UL/DL ალამს, BSS-ს ფერს, TXOP-ის ხანგრძლივობას და ა.შ. ვერსიაზე დამოკიდებული ველები EHT-SIG ველში შეიცავს მსგავს ინფორმაციას, რომელიც შეტანილია HE-SIG-A-ში და სხვა ინფორმაციას EHT-ის ახალი ფუნქციების შესახებ. საერთო ველი, რომელიც მოთავსებულია EHT-SIG ველში, შეიცავს ინფორმაციას მულტი-RU-ების განაწილების, MCS-ის, კოდირების და ა.შ. შესახებ. მომხმარებლისთვის სპეციფიკური ველებს EHT-SIG-ში იყენებენ მრავალი მომხმარებლისთვის განკუთვნილი ინდივიდუალური ინფორმაციის გადასატანად. EHT-STF და EHT-LTF ველებს იყენებენ არხის შესაფასებლად MIMO/OFDMA გადაცემის პროცესში.

RL-SIG ველის შემდეგ, EHT PDU მოიცავს ორი OFDM სიმბოლოს შემცველ U-SIG ველს, როგორცაა HE-SIG-A ველი IEEE 802.11ax-ში და რომელ-

საც იყენებენ EHT PPDU-ების ინტერპრეტაციისთვის საჭირო ინფორმაციის გადასატანად. U-SIG ველი შეიცავს როგორც ვერსიისგან დამოუკიდებელ, ასევე ვერსიაზე დამოკიდებულ ველებს. ვერსიისგან დამოუკიდებელი ველების შედგენა შესაძლებელია PHY ვერსიის იდენტიფიკატორის, UL/DL აღმის, BSS-ის ფერის, PPDU-ს ტიპის, MCS-ის, სიხშირის გატარების ზოლის, TXOP-ის და ა.შ. გამოყენებით. ვერსიაზე დამოკიდებული ველები შედგება მსგავსი ინფორმაციისგან, რომელიც შედის HE-SIG-A-ში და, ასევე, ახალი საინფორმაციო ველებისაგან, როგორებიცაა დაცვითი ინტერვალის ხანგრძლივობა, EHT-STF/LTF-ის ზომა, სივრცით-დროითი კოდირების ალამი და ა.შ.

მრავალი მომხმარებლისთვის გაგზავნილი EHT PPDU-ს ეფექტიანი სასიგნალო მხარდაჭერის უზრუნველსაყოფად, როგორებიცაა, მაგალითად, OFDMA და DL MU-MIMO რესურსების განაწილების ინფორმაცია, EHT PPDU-ში უნდა არსებობდეს ცვლადი MCS და ცვლადი სიგრძის EHT-SIG ველი (უშუალოდ U-SIG-ის შემდეგ). EHT-SIG ველი შედგება საერთო ველებისა და ნულისაგან ან რამდენიმე მომხმარებლისთვის სპეციფიკური ველებისაგან. საერთო ველი შეიცავს ინფორმაციას RU-ის განთავსების, კოდირების, MCS-ის, სივრცით-დროითი ნაკადების რაოდენობის, დაცვითი ინტერვალის ხანგრძლივობის შესახებ და ა.შ. მომხმარებლისთვის სპეციფიკური ველები შეიცავს ცალკეული მომხმარებლებისთვის სპეციალურ ინფორმაციას. SU PPDU-სთვის EHT SIG ველი შედგება მხოლოდ საერთო ველის ნაწილისგან, მომხმარებლისთვის სპეციფიკური ველების გარეშე. EHT ტრიგერზე დაფუძნებულ PPDU-ში EHT-SIG გამოტოვებულია, ვინაიდან ჩვენ შეგვიძლია გვექონდეს ყველა საჭირო ინფორმაცია U-SIG ველში. IEEE 802.11ax-ის მსგავსად, დიაპაზონის გაფართოებისთვის, EHT ER SU PPDU-ში U-SIG ველის და EHT-SIG ველის ზომები სავარაუდოდ ორჯერ იქნება გაზრდილი, შესაბამისად, EHT SU PPDU ფორმატის U-SIG ველთან და EHT-SIG ველთან შედარებით.

EHT-STF ველი და EHT-LTF ველი, როგორც EHT პრეამბულის ბოლო ველი, მომხმარებლებს საშუალებას აძლევს, რომ შეაფასონ MIMO არხი და EHT-ს შეეძლება სამი ტიპის EHT-LTF-ის მხარდაჭერა, როგორებიცაა 1xEHT-LTF, 2xEHT-LTF და 4xEHT-LTF ველები. გარდა ამისა, ლიტერატურაში რეკომენდებულია HE-LTF-ების განმეორებითი გამოყენება EHT-LTF-ებისთვის 20/40/80/160/(80+80) მჰც EHT PPDU-ში და ასევე შემოთავაზებულია EHT-LTF-ების დიზაინის მეთოდები 240/(160+80)/320/(160+160) მჰც-ზე დაფუძნებულ EHT PPDU-ში.

პრეამბულის პერფორაცია ეფექტიანი მიდგომაა არხის გამოყენების გასაუმჯობესებლად და გადაცემის სიჩქარის გასაზრდელად. EHT-ში 160 მჰც-ზე ფართო სიხშირის გატარების ზოლით, პრეამბულის პერფორირება მოითხოვს რთული აპარატურული ოპერაციების ჩატარებას და პერფორაციის მოქნილი ნიმუშების გამოყენებას, მაგალითად, IEEE 802.11ax პრეამბულის პერფორაციის ნიმუშების გაფართოებას 240/320 მჰც-მდე ან პერფორაციის გამოყენებას ძირითად არხებზე, არხზე წვდომის შესაძლებლობების გასაზრდელად.

#### **2.2.4 მაღალი რიგის მოდულაციის სქემები**

IEEE 802.11ax-თან შედარებით, რომლის უმაღლესი რიგის მოდულაციის სქემაა 1024-QAM, ჰიკური სიჩქარის კიდევ უფრო გასაზრდელად, EHT-სთვის შემოთავაზებულია კიდევ უფრო მაღალი რიგის მოდულაციის სქემა, ანუ 4096-QAM. ამ უკანასკნელს შეუძლია მოდულაციის ერთი სიმბოლოთი (სიგნალით) 12 ბიტის გადატანა. თეორიულად, ხელშემოაზრადი კოდირების ერთი და იმავე სიჩქარის გამოყენების პირობებში, EHT-ს შეუძლია მიაღწიოს 20%-ით უფრო მაღალ გადაცემის სიჩქარეს IEEE 802.11ax-თან შედარებით, რითაც მომხმარებლებს საშუალებას მისცემს, უზრუნველყონ გადაცემის უფრო მაღალი ეფექტიანობა, შეცდომის ალბათობაზე გარკვეული მოთხოვნების მიხედვით. კომპიუტერული სიმულაციის შედეგების თანახმად, 4096-QAM-ის გამოყენება შესაძლებელია გარკვეულ კონფიგურაციებში, მაგალითად, გადაცემისას სხივის ფორმირების, მცირე რაოდენობის ნაკადების, შეცდომის ალბათობაზე განსაზღვრული მოთხოვნების ან მრავალი მიმღები ანტენის გამოყენების პირობებში. სხვა შესაძლო კონფიგურაციები, როგორებიცაა, მაგალითად, კოდირების სტრატეგიები, ასევე საჭიროებს შემდგომ კვლევებს და გადამოწმებას კომპიუტერული სიმულაციების და ექსპერიმენტების საშუალებით. გარდა ამისა, EHT-MCS უნდა განისაზღვროს როგორც SU, ასევე MU გადაცემისთვის.

გადაცემის ხარისხის, ასევე რობასტულობის გასაუმჯობესებლად, EHT მხარს დაუჭერს DCM-ს, რაც საშუალებას იძლევა, ერთი და იგივე ინფორმაცია იყოს მოდულირებული და გადაცემული წყვილი ქვეგადამტანების მეშვეობით. IEEE 802.11ax-ში, მაღალი საიმედოობის მოთხოვნების დასაკმაყოფილებლად DCM-ს იყენებენ მხოლოდ MCS 0/1/3/4 და 1/2 სივრცითი ნაკადებისთვის. EHT-ში სხვა კანდიდატი ტექნოლოგიების მხარდაჭერით (მაგალითად, მულტი-AP მხარდაჭერა, რომელსაც იყენებენ მომხმარებლისთვის ერთი და იმავე ფრეიზის გადასაცემად, ან

HARQ მხარდაჭერა), DCM შეიძლება გამოყენებულ იქნეს უფრო მაღალი რიგის მოდულაცია-კოდირების სქემებისთვის (მაგალითად, MCS 5/6) ან უფრო მეტი სივრცითი ნაკადისთვის (მაგალითად, 3/4 სივრცითი ნაკადი) სისტემებში გაზრდილი ხელშეშლამდგრადობის და ეფექტიანობის უზრუნველსაყოფად.

## 2.3 მრავალლინკიანი ოპერაციები

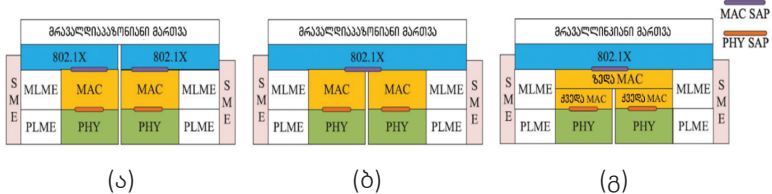
2.4 გჰც, 5 გჰც და 6 გჰც დიაპაზონებში ერთდროული ოპერირება EHT-ს საგულისხმო მახასიათებელია. სპექტრის ყველა არსებული რესურსის მაღალეფექტიანი გამოყენების მისაღწევად საჭიროა სპექტრის ახალი მენეჯმენტი, კოორდინაცია და გადაცემის მექანიზმების შემუშავება 2.4 გჰც-ზე, 5 გჰც-ზე და 6 გჰც-ზე. ამ პარაგრაფში ჩვენ მიმოვიხილავთ რამდენიმე პერსპექტიულ მრავალლინკიან აგრეგაციის ტექნოლოგიას, მათ შორის გაუმჯობესებულ მრავალლინკიან MAC არქიტექტურას, არსებ მრავალლინკიან წვდომას და მრავალლინკიან გადაცემას.

### 2.3.1 გაუმჯობესებული MAC არქიტექტურა მრავალლინკიანი აგრეგაციისთვის

როგორც აღწერილია 802.11be პროექტის ავტორიზაციის მოთხოვნაში (PAR), EHT სამუშაო ჯგუფის ერთ-ერთი მიზანია დააკმაყოფილოს მაღალ გამტარუნარიანობასა და დროის რეალურ მასშტაბში მინიმალურ შეყოვნებასთან დაკავშირებული მკაცრი მოთხოვნები ისეთ გამოყენებაზე, როგორიცაა 4k/8k ვიდეო, VR ან AR, ონლაინ თამაშები და ა.შ. ამიტომ, PAR-ის მოთხოვნების შესასრულებლად მრავალლინკიანი ოპერაციების გამოყენება წარმოადგენს ძირითად თემას, რომელსაც განიხილავენ EHT სამუშაო ჯგუფში. არსებობს გამოკვეთილი ტენდენცია იმისა, რომ STA-ები გადადიან ორ- და სამდიაპაზონიან პარალელურ არქიტექტურაზე, რაც გულისხმობს სიხშირეთა აგრეგაციას 2.4 გჰც, 5 გჰც და 6 გჰც დიაპაზონებისთვის. ყოველივე ეს მოითხოვს მენეჯმენტის ახალ სპეციფიკაციებს და მრავალი სიხშირული ზოლის ერთდროულად გამოყენების ახალ წესებს. ამჟამინდელი IEEE 802.11 პროტოკოლი რეკომენდაციას უწევს ორ მრავალდიაპაზონიან MAC არქიტექტურას, რათა მრავალდიაპაზონიანი ოპერაციებისთვის უზრუნველყოფილ იქნეს სხვადასხვა ტექნიკური მხარდაჭერა, ანუ განიხილება დამოუკიდებელი MAC (არაგამჭვირვალე FST) და განაწილებული MAC (გამჭვირვალე FST), როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 2.3-ზე. ორივე არქიტექტურას შეუძლია უზრუნველყოს ხელახალი მოლაპარაკების „მილი“ ერთი არხიდან მეორეზე იმავე ან განსხვავებულ სიხ-



შირულ დიაპაზონებში გადაცემის სესიის უწყვეტი ფორმით გადასაცვანად. ამის მიუხედავად, არსებობს შეზღუდვა, რომ MSDU-ებს, რომლებიც ეკუთვნის ერთ TID-ს, შეუძლიათ გამოიყენონ მხოლოდ ერთი დიაპაზონი და/ან არხი, რასაც მივყავართ მნიშვნელოვან MAC ოვერჰედებთან ხელახალ მოლაპარაკებათა პროცესში. მაგალითად, მეგვიდრეობითი FST-ის



**ნახ. 2.3.** ორი არსებული MAC არქიტექტურა და გაუმჯობესებული MAC არქიტექტურა მრავალლინკიანი აგრეგაციისთვის: (ა) დამოუკიდებელი MAC მრავალი დიაპაზონისთვის, (ბ) განაწილებული MAC მრავალი დიაპაზონისთვის და (გ) გაერთიანებული MAC მრავალი ლინკისთვის. წარმოდგენილია MAC ქვეფენის მმართველი ერთეული (MLME) და ფიზიკური ფენის მმართველი ერთეული (PLME)

გამოყენებით სესიების გადართვისას, STA-ებმა უნდა მოახდინონ FST-ის დაყენების მოთხოვნისა და რეაგირების ფრეიმების გაცვლის ინიცირება, აგრეთვე FST დადასტურების მოთხოვნისა და რეაგირების ფრეიმების გაცვლა, რის შედეგადაც იქმნება მნიშვნელოვანი MAC ოვერჰედი ხელახალი მოლაპარაკებისას. სესიის სწრაფი გადაცემისთვის სხვადასხვა მართვის/მონაცემების სიბრტყეებში ხელახალი შეთანხმებების საჭიროების აღმოსაფხვრელად MAC-ის არსებითი გაუმჯობესება MAC-ის ახალ არქიტექტურაში (სახელწოდებით გაერთიანებული MAC მრავალი ლინკისთვის) ნახ. 2.3-ზე უნდა იყოს ის, რომ MSDU-ები, რომლებიც მიეკუთვნება ერთ TID-ს, ან შეიძლება სხვადასხვა TID-ს, გადაიცეს მრავალი სიბშირული დიაპაზონით და/ან არხებით ერთდროულად ან არაერთდროულად. სამივე ზემოაღნიშნული MAC არქიტექტურისთვის ასევე უკეთესად უნდა იქნეს შესწავლილი, თუ როგორ და რომელი არქიტექტურით იქნება მხარდაჭერილი მრავალდიაპაზონიანი ოპერაციები.

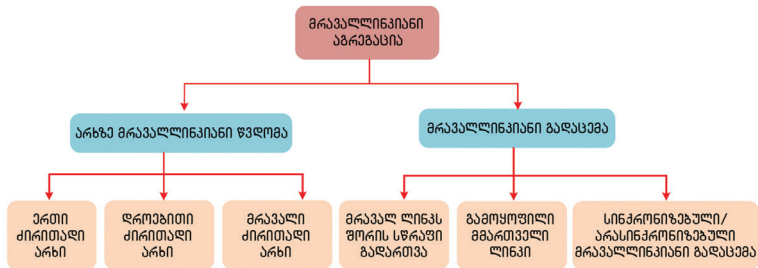
დამოუკიდებელ MAC არქიტექტურაში, სხვადასხვა MAC სერვისის წვდომის წერტილები (SAPs) წარმოდგენილია ზედა ფენებში, რადგან სხვადასხვა MAC მისამართს იყენებენ FST-მდე და მის შემდეგ, ხოლო ზედა ფენები პასუხისმგებელი არიან სესიის გადაცემის მართვაზე, რათა დაბალანსდეს ტრაფიკის დატვირთვა სხვადასხვა დიაპაზონს/არხს შორის. ვინაიდან მრავალი დიაპაზონის მმართველი ერთეულის ფუნქცია შემოიფარგლება FST-ს დაყენებისა და გაუმჯობესების კოორდინა-

ციით, სადგურის მართვის ერთეულების (SMEs) სხვა ადგილობრივ ინფორმაციაზე წვდომის გარეშე SME-ს ადგილობრივი ინფორმაცია, როგორცაა რობასტული უსაფრთხოების ქსელების ასოციაციები (RSNAs), უსაფრთხოების გასაღებები და პაკეტის ნომრების მრიცხველები, უნდა გადაყენდეს ახალი დიაპაზონის/არხისთვის. განაწილებულ MAC არქიტექტურაში მხოლოდ ერთი MAC SAP, რომელიც განისაზღვრება იმავე MAC მისამართით, წარმოდგენილია მაღალ ფენებში, რის შედეგადაც ზედა ფენებმა არ იციან სესიის გადატანის შესახებ სხვადასხვა დიაპაზონს/არხს შორის. თითოეული SME-ს შესახებ ლოკალური ინფორმაცია, მათ შორის ბლოკურ Ack (BA) შეთანხმებებზე, ტრაფიკის ნაკადებზე, ასოციაციის მდგომარეობაზე, RSNA-ზე, უსაფრთხოების გასაღებებსა და პაკეტების რაოდენობის მრიცხველებზე, შეიძლება გაზიარებულ იქნეს მრავალ დიაპაზონზე/არხზე. გაერთიანებულ MAC არქიტექტურაში SME შეიცავს MAC ქვეფენის მხოლოდ ერთ მმართველ ერთეულს და ერთ MAC ქვეფენას. განსხვავებით დამოუკიდებელი MAC-ისგან და განაწილებული MAC-ისგან, MAC პროტოკოლის სტეკი იყოფა ორ ნაწილად და შედგება ზემო MAC-ისგან, რომელიც მხარს უჭერს უმეტეს MAC ოპერაციებს (მაგალითად, A-MSDU-ს აგრეგაცია/დეაგრეგაცია, თანმიმდევრობის/პაკეტის ნომრის მინიჭება, დაშიფვრა/გაშიფვრა და მთლიანობის დაცვა/შემოწმება და ფრაგმენტაცია/დეფრაგმენტაცია) და ქვედა MAC-ისგან, რომელიც მხარს უჭერს მცირე რაოდენობის MAC ოპერაციებს (მაგალითად, MPDU-ს სათაურისა და სიჭარბის ციკლური შემოწმების (CRC) შექმნას/ვალიდაციას და MPDU-ს აგრეგაციას/დეაგრეგაციას). გარდა ამისა, გაერთიანებულ MAC-ს შეუძლია, ხელი შეუწყოს TID-ის დინამიკურ გადატანას მრავალ ლინკს შორის. ტრაფიკი დგება რიგში და იყენებს ყველას ან ნაწილს ხელმისაწვდომ არხებიდან ერთდროული ან არაერთდროული გადაცემისთვის.

### **2.3.2 მრავალლინკიანი ოპერაცია ფართოზოლოვან და არამომიჯნავე სინშირულ სპექტრში**

მრავალლინკიანი აგრეგაციის გამოყენებით 2.4 გჰც, 5 გჰც და 6 გჰც დიაპაზონში, მრავალი ლინკით ფუნქციონირების შესაძლებლობის მქონე მოწყობილობას შეუძლია, პარალელურად გადასცეს ფრეიმები ამ ლინკების საშუალებით, რითაც მიაღწევს უფრო მაღალ გამტარუნარიანობას და გააუმჯობესებს ქსელის მოქნილობას IEEE 802.11ax-სთან შედარებით. ამასთან, არსებული მემკვიდრეობითი მოწყობილობების გათვალისწინებით 2.4 გჰც, 5 გჰც და 6 გჰც დიაპაზონებში, ხელმისაწვდომი არხები შეი-

ძლება იყოს შეზღუდული. ამრიგად, ის, თუ როგორ მოვახდინოთ წვდომა მრავალ ლინკზე და ფრეიმების გადაცემა რამდენიმე ლინკით მოითხოვს დამატებითი კვლევების ჩატარებას, რაც შეიძლება სასარგებლო იყოს ფართო დიაპაზონისა და არამომიჯნავე სიხშირული სპექტრის წვდომის პროცესში. EHT სამუშაო ჯგუფში შემოთავაზებულია არხებზე მრავალ-ლინკიანი წვდომის რამდენიმე პერსპექტიული მეთოდი და მრავალ-ლინკიანი გადაცემის რამდენიმე რეჟიმი (იხ. ნახ. 2.4), მათ შორის არხზე წვდომა ერთი ძირითადი არხის საფუძველზე, არხზე წვდომა მრავალ ძირითად არხზე დაყრდნობით, გამოყოფილი მმართველი ლინკი, ლინკების სწრაფი გადართვა და სინქრონიზებული/არასინქრონიზებული მრავალლინკიანი გადაცემა.



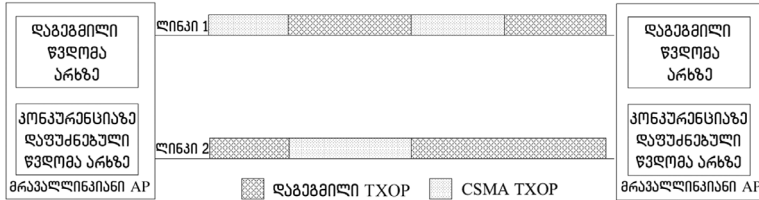
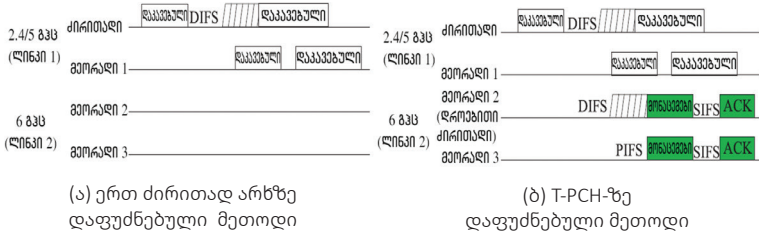
**ნახ. 2.4.** მრავალლინკიანი ოპერაციების მიმოხილვა

1) არხზე მრავალლინკიანი წვდომა: ამჟამინდელ WLAN ქსელებში არხზე წვდომის მექანიზმები (მაგალითად, სუფთა არხის შეფასების (CCA) ინდიკაცია და 20 მჰც-ისთვის ბიტური რუკა) მხოლოდ ერთი ლინკისთვის არის განსაზღვრული 20/40/80/160 მჰც არხზე. ამასთან, სავარაუდოდ, მომავალი Wi-Fi მოწყობილობები მრავალლინკიანი იქნება უფრო ფართო, მაქსიმუმ, 320/(160+160) მჰც არხის სიგანით, და იფუნქციონირებენ 2.4 გჰც, 5 გჰც და 6 გჰც სიხშირულ დიაპაზონებში. დღეისთვის EHT-ში ჯერ არ არის განსაზღვრული არხზე წვდომის ეს მექანიზმები მრავალი ლინკის შემთხვევაში. არხზე წვდომის არსებული ლოგიკის შესაბამისად, CCA ინდიკაცია და 20 მჰც ბიტური რუკა განვითარდება ერთი ლინკიდან მრავალ ლინკზე. მაგალითად, 320 მჰც სიხშირის გატარების ზოლის თვალსაზრისით, CCA მოითხოვს 160 მეორადი ინდიკაციის დამატებას და 20 მჰც ბიტური რუკა მოითხოვს პრეამბულის პერფორაციის უფრო მეტ ნიმუშებს, იმასთან შედარებით, რაც შეიძლება გამოყენებული ყოფილიყო ძირითადი არხისთვის. ქვემოთ ჩვენ დავაჯგუფებთ მრავალი

ლინკისთვის არხზე წვდომის მეთოდებს ორ კატეგორიად: არხზე წვდომა დაფუძნებული ერთ ძირითად არხზე და არხზე წვდომა დაფუძნებული მრავალ ძირითად არხზე.

როგორც არხზე წვდომის მემკვიდრეობით მიღებული ოპერაცია, არხზე მრავალლინკიანი წვდომა შეიძლება შესრულდეს ერთ ძირითად არხზე. ნახ. 2.5 (ა)-ზე, STA ერთდროულად აღწევს წვდომას 2.4 გჰც, 5 გჰც და 6 გჰც სინშირულ დიაპაზონებზე. ეს ხორციელდება კონკურენციაზე დაფუძნებული წვდომით ძირითად არხზე, რამაც შეიძლება შეზღუდოს არხის დაბინძურება გამოწვეული სკანირებით 6 გჰც დიაპაზონში და შეამციროს სკანირების შეყოვნება და ენერჯის მოხმარება 6 გჰც-ში ოპერაციებისთვის. ამასთან, 2.4 გჰც, 5 გჰც და 6 გჰც დიაპაზონებში არსებობს მემკვიდრეობითი STA-ები. შესაბამისად, TXOP-ის მიღება 6 გჰც-ზე დამოკიდებულია არა მხოლოდ სამიზნე ძირითადი არხის 2.4 გჰც და 5 გჰც სინშირეებზე დატვირთვაზე, არამედ მეორადი არხების აქტივობაზეც 6 გჰც დიაპაზონში. არხზე წვდომის ასეთი მეთოდი ნაკლებად მოქნილია არხების არჩევისა და მათი მრავალლინკიან რეჟიმში გამოყენების თვალსაზრისით, განსაკუთრებით მჭიდრო განლაგების სქემებში, რამაც შეიძლება მნიშვნელოვნად გააუარესოს მრავალლინკიანი Wi-Fi სისტემის მუშაობის ხარისხი გაძლიერებული ზონდირების ეფექტის გამო, რითაც იზრდება კონფლიქტები და მცირდება წვდომის შესაძლებლობა ძირითად არხზე. ამ მიზეზით პრეამბულის პერფორაციის ახალი სქემების შემუშავების გარდა, არხების კოორდინაცია მემკვიდრეობით მოწყობილობებსა და EHT მოწყობილობებს შორის სადენიანი/უსადენო კავშირების საშუალებით შეიძლება შესანიშნავი ვარიანტი იყოს, რაც, მაგალითად, EHT მოწყობილობებს საშუალებას მისცემს, შეზღუდონ მემკვიდრეობით STA-ების არხზე წვდომა ან ძალდატანებით გამოიყენონ არხის არჩევის ცვლილებები მემკვიდრეობით AP-ებში.

ვინაიდან მოწყობილობას შეუძლია, მიიღოს თავისი TXOP ძირითად არხზე, ამჟამინდელ IEEE 802.11 პროტოკოლებში სპექტრული რესურსები ძნელად გამოსაყენებელია, თუ ძირითადი არხი გადატვირთულია. ამ პრობლემის დასაძლევად, დროებითი ძირითადი არხი (T-PCH) შეიძლება დაყენდეს მეორად არხებზე, იმისათვის, რომ გაიზარდოს არხის გამოყენების შესაძლებლობები, როდესაც ძირითადი არხი მიუწვდომელია. ნახ. 2.5 (ბ)-ზე, STA-ს შეუძლია განახორციელოს გადამტანის ზონდირება როგორც T-PCH-ზე, ასევე ძირითად არხზე, და იგი იღებს TXOP-ს T-PCH-ზე, თუ T-PCH საჭირო ხანგრძლივობით უმოქმედოა, როდესაც ძირითადი არხი დაკავებულია. მას შემდეგ, რაც T-PCH დაკავდება, მაშინ, როდესაც



(ა) დაგეგმილი და კონკურენციაზე დაფუძნებული მრავალჯერადი წვდომა ძირითად არხებზე

**ნახ. 2.5.** მრავალ არხზე წვდომის მეთოდები:

(ა) როგორც არხზე წვდომის მემკვიდრეობითი ოპერაცია, კონკურენციაზე დაფუძნებული წვდომა არხზე მრავალი ლინკისთვის ხორციელდება ერთ ძირითად არხზე; (ბ) მხოლოდ და მხოლოდ მაშინ, როდესაც ძირითადი არხი მიუწვდომელია, კონკურენციაზე დაფუძნებული არხზე წვდომა ხორციელდება დროებით ძირითად არხზე, რომელიც დაყენებულია მეორად არხზე; წინააღმდეგ შემთხვევაში იგი ხორციელდება ძირითად არხზე; (გ) AP/STA-ს ერთდროულად მოჰყავს მოქმედებაში დაგეგმვაზე დაფუძნებული მოდული და კონკურენციაზე დაფუძნებული მოდული სხვადასხვა ლინკზე. დაგეგმვაზე დაფუძნებული მოდული ჰასუსისმგებელია MSDU-ების დაგეგმვაზე დროის რეალურ მასშტაბში ფუნქციონირებად გამოყენებათათვის დაგეგმილი TXOP-ების დროს, ხოლო კონკურენციაზე დაფუძნებული მოდული ჰასუსისმგებელია TXOP-ების დროს MSDU-ების გადაცემაზე იმ გამოყენებათაგან, რომლებიც არ მუშაობს დროის რეალურ მასშტაბში

ძირითადი არხი ისევ ხდება უმოქმედო, STA-ს შეიძლება მიეცეს T-PCH-დან ძირითად არხზე სასწრაფოდ დაბრუნების უფლება. ამის საშუალებით STA-მ შეიძლება მიიღოს მეტი TXOP უფრო მეტ უმოქმედო არხზე. კომპიუტერული სიმულაციის საშუალებით დადასტურებულია, რომ შემოთავაზებულ T-PCH-ს შეუძლია გააუმჯობესოს არეალში საშუალო გამტარუნარიანობა და არხის გამოყენება. რეალურ გარემოში ასეთმა T-PCH ოპერაციამ შეიძლება მოგვცეს იმის გარანტია, რომ ეს სისტემური მახასიათებლების თვალსაზრისით გავლენას არ მოახდენს ამ არხებში უკვე მოქმედ მემკვიდრეობითი STA-ებზე და სერიოზულად არ დაზიანებს

სამართლიანობის პრინციპს ახალი ტიპის AP-ებს და სხვა მემკვიდრეობით AP-ებს შორის.

ვინაიდან T-PCH-ის არსებობა დამოკიდებულია ძირითადი არხის სტატუსზე, არხზე ასეთი წვდომა მკვეთრად ზღუდავს უმოქმედო არხების გამოყენებას. ინტუიციური იდეა უნდა იყოს ის, რომ STA-მ დამოუკიდებლად მოახდინოს არხზე წვდომა მრავალ ლინკზე. თითოეული ლინკი დამოუკიდებლად ასრულებს სპეციფიკურ ფუნქციონირებას, მაგალითად, EDCA-ს და CCA-ს. ამ მეთოდს აქვს უფრო მაღალი უკუთავსებადობა მემკვიდრეობით საცნობარო ერთლინკიან არქიტექტურასთან შედარებით, რომლის გამოყენებაც აძნელებს კოორდინაციას ზედა ფენების მრავალლინკიან ოპერაციებთან. კომპიუტერული სიმულაციების შედეგები გვიჩვენებს, რომ არხების წარმატებით მოპოვების ალბათობა ერთდროულად ორ კონკურენტულ ლინკზე არ არის მაღალი. იმის გამო, რომ მრავალი ლინკის ბექოფი, ანუ ლოდინი, სანამ გაგრძელდება ფუნქციონირება, მთავრდება სხვადასხვა დროს, მას აქვს სხვადასხვა მოქმედების წესები მრავალლინკიანი სხვადასხვა გადაცემისთვის. დამოუკიდებელი მრავალლინკიანი გადაცემისთვის თითოეული ლინკის ბექოფი ხელმეორედ იყენებს ბექოფის არსებულ წესებს. ერთდროულად მრავალ ლინკით გადაცემისას ბექოფის პროცედურა მრავალ ლინკზე შეიძლება იყოს შემდეგი:

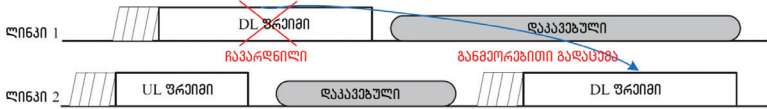
(ა) როდესაც ერთ ლინკზე ბექოფის მრიცხველი თავდაპირველად მცირდება 0-მდე და ახდენს სხვა ლინკების აგრეგაციას, ეს გამოიწვევს სამართლიანობის საკითხის პრობლემას სხვა ლინკებში; (ბ) როდესაც ყველა ლინკში ბექოფის მრიცხველი მცირდება 0-მდე და შემდეგ პაკეტები ერთდროულად გადაიცემა მრავალ ლინკში, STA-ს არხზე წვდომის ნაკლები შანსი ექნება, ვიდრე მემკვიდრეობით STA-ს და ამ თვალსაზრისით, სიხშირის გატარების ზოლი შესაბამის დინამიკური მოლაპარაკება შეიძლება მხარდაჭერილ იქნეს მრავალლინკიან რეჟიმში.

ამასთან, არხზე დაშვების სხვადასხვა სახის მეთოდები (მაგალითად, EDCA და UL არხზე ინიცირებული წვდომა) და მიმდინარე და სამომავლო გამოყენებათა მრავალფეროვანი მოთხოვნები არ არის გათვალისწინებული არხზე წვდომის ზემოხსენებულ მიდგომებში. გადაცემის სხვადასხვა სერვისის სხვადასხვა მოთხოვნის დასაკმაყოფილებლად, რომლებიც დროის რეალურ მასშტაბში და, ასევე, არარეალურ მასშტაბში გამოყენებული პროგრამებია, ლიტერატურაში ასევე შემოთავაზებული იყო მრავალ ძირითად არხზე წვდომის ოპტიმიზებული მეთოდი, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 2.5 (გ)-ზე. აქ AP-ს შეუძლია, ერთდროულად აწარმოოს არხზე წვდომის ფუნქციის ორი მოდული სხვადასხვა ლინკზე,

კერძოდ, დაგეგმვაზე დაფუძნებული მოდული და კონკურენციაზე დაფუძნებული მოდული. დაგეგმვაზე დაფუძნებული მოდული პასუხისმგებელია MSDU-ების დაგეგმვაზე დროის რეალურ მასშტაბში გამოყენებული პროგრამებიდან მრავალი ლინკის TXOP-ების დროს, ხოლო კონკურენციაზე დაფუძნებული მოდული პასუხისმგებელია MSDU-ების გადაცემაზე დროის რეალურ მასშტაბში გამოყენებული პროგრამებიდან, ძირითადად მრავალი ლინკის CSMA-ს TXOP-ების დროს. ამ გზით უკუთავსებადობა და მეგვიდრეობით არხზე წვდომის მეთოდები გარანტიას მისცემს მრავალი ლინკის მხარდამჭერ STA-ებს, რომლებიც მუშაობს წვდომის სხვადასხვა მეთოდით, იფუნქციონირონ ერთსა და იმავე ლინკზე ან განსხვავებულ ლინკებზე.

2) მრავალლინკიანი გადაცემა: ზოგადად, რაც უფრო ფართოა გადაცემისას სიხშირის გატარების ზოლი, მით უფრო მაღალია მეზობელ კვანძებზე თანაარხიდან და მომიჯნავე არხებიდან ინტერფერენციების წარმოქმნის ალბათობა, რაც იწვევს სპექტრული ეფექტიანობის დეგრადაციას. ამრიგად, ლინკის დინამიკური გადართვა, რომელიც დაფუძნებულია უსადენო კავშირის მდგომარეობებზე, კრიტიკული ტექნოლოგიაა მეზობელი კვანძებიდან ძლიერი ინტერფერენციების შესამცირებლად. როდესაც ამჟამინდელი ფუნქციონირებადი ლინკის QoS ვერ აკმაყოფილებს მოთხოვნებს, მრავალი ლინკით მხარდამჭერი AP/STA-ს შეუძლია გადაიყვანოს მმართველი ფრეიმები და მონაცემები სხვა უმოქმედო და მაღალი ხარისხის ლინკებზე. არსებულ IEEE 802.11 სპეციფიკაციებში მოლაპარაკებასთან ერთად არსებული გადართვის ტიპისთვის ჯერ კიდევ არსებობს მნიშვნელოვანი MAC ზედნადები, რომელიც დაკავშირებულია მრავალ ლინკთან დაკავშირებულ ოპერაციებთან. მაგალითად, ლინკებს შორის სესიის გადართვისას, STA ჩვეულებრივ საჭიროებს ფრეიმების გაცვლას, რადგან მონაცემები ერთი TID-დან და შესაბამისი BA/Ack შეიძლება გამოყოფილი იყოს მხოლოდ ერთი და იმავე ლინკისთვის. ახალი და მოქნილი გადართვის ტიპისთვის (მოლაპარაკების გარეშე), ერთი TID და შესაბამისი BA/Ack ფრეიმების მონაცემები უნდა გადაეცეს ყველა ლინკს, ხოლო ერთი ლინკის ოპერაციული მოქმედებები (როგორცაა ძირითადი მოლაპარაკებები, BA მოლაპარაკებები და ენერჯის დაზოგვის შესახებ მოლაპარაკებები) უნდა ჩატარდეს ყველა სხვა ლინკზეც. მრავალ ლინკს შორის სწრაფი გადართვა მოითხოვს ისეთ მოწყობილობებს, რომლებიც ეფექტიანად შეარჩევენ არხებს სხვადასხვა ლინკში, რათა მიღწეულ იქნეს სპექტრის მაღალეფექტიანი გამოყენება. სხვადასხვა ლინკს შორის უწყვეტი გადართვა ეხმარება პრობლემების მოგვა-

რებას ეფექტიანი განმეორებითი გადაცემის, დატვირთვის დაბალანსების და თანაარსებობის შეზღუდვების თვალსაზრისით. ნახ. 2.6-ზე, DL ფრეიმი რომლის გადაცემაც ვერ მოხერხდა ლინკი 1-ით, შეიძლება თავიდან იქნეს გადაცემული ხელმისაწვდომი ლინკი 2-ით, იმისათვის,

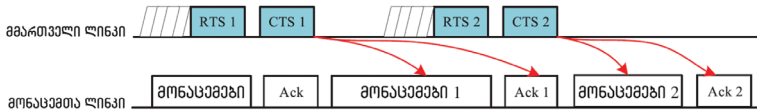


**ნახ. 2.6.** მრავალლინკიანი გადაცემის მაგალითი თანამშრომლობით. როდესაც ლინკი 1-ით DL ფრეიმის გადაცემა ვერ ხერხდება, მისი გადაცემა შესაძლებელია დაუყოვნებლივ არსებული ლინკი 2-ით, რომ შემცირდეს ლოდინის შეყოვნება

რომ შემცირდეს ლოდინის შეყოვნება, ხოლო არხების მიმორიგებულმა ფუნქციონირებამ გაასწოროს ლინკში არსებული ფლუქტუაციები. დატვირთვის დაბალანსების სხვადასხვა მეთოდზე დაყრდნობით, დაშვების მართვის, გადამცემი დიაპაზონის მართვის და ასოციაციის მართვის საფუძველზე, STA-ებს შეუძლიათ მიიღონ გადაწყვეტილება, რომ QoS-ის გასაუმჯობესებლად გადართონ მთელი ტრაფიკი ან ნაწილობრივი ტრაფიკი ერთი გადატვირთული ლინკიდან მეორე გადაუტვირთავ ლინკზე. მაგალითად, ტრაფიკის ტიპებიდან გამომდინარე, STA-ს შეუძლია გადასცეს მაღალი გამტარუნარიანობის და მცირე შეყოვნების სერვისები ერთი ლინკით (მაგალითად, 5/6 გჰც) და გადასცეს შეყოვნებისადმი არამგრძობიარე სერვისები სხვა ლინკით (მაგალითად, 2.4 გჰც).

მემკვიდრეობითი STA ახდენს ჰაკეტების გაცვლას მრავალი თანმიმდევრული მართვის ოპერაციების გამოყენებით ერთსა და იმავე არხებზე მხოლოდ ერთ ლინკზე (მაგალითად, 2.4 გჰც ან 5 გჰც). სხვადასხვა დროში მონაცემების დამუშავება და მართვა გამოიწვევს გადაცემის დიდ შეყოვნებას და სპექტრის არაეფექტიანად გამოყენებას. ამ საკითხების გადაჭრა შეიძლება მონაცემთა სიბრტყის და მმართველი სიბრტყის დაყოფით სხვადასხვა ლინკის მიხედვით. მონაცემთა და მმართველ სიბრტყეთა დაყოფა საშუალებას იძლევა განაზღვდეს რეგულარული მმართველი ფრეიმები ერთ-ერთ ლინკზე, ხოლო დანარჩენი ლინკები ძირითადად გამოყენებულ იქნეს მონაცემთა გაცვლისთვის. ნახ. 2.7-ზე, მმართველ ლინკს შეუძლია მოახდინოს თითოეული კომუნიკაცია მონაცემთა სხვადასხვა არხზე, რაც მოითხოვს მეთოდს, რომლის მიხედვითაც მიმღებმა ზუსტად უნდა იცოდეს, რომელი არხით მიიღოს მონაცემები მოლაპარაკების ან ინტელექტუალური ალგორითმების საშუალებით.





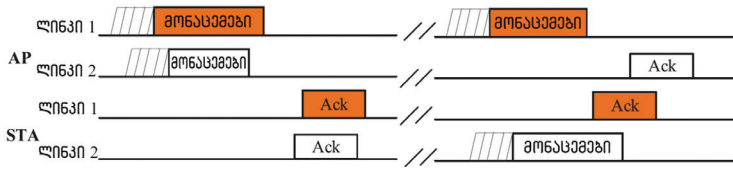
**ნახ. 2.7.** სხვადასხვა ლინკზე მონაცემთა და მმართველი სიბრტყეების დაყოფის მაგალითი, სადაც მმართველ ლინკს იყენებენ მხოლოდ მონაცემთა გაცვლისთვის მმართველი ფრეიმების გადასაცემად, ხოლო მონაცემთა ლინკს იყენებენ მონაცემთა ფრეიმის და Ack ფრეიმის გაცვლისთვის

ასევე, სხვა მმართველი ინფორმაციის (მაგალითად, მმართველი ფრეიმები, MAC/PHY სათაური) გადაცემა შესაძლებელია სპეციალური გამოყოფილი მმართველი ლინკით და მმართველი ინფორმაციის ლინკის გარეთ გაცვლაზე თანხმობით შესაძლებელია რესურსების უფრო ეფექტიანი განაწილების მიღწევა. მონაცემთა და მმართველი სიბრტყეების სრულმა განცალკევებამ ასევე უნდა დაეყოს მონაცემთა პაკეტები ორ ნაწილად: მონაცემთა ნაწილად და მმართველ ნაწილად, რომლებიც გადაიცემა მრავალი ლინკით. ამასთან, ვინაიდან მონაცემები გადაიცემა სხვადასხვა ლინკით, მონაცემთა მიღების არათანმიმდევრული რიგი შეიძლება წარმოიქმნას გადაცემის დროში განსხვავების გამო. ამიტომ კიდევ უფრო მეტი გამოკვლევაა ჩასატარებელი, რათა შეიქმნას უფრო ძლიერი და ეფექტიანი მრავალლინკიანი სისტემა მონაცემთა და მმართველი სიბრტყეების დაყოფით.

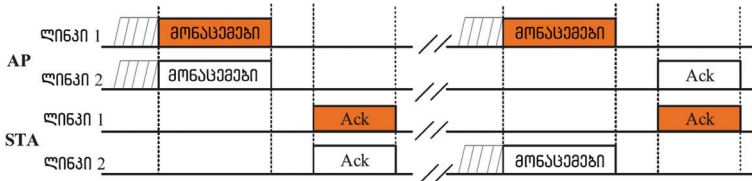
არსებული განაწილებული WLAN-ის არაეფექტიანი მენეჯმენტის და დაბალი საიმედოობის პრობლემების გადასაჭრელად შემოთავაზებულია WLAN-ის ახალი არქიტექტურა მმართველი სიბრტყის და მონაცემთა სიბრტყის დაყოფით, რომელიც წარმოადგენს ცენტრალიზებული მართვის ქსელის არქიტექტურას და რომელშიც წვდომის მმართველი (AC) აკონტროლებს და მართავს ყველა AP-ს და STA-ს დაბალსიხშირულ დიაპაზონში მმართველი სიბრტყის მეშვეობით, ხოლო AP უზრუნველყოფს STA-ებისთვის მონაცემთა გადაცემას მაღალსიხშირულ დიაპაზონში მონაცემთა სიბრტყის მეშვეობით.

ნახ. 2.8-ზე ორი ტიპის მრავალლინკიანი გადაცემა ილუსტრირებულია მრავალ ლინკზე UL/DL ერთდროული გადაცემების შესაძლებლობის შესაბამისად, კერძოდ, არასინქრონიზებული მრავალლინკიანი და სინქრონიზებული მრავალლინკიანი გადაცემებით.

არასინქრონიზებული მრავალლინკიანი გადაცემისთვის, მოწყობილობას შეუძლია გადასცეს ფრეიმები გადაცემის გაუთანაბრებელი საწყისი დროით სხვადასხვა ლინკის მეშვეობით. თითოეულ ლინკს აქვს



(ა) არასინქრონიზებული მრავალლინკიანი გადაცემა



(ბ) სინქრონიზებული მრავალლინკიანი გადაცემა

**ნახ. 2.8.** არასინქრონიზებული (ა) და სინქრონიზებული (ბ) მრავალლინკიანი გადაცემების მაგალითი. განურჩევლად იმისა, ერთდროული გადაცემა და მიღება ხორციელდება თუ არაერთდროული გადაცემა და მიღება, არასინქრონიზებულ გადაცემის რეჟიმში სხვადასხვა ლინკზე გადაცემის საწყისი დრო არ არის გათანაბრებული. სინქრონიზებული გადაცემა გათანაბრებული გადაცემის საწყისი დროით მოწყობილობას საშუალებას აძლევს, გადასცეს და მიიღოს ფრეიმები ერთდროულად/არაერთდროულად მრავალი ლინკის მეშვეობით

არხზე დამოუკიდებელი წვდომა და საკუთარი ძირითადი არხი, ისევე, როგორც EDCA პარამეტრები. სხვადასხვა ლინკზე განსხვავებული სა-არხო პირობების და სიმძლავრეზე ნორმატიული შეზღუდვების გამოყენებით შეიძლება მივაღწიოთ ოპტიმალურ გამტარუნარიანობას ინდივიდუალური MCS-ის მისადაგებით თითოეული ლინკისთვის. სინქრონიზებული მრავალლინკიანი გადაცემა ნიშნავს, რომ მოწყობილობამ უნდა გადასცეს ფრეიმები მრავალი ლინკით გადაცემის შეთანხმებული საწყისი დროით. გადაცემის დაწყებამდე CCA-ის უმოქმედობის მოლოდინს მიყვავართ დროის დანაკარგებთან ლინკებისთვის ადრეული მოლოდინით და შეიძლება დაგვჭირდეს სქემები უმოქმედო არხების დასაკავებლად, მაგალითად, ლოდინის მაქსიმალური დროის მართვა ალბათური ნეირონული ქსელის უმოქმედობის დროის პროგნოზირების საფუძველზე. როგორც სინქრონიზებული მრავალლინკიანი გადაცემისას, ასევე არასინქრონიზებული მრავალლინკიანი გადაცემისას, ნებადართულია არაერთდროული გადაცემა და მიღება ერთი ან მეტი ლინკით და, ასევე, შესაძლებელია ერთი ლინკით გადაცემა და, ამავდროულად, სხვა ლინკით მიღება. გარდა ამისა, საჭიროა მეტი ძალისხმევა, PHY/

MAC პროტოკოლის დიზაინით დაწყებული და თეორიული საფუძვლების შემუშავებით დამთავრებული, რათა EHT-ში განხორციელდეს არასინქრონიზებული/სინქრონიზებული მრავალლინკიანი ოპერაციების ეფექტიანი რეალიზაცია. არასინქრონიზებული/სინქრონიზებული მრავალლინკიანი ოპერაციების მაჩვენებლები IEEE 802.11 სხვადასხვა ქსელში (მაგალითად, მულტი-AP კოლაბორაციულ ქსელებში) შემდგომში უნდა შეფასდეს ისეთი თეორიული ასპექტებით, როგორებიცაა ქსელის გამტარუნარიანობა და გადაცემის მიღწევადი სიჩქარე.

## 2.4 გაუმჯობესებანი MIMO-ს თვალსაზრისით

16 სივრცითი ნაკადის გამოყენებას EHT-ს მიმზიდველ MIMO მახასიათებლად განიხილავენ. სივრცითი ნაკადების გაზრდილმა რაოდენობამ IEEE 802.11ax-ის ამჟამინდელი რვიდან თექვსმეტამდე, თეორიულად შეიძლება გააორმაგოს მონაცემთა გადაცემის სიჩქარე. მაგრამ ამას თან ახლავს ზონდირებასა და უკუკავშირთან დაკავშირებული ოპერაციების რაოდენობის შესაბამისი ზრდა. IEEE 802.11ax-ით განსაზღვრული არსებული ზონდირების და უკუკავშირის მექანიზმების პირდაპირი გამოყენება არ არის საკმარისი 16 სივრცითი ნაკადის მხარდასაჭერად. ამიტომ ეს პარაგრაფი განსაკუთრებულ ყურადღებას უთმობს უკუკავშირის რეალიზაციის სირთულის შემცირების გაუმჯობესებულ სქემებს, რომლებიც მხარს უჭერს 16 სივრცით ნაკადს, ისევე როგორც ზოგიერთ ახალ სქემას. შესაბამისად, ჩვენ თავდაპირველად მოკლედ მიმოვიხილავთ დღეს არსებულ სქემებს.

### 2.4.1 არხის ზონდირების და უკუკავშირის გამარტივების არსებული სქემები

არხის ზონდირების მექანიზმს გადამწყვეტი მნიშვნელობა აქვს არხის მდგომარეობის შესახებ ინფორმაციის (CSI) ზუსტი მნიშვნელობის მისაღებად გადასაცემი სიგნალის წინასწარი კოდირებისთვის MIMO გადაცემებში. CSI-ის მისაღებად არსებობს ორი ტიპური მეთოდი: არაცხადი ზონდირება, რომელიც ემყარება არხის ორმხრივობას, რაც საშუალებას იძლევა, რომ შევაფასოთ CSI მიმღებზე CSI-ის მნიშვნელობის გამოყენებით გადამცემზე და ცხადი ზონდირება, რომელიც მხარდაჭერილია ახალ IEEE 802.11 სპეციფიკაციებში და რომლის დროსაც მოითხოვება, რომ მიმღებმა თავად გააკეთოს CSI-ის შეფასება და უკუკავშირის არხით დროულად გადასცეს ეს CSI გადამცემს.

CSI-ს უკუკავშირის ოვერჰედის შემცირება მნიშვნელოვანი საკითხია არხის ზონდირების ეფექტიანობის გასაუმჯობესებლად, რადგან უკუკავშირით გამოწვეული ხანგრძლივი შეყოვნებები ხელს უშლის ზონდირების დროულობას. არაცხადი უკუკავშირის ოვერჰედი შეიძლება გამოირიცხოს სისტემებში არხის ორმხრივობით. შესრულებასთან დაკავშირებული დანაკარგების არარსებობის შემთხვევაში, ცხადი უკუკავშირის ოვერჰედი შეიძლება შემცირდეს უკუკავშირის ინფორმაციის რაოდენობის შეზღუდვით. ზოგადად, თანამედროვე IEEE 802.11 სისტემებში არსებობს ცხადი უკუკავშირის შემცირების ოთხი სახის მეთოდი: φ მხოლოდ უკუკავშირი – უკუკავშირით გადასცემს მხოლოდ φ-ს  $N \times 1$  ( $N$  არის გადამცემი ანტენების რაოდენობა) გადაცემაში და განიხილავს ფიქსირებულ ψ-ს (IEEE 802.11ah), დროის დომენის არხის უკუკავშირი (IEEE 802.11ad / IEEE 802.11ay), გივენსის როტაცია – უკუკავშირით გადაიცემა დრო ან სიხშირე გივენსის როტაციის კუთხეების მიხედვით, და კუთხური დაკვანტვა – გივენსის კუთხე ( $\phi, \psi$ ) დაიკვანტება თანაბრად, სადაც ( $\phi, \psi$ ) არის წინასწარი გამრავლების მატრიცების და გივენსის როტაციის მატრიცების კუთხეები, რომლებსაც იყენებენ უკუკავშირის არხის შესაბამისი სინგულარული მატრიცის შეკუმშვისას. გარდა ამისა, IEEE 802.11ax რეკომენდაციას იძლევა, გამოყენებულ იქნეს უკუკავშირის შემცირების სამი სხვა ხერხი: ტონების დაჯგუფების ზომების გაზრდა უკუკავშირის დროს, სიხშირის გატარების ზოლში ნაწილობრივი უკუკავშირის გამოყენება RU-ების დიაპაზონზე და უკუკავშირის დაშვება RU-ს სიგნალის ხმაურთან თანაფარდობის (SNR) მიხედვით.

#### **2.4.2 უკუკავშირის გამარტივების გაუმჯობესებული სქემები**

წლების განმავლობაში მუდმივად იყო იმის მოლოდინი, რომ AP-ებისთვის გამოიყენებდნენ უფრო მეტ სივრცითი ნაკადს და სივრცითი მულტიპლექსირების უკეთესი შესაძლებლობები იქნებოდა. ამასთან, სივრცითი ნაკადების საერთო რაოდენობის 16-მდე გაზრდის გამო ზონდირების და უკუკავშირის შესახებ დიდი რაოდენობის ინფორმაციამ შეიძლება ხელი შეუშალოს MIMO გადაცემებით მოგებათა მიღწევას. მეტიც, 2.5 ჰარაგრაფში განხილული მულტი-AP-ის სტრუქტურებისთვის საჭიროა დამატებითი ინფორმაციის მიღება უკუკავშირის შესახებ, რადგან STA-ს შეიძლება დასჭირდეს უკუკავშირის ინფორმაციის გაგზავნა თითოეული AP-ისთვის. ზემოთ მოყვანილი მიზეზების გამო, საჭიროა, უკუკავშირის ოვერჰედის შემცირების ყველაზე სასარგებლო მეთოდების გამოკვლევა 16 სივრცითი ნაკადისთვის.

1) ცხადი უკუკავშირის სქემები: EHT-მ შეიძლება გააუმჯობესოს ცხადი უკუკავშირის შემცირების ამჟამინდელი მეთოდოლოგია IEEE 802.11-ში ნებისმიერი შემდეგი სქემის –  $\phi$  მხოლოდ უკუკავშირის, დროის დომენის არხით უკუკავშირის, გივენსის დიფერენციალური როტაციისა და ცვლადი კუთხით დაკვანტვის გამოყენებით. ამას გარდა, ჩვენ განვიხილავთ ახალ ცხად სქემებსაც, რომლებსაც შეიძლება დასჭირდეს დამატებითი შემუშავება, როგორცაა უკუკავშირის სქემების ინდიკაცია და არხების ზონდირების პროცესის დიზაინი. არსებობს სამი სახის ახალი ცხადი უკუკავშირის სქემა, რომლებიც ამცირებს უკუკავშირის ოვერჰედს, კერძოდ, მრავალკომპონენტური უკუკავშირი, სასრული უკუკავშირი და არხის ორმხრივ ზონდირება.

(ა)  $\phi$  მხოლოდ უკუკავშირი: ამ მეთოდით ჩვენ შეიძლება შევინარჩუნოთ იგივე ოვერჰედი და გავზარდოთ  $b_{\phi}$  და, ასევე, შეგვიძლია შევამციროთ ოვერჰედი  $b_{\phi}$ -ს იმავე მნიშვნელობის შენარჩუნებით და  $b_{\psi}$  -ის შეცვლით, სადაც  $b_{\phi}$  და  $b_{\psi}$  არის დაკვანტვის შედეგად მიღებული ბიტების რაოდენობა გივენსის კუთხისთვის ( $\phi, \psi$ ). მაგრამ ამ მეთოდს შეუძლია იმუშაოს მხოლოდ მონაცემთა ერთი ნაკადისთვის.

(ბ) უკუკავშირი დროის დომენის არხით: უკუკავშირის ოვერჰედზე შეიძლება ეკონომიის მიღწევა მაშინ, როდესაც მნიშვნელოვან განშტოებათა რაოდენობა შეიძლება გაცილებით ნაკლები იყოს, ვიდრე ტონების რაოდენობა. ამასთან, შეიძლება დაგვჭირდეს რეალურ არხთან ან არხის სინგულარული დაშლის კომპონენტებთან უკუკავშირი, რომ განხორციელდეს არხის გარდაქმნა სიხშირეების დომენში. ამას შეიძლება დასჭირდეს დამატებითი სიგნალიზაცია ექსტრა მატრიცისა და განშტოებების პროზიციების მისათითებლად, რადგან ისინი არ არის დაფიქსირებული როგორც სიხშირული დომენის უკუკავშირი. ამიტომ უკუკავშირის ოვერჰედის შემცირების პროცესში განიხილება კომპრომისი თითო განშტოებაზე უკუკავშირის გაზრდისა და უკუკავშირის განშტოებათა შემცირებული რაოდენობის თვალსაზრისით.

(გ) გივენსის დიფერენციალური როტაცია: ეს დიფერენციალური უკუკავშირის სქემა მნიშვნელოვნად ამცირებს უკუკავშირის ოვერჰედის მნიშვნელობას და საშუალებას აძლევს თითოეულ მომხმარებელს უკუკავშირით გადასცეს მხოლოდ სხვაობა დროის ან სიხშირის მიხედვით გივენსის როტაციის კუთხეებთან მიმართებაში უფრო ადრინდელი უკუკავშირის შედეგებთან შედარებით. მაგალითად, სიხშირის დომენში გამოკლების გამოყენებით, ჩვენ შეგვიძლია გავაგზავნოთ მხოლოდ გივენსის როტაციის კუთხეებს შორის არსებული დიფერენციალური ინ-

ფორმაცია მოცემული საწყისი არხის და შემდეგი არხისთვის, 4 ქვეგადამტანით სიხშირული სეპარაციის დროს. მაგრამ ეს მეთოდი საჭიროებს დამატებით დახვეწას, ვინაიდან შეიძლება არსებობდეს შეცდომის გამრავლების ეფექტი, რაც გამოიწვევს კავშირის გაუარესებას.

(დ) ცვლადი კუთხით დაკვანტვა: ჩვეულებრივი მეთოდით ხორციელდება გივენსის კუთხის თანაბარი დაკვანტვა. არხის მდგომარეობიდან გამომდინარე, შეგვიძლია გამოვიყენოთ დაკვანტვის სხვადასხვა დონე გივენსის სხვადასხვა როტაციის კუთხისთვის ( $\phi, \psi$ ) ცხადი უკუკავშირის შემცირებისთვის. ამასთან, ეს მოითხოვს დამატებით დამუშავებას.  $\psi$  კუთხე შეიძლება განსხვავდებოდეს განაწილების შესაბამისად. გივენსის როტაციის შემდეგ კუთხეების დაკვანტვისთვის, ჩვენ შეგვიძლია გამოვიყენოთ სხვადასხვა დიაპაზონი სხვადასხვა კუთხის ან კუთხეების ჯგუფებისთვის: თითოეული კუთხის ან კუთხეების ჯგუფისთვის, დიაპაზონი  $\Omega_{\psi} = [a, b]C[0, \pi/2]$ .

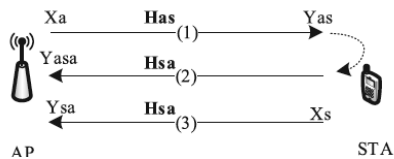
(ე) მრავალკომპონენტიანი უკუკავშირი: ესაა ცხადი უკუკავშირის გამჯობესებული მეთოდი, რომელიც მრავალ კომპონენტად დაყოფის გზით საშუალებას იძლევა, განხორციელდეს მრავალკომპონენტიანი უკუკავშირი. მაგალითად, ერთ კომპონენტს აქვს უფრო დიდი ზომა და უკუკავშირს იყენებს დროის უფრო დიდ ინტერვალში, ხოლო მეორე კომპონენტი უფრო მცირეა და უკუკავშირს აწარმოებს მოკლე ინტერვალებით, რის შედეგადაც ხდება ოვერჰედის შემცირება უკუკავშირის კომბინირებით. ლიტერატურაში განხილულია ასეთი სქემის მაგალითი, რომლის საშუალებითაც მიიღწევა უკუკავშირის გრანულირება, რომელიც 20 მჰც-ზე ნაკლებია და კომპიუტერული სიმულაციის შედეგებით განისაზღვრა მთლიანი უკუკავშირი თითო გადაცემისთვის თითო მომხმარებელზე, ანუ უკუკავშირის რაოდენობა, რაც საჭიროა იმისათვის, რომ თითოეულმა მომხმარებელმა წარმატებით აწარმოოს გადაცემა. დადგინდა, რომ ოვერჰედის თვალსაზრისით შესაძლებელია თითოეულ მომხმარებელზე დაახლოებით 90% ეკონომიის გაწევა.

(ვ) სასრული უკუკავშირი: უსადენო საკომუნიკაციო ქსელში სასრული უკუკავშირი კარგად გამოცდილი ტექნოლოგიაა, რომელიც უზრუნველყოფს არხის თითქმის ოპტიმალურ ადაპტაციას, რაც საშუალებას აძლევს მიმღებს, გაუგზავნოს გადამცემს მცირე რაოდენობის საინფორმაციო ბიტები CSI-ის შესახებ. მაგალითად, ფიჭურ ქსელებში ფართოდ გამოყენებული კოდური წიგნი შეიძლება იყოს ეფექტიანი გამოსავალი უკუკავშირის შემცირებისთვის. სასრული უკუკავშირის სისტემამ შეიძლება უკუკავშირით გადასცეს კოდური სიტყვა კარგად შემუშავებული

კოდური წიგნიდან, ხოლო მთლიანი უკუკავშირი შეიძლება შემცირდეს კოდური წიგნის ზომის მიხედვით. გარდა ამისა, უკუკავშირის მაღალი სიზუსტით შეკუმშვის ტექნოლოგიამ გამეჩხრებული აპროქსიმაციის და შეკუმშვის გამოყენებით შეიძლება შეამციროს ოვერჰედი და რესურსების მოხმარება, რაც საშუალებას გვაძლევს, რაოდენობრივად ავსახოთ არხის ვექტორი რამდენიმე ერთეულოვანი ვექტორის წრფივი კომბინაციით. შედეგად შეიძლება მივიღოთ თითქმის რეალური CSI, რადგან ხაზოვანი კომბინაცია შეიძლება სრულყოფილად აღდგეს შეკუმშული ზონდირებით. ამ უკუკავშირისთვის საჭიროა სიგნალის სიმეჩხრის მახასიათებლების გამოყენება სიგნალის დამუშავებისას.

ზ) არხის ორმხრივი ზონდირება: ლიტერატურაში შემოთავაზებულია არხის ორმხრივი ზონდირების სქემა, რომელიც ნაჩვენებია ნახ. 2.9-ზე, ანუ AP აგზავნის ტრენინგის სიგნალებს (Xa) STA-ის მიმართულებით, იყენებს რა (Has) არხს, ხოლო STA გამუდმებით აგზავნის მიღებულ სიგნალებს (Yas) უკან AP-ზე (Hsa) არხის საშუალებით. ამ წინ და უკან მოგზაური ტრენინგის სიგნალისა (Yasa) და STA-ის ცალმხრივი ტრენინგის სიგნალის (Ysa) ბაზაზე AP-ს საშუალება ეძლევა, შეაფასოს მისი გამავალი არხი. ამ მეთოდს დაბალი რელიაზაციის სირთულე აქვს STA-ში.

2) არაცხადი უკუკავშირის სქემები: არაცხადი უკუკავშირის საშუალებით

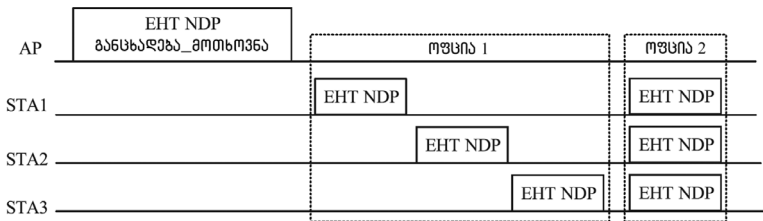


**ნახ. 2.9.** უკუკავშირის შემცირების მიზნით გამოყენებული არხის ორმხრივი ზონდირების მეთოდი. ტრენინგის სიგნალები  $X_a$  და  $X_s$  ცნობილია როგორც AP-ს მხარეს, ასევე STA-ს მხარეს. თავდაპირველად AP აგზავნის ტრენინგის  $X_a$  სიგნალს  $H_{as}$  არხის მეშვეობით STA-სკენ. მისი, როგორც  $Y_{as}$ -ს მიღების შემდეგ, STA ამ  $Y_{as}$ -ს უბრუნებს AP-ს და AP იღებს  $Y_{asa}$ -ს. ამის შემდეგ, AP იღებს  $X_s$ -ს  $H_{sa}$  არხით, როგორც  $Y_{sa}$ -ს. ორმხრივი გადაცემის ბაზაზე AP ავასებს  $H_{sa}$  არხის იმპულსურ გამოძახილს და შემდეგ  $H_{as}$  არხის იმპულსურ გამოძახილს

ბით შეიძლება თავიდან იქნეს აცილებული CSI-ის უკუკავშირი იმ ფაქტზე დაყრდნობით, რომ UL და DL არხებს აქვთ იდენტური იმპულსური გამოძახილი ერთსა და იმავე კოპერენტულ ინტერვალში. ამასთან, რადიოსადგურებს, როგორც წესი, აქვთ ნელი (და შემთხვევითი წესით) ცვალებადი არაორმხრივი დამახინჯება წრელებში საბაზისო სიხშირეებიდან რადიოსიხშირეებამდე (RF) და RF-დან საბაზისო სიხშირეებამდე. შედეგად, რე-

ალური DL საბაზისო სიხშირეების ზოლის არხი არ არის იდენტური UL საბაზისო სიხშირეების ზოლის არხისა, თუ ეს შეუსაბამობა აშკარად არ ანაზღაურდება დაკალიბრებით. IEEE 802.11n-ში მითითებული კომპლექსური ინტერაქტიური მეთოდების გარდა, დაკალიბრება შეიძლება მოგვარდეს სხვადასხვა კვლევითი ძალისხმევის საფუძველზე, მათ შორის გლუვი და დამახინჯებისწინა კომპენსაციით. შეიძლება გამოყენებულ იქნეს ახლახან შემუშავებული ლოკალური AP კალიბრაცია, როდესაც STA არ საჭიროებს დაკალიბრების პროცესში ჩართულობას და, შესაბამისად, არ არსებობს სხვა მოწყობილობებთან საცნობარო სიგნალებისა და არხების შესახებ ინფორმაციის გაცვლის აუცილებლობა.

ზემოხსენებული და სხვა ახალი დაკალიბრების მეთოდების გამოყენების საფუძველზე ვარაუდობენ, რომ კალიბრაცია მიმდებსა და გადამცემს შორის რეალიზებულია, რის შემდეგაც შესაძლებელია გაუმჯობესებული არაცხადი უკუკავშირის სქემების შემუშავება. ლიტერატურაში განხილული ერთ-ერთი ასეთი სქემისთვის არხის ზონდირების დეტალური პროცესი ნაჩვენებია ნახ. 2.10-ზე. MU-MIMO სისტემისთვის არსებობს ურთიერთკომპრომისი არაცხადი მეთოდის (ოფცია 1) და ცხადი მეთოდის (ოფცია 2) ოვერჰედებს შორის, რაც ძირითადად დამოკიდებულია



**ნახ. 2.10.** არხის გაუმჯობესებული ზონდირება არაცხადი უკუკავშირისთვის. ნულოვან მონაცემთა პაკეტის (NDP) განცხადების ფრეიმის მიღების შემდეგ, STA შეასრულებს მიმდევრობითი NDP გადაცემის პროცესს ან ერთდროულ NDP გადაცემის პროცესს OFDMA/UL MU-MIMO რეჟიმში

ლია STA-ების რაოდენობაზე, უკუკავშირის ხანგრძლივობასა და UL-ის ზონდირების ფრეიმის ხანგრძლივობაზე. მაგალითად, STA-ების რაოდენობის ზრდასთან ერთად, UL-ით გადაცემული ფრეიმების რაოდენობაც იზრდება. გარდა ამისა, შეიძლება შევნიშნოთ, რომ ჰირველ ოფციასთან შედარებით, მეორე ოფციას შეუძლია ეფექტიანად შეამციროს CSI-ს უკუკავშირის ოვერჰედი ერთზე მეტი STA-სთვის.

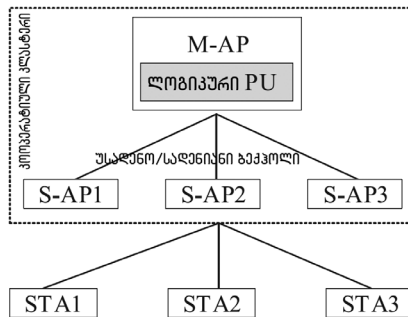


## 2.5 მულტი-AP კოორდინაცია

მობილური მომხმარებლების სულ უფრო მზარდი რაოდენობის გამო და, ამრიგად, მოთხოვნების გაზრდის შედეგად, არხებსშიდა ინტერფერენციები ძალიან დიდი პრობლემა ხდება მჭიდრო უსადენო ქსელებში. თანამშრომლობა მეზობელ AP-ებს შორის, როგორცაა საჭირო დაგეგმილი ინფორმაციისა და CSI-ის გაზიარება, პერსპექტიული მიდგომაა შეზღუდული რადიორესურსების გამოყენების გასაუმჯობესებლად. ამ პარაგრაფში ჩვენ წარმოგიდგენთ მულტი-AP ქსელს და მულტი-AP გადაცემის ზოგად პროცედურას და, ამასთან, გამოვყოფთ მულტი-AP გადაცემის რამდენიმე რეჟიმს, მათ შორის C-OFDMA-ს, CSR-ს, CBF-ს და JTX-ს.

### 2.5.1 მულტი-AP ქსელის არქიტექტურა

ტიპური მულტი-AP ქსელის სტრუქტურის მიხედვით, როგორებიცაა სახლის ქსელი, კორპორაციული ქსელი და კომერციული ქსელი, AP უნდა დაუკავშირდეს მის მეზობელ AP-ებს კოორდინაციისთვის, რაც იწვევს მნიშვნელოვან სიგნალურ ოვერჰედს და დამუშავების გაზრდილ სირთულეს. ამ მხრივ ცენტრალიზებული ქსელის არქიტექტურას, როგორცაა დრუბლოვანი არქიტექტურა და პროგრამულად განსაზღვრული ქსელი (SDN), აქვს მნიშვნელოვანი პოტენციალი, შეამციროს სინქრონიზაციისა და კოორდინაციის პროცესის სირთულე ფიზიკურად დამოუკიდებელ AP-ებში. როგორც ნაჩვენებია ნახ. 2.11-ზე, მულტი-AP სისტემას აქვს მთავარი AP (M-AP) და მრავალი დაქვემდებარებული AP (S-AP), სადაც M-AP, როგორც ყველა AP-ების კოორდინატორი, უზრუნველყოფს მრავალი AP-ის



**ნახ. 2.11.** მულტი-AP არქიტექტურის მაგალითი, სადაც AP-ების ჯგუფი დაკავშირებულია სადენიანი ან უსადენო ლინკებით და M-AP-ზე განთავსებულ ლოგიკურ PU-ს იყენებენ მრავალი განაწილებული AP-ებით განსაზღვრული და მათთან დაკავშირებული მულტი-AP ოპერაციების კოორდინაციისა და მართვისთვის

მართვასა და რესურსების დაგეგმვას, ხოლო S-AP-ები მონაწილეობენ მულტი-AP გადაცემებში.

ამასთანავე, საჭიროა მაღალი გამტარუნარიანობის, მცირე შეყოვნების სადენიანი (მაგალითად, ოპტიკურ-ბოჭკოვანი) ან უსადენო (მაგალითად, მილიმეტრული ტალღების) ბექჰოლის ლინკები, დროის რეალურ მასშტაბში მულტი-AP-ებს შორის კოორდინაციასთან დაკავშირებული ინფორმაციისა და მომსახურების მონაცემების სწრაფი გაცვლისთვის. მულტი-AP გადაცემების ეფექტიანი პროცესის მისაღწევად, მულტი-AP ქსელში შეიძლება დაემატოს ლოგიკური დამუშავების ბლოკი (PU), რომელიც კოორდინაციას უწევს მრავალ განაწილებულ AP-ებთან დაკავშირებულ მულტი-AP ოპერაციებს, მაგალითად, ყველა AP-ის რესურსების მართვას, ყველა AP-ისთვის CSMA/CA ფუნქციების მართვას, ყველა AP-ის გადაცემის კოორდინაციას და ა.შ. ზოგადად, თუ STA შორს იმყოფება მისთვის ინტერფერენციების შემქმნელი AP-ებისგან, ის არ განიცდის შედარებით მნიშვნელოვან ხელშეშლებს და მისი კომუნიკაციის ხარისხი შეიძლება გარანტირებული იყოს მულტი-AP თანამშრომლობის გარეშე.

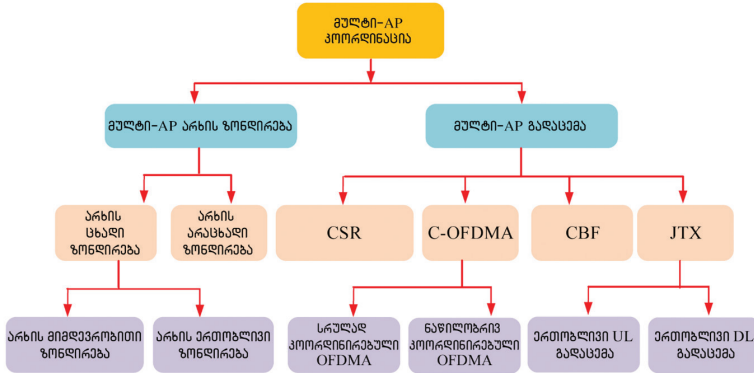
შესაბამისად, საჭიროა კონკრეტული კრიტერიუმები იმის დასადგენად, თუ რომელი STA-ებია პერიფერიული მომხმარებლები. მომხმარებლების შესარჩევად გამოყენებულია შემთხვევითი ალგორითმები და გეოგრაფიული მდებარეობა. ამასთან, AP-ები ჩვეულებრივ შემთხვევითაა განლაგებული WLAN-ში ყოველგვარი დაგეგმვის გარეშე. ძირითადად, ცენტრში განთავსებული მომხმარებელი განსხვავდება პერიფერიაზე მყოფი მომხმარებლისგან SINR სიდიდით. ამრიგად, AP-ს შეუძლია განსაზღვროს STA, როგორც პერიფერიული STA, თუ SINR ნაკლებია წინასწარ დადგენილ ზღურბლზე ან, წინააღმდეგ შემთხვევაში, როგორც ცენტრში განთავსებული მომხმარებელი.

ტრადიციული AP-ისგან განსხვავებით, სადაც ყველა გადამცემი ერთსა და იმავე ოსცილატორს იყენებს, მრავალ განაწილებულ AP-ს აქვს ადგილობრივი ოსცილატორები დამოუკიდებელი გადამტანი სიხშირის წანაცვლებებით (CFOs). მრავალი განაწილებული AP-ის ოსცილატორების სინქრონიზაცია დიდი გამოწვევაა მულტი-AP ქსელისთვის. არასრულყოფილი სინქრონიზაცია იწვევს ნარჩენ CFO-ებს. თუნდაც მცირე ნარჩენი CFO, ათეულობით სიმბოლოს შემდეგ ფაზების გადაადგილებით გამოიწვევს დეკოდირების შეცდომებს. კომპიუტერულმა სიმულაციებმა აჩვენა, რომ AP-ებს შორის ფაზის დაგროვება თუნდაც მცირე 20 ჰც-ის ტოლი ნარჩენი CFO-დან, იწვევს ჰიკური გამტარუნარიანობის მნიშვნე-

ლოვან დეგრადაციას. ნარჩენი CFO-ს გავლენის კომპენსაციისთვის AP/STA-ს შეუძლია გამოიყენოს შუალედური მნიშვნელობები, რომლებიც ჩასმულია PPDU გადაცემაში, რათა მოხდეს არხის შეფასების განახლება/ჩანაცვლება სწრაფად ცვალებად არხებში აკუმულირებული ფაზით, ანუ არხებში მაღალი დოპლერის წანაცვლებით. როგორც ეს გაკეთდა IEEE 802.11ax-ში, M-AP-ს ასევე შეუძლია გამოიყენოს ტრიგერის ფრეიმი, რათა S-AP-ებმა შეძლონ თავდაპირველი სინქრონიზაცია და შემდგომში მოახდინონ თავისი დროის, CFO-ს და ფაზის ხელახალი სინქრონიზაცია პროცესის თითოეულ ნაწილში, რომელიც მოიცავს ზონდირებას და ამის შემდეგ – თითოეულ მულტი-AP გადაცემას. ამის გაკეთება აღვილია მემკვიდრეობითი პრეამბულის საფუძველზე. გარდა ამისა, ფაზური სინქრონიზაციისთვის საცნობარო არხს იყენებენ როგორც საცნობარო საათს. ამასთან, უსადენო არხზე ან ელექტროგადაცემის მაგისტრალური არხზე დაფუძნებული საცნობარო არხი საჭიროებს დამატებით აპარატურულ სირთულეებს თითოეულ AP-ზე. დამატებითი ტექნიკური სირთულეების თავიდან ასაცილებლად, შემოთავაზებულ იქნა ერთობლივი თვალყურის დევნების სქემა, სიმბოლოების დონეზე ფაზის წანაცვლებების დასადგენად. ძირითადი იდეა არის ის, რომ გვაქვს ერთი საცნობარო AP, რომელიც ახდენს მიმდინარე გადაცემების მონიტორინგს და თითოეული მონაცემთა სიმბოლოს ფაზის წანაცვლების გამოთვლას და შემდეგ ეზერნეტის კავშირის საშუალებით ამ შეფასებებს უზრუნველყოფს AP-ს. ამ უკუკავშირით მიღებული გამოძახილის საფუძველზე AP-ებს შეუძლიათ, დინამიკურად არეგულირონ მათი სიგნალის ფაზები ზუსტი შეთანხმების უზრუნველსაყოფად.

## **2.5.2 მულტი-AP გადაცემის პროცედურები**

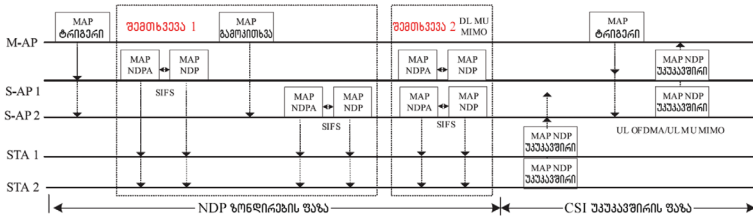
IEEE 802.11ax მხარს უჭერს მხოლოდ ერთ AP-ზე ან ერთი AP-დან გადაცემას და AP-ებსა და STA-ებს შორის სივრცის გაზიარებას, ხოლო EHT ავრცელებს მის შესაძლებლობას მულტი-AP გადაცემებზე, რომლებიც ინიცირებულია AP-ის ან არა-AP-ის STA-ს მიერ და დაფუძნებულია მულტი-AP სქემებზე და QoS მოთხოვნებზე, მაგალითად, როდესაც საჭიროა უფრო მაღალი ეფექტიანობა, მაღალი პიკური გამტარუნარიანობა და დაბალი შეყოვნება და ჯიტიერი. მულტი-AP ქსელში, იმ მიზნით, რომ აქ სრულად განხორციელდეს გადაცემათა უპირატესობის რეალიზაცია, საჭიროა მულტი-AP არხის ზონდირების ჩატარება, რათა უზრუნველყოფილ იქნეს CSI-ს მიწოდება STA-ებიდან იმ AP-ებზე, რომლებიც მონაწილეობენ მულტი-AP გადაცემაში. როგორც ნაჩვენებია ნახ. 2.12-ზე, მულტი-AP



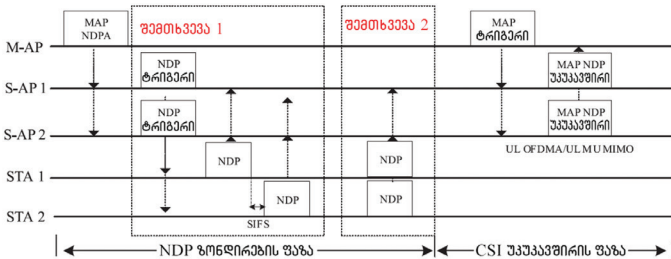
**ნახ. 2.12.** მულტი-AP კოორდინაციის მიმოხილვა

გადაცემებისთვის განიხილება არხის ზონდირების ორი მეთოდი, სახელობრ, არხის ცხადი ზონდირება, რომელიც მოითხოვს სერიოზულ გამოთვლით სირთულეს და CSI-ის უკუკავშირის ოვერჰედს და არხის არაცხადი ზონდირება, რომელსაც აქვს დაკალიბრების მოთხოვნები მიღება/გადაცემის სქემების მიმართ. კოორდინაციის სხვადასხვა სირთულესთან დაკავშირებით, EHT სამუშაო ჯგუფში განიხილეს მულტი-AP გადაცემის თანამედროვე სქემები, მათ შორის C-OFDMA, CSR, CBF და JTX. ქვემოთ ჩვენ წარმოვადგენთ მულტი-AP ზონდირების სქემების და მულტი-AP გადაცემის სქემების დეტალურ აღწერილობას.

1) მულტი-AP არხის ზონდირების პროცედურა: წინასწარ უნდა ჩატარდეს მულტი-AP-ს ზონდირების პროცედურა, რომ მრავალ AP-სა და მრავალ STA-ს შორის მოხდეს CSI-ს მოპოვება. ნახ. 2.13-ზე, M-AP გადასცემს S-AP-ებს ტრიგერის/ნულოვანი მონაცემთა პაკეტის განცხადების (NDPA) ფრეიმს, რომ დაიწყოს ცხადი ან არაცხადი ზონდირების პროცედურა. ზოგადად, NDP გადაცემა უნდა განისაზღვროს დროითი ოვერჰედის, არხის შეფასების სიზუსტისა და გამოთვლითი სირთულის გათვალისწინებით, როგორც AP-ს მხარეს, ასევე STA-ს მხარეს. არაორმხრივ მულტი-AP სისტემაში, არხის ცხადი ზონდირების პროცესში, სადაც STA-ები აფასებენ არხებს და CSI-ს უკუკავშირით აწვდიან AP-ს, შეიძლება გამოყენებულ იქნეს NDP-ის მიმდევრობითი გადაცემა ან NDP-ს ერთდროული გადაცემა, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 2.13 (ა)-ზე. გამოკითხვაზე დაფუძნებული NDP მიმდევრობითი გადაცემა არ საჭიროებს სინქრონიზაციას მრავალ S-AP-ის შორის, მაგრამ ზონდირების პროცედურის დროითი ოვერჰედი თანდათან იზრდება, რადგან მონაწილე S-AP-ების



(ა) არაორმხრივი სისტემა



(ბ) ორმხრივი სისტემა

**ნახ. 2.13.** CSI-ს მოპოვება მრავალ AP-სა და STA-ს შორის არაორმხრივ/ორმხრივ სისტემაში. (ა) არაორმხრივ სისტემაში მაკოორდინირებული მთავარი AP (M-AP) პირველად იწყებს მულტი-AP-ის ზონდირებას NDPA ფრეიმის გაგზავნით, შემდეგ მრავალი S-AP-ები გზავნიან NDP-ს ერთდროულად/მიმდევრობით NDPA ფრეიმში მითითებული თანმიმდევრობით და, საბოლოოდ, STA-ები უკუკავშირით აგზავნიან CSI-ს OFDMA/UL MU-MIMO გზით. (ბ) ორმხრივ სისტემაში მრავალი STA გადასცემს NDP ზონდირების ფრეიმს ერთდროულად/მიმდევრობით NDP ტრიგერის ფრეიმის მოთხოვნის საპასუხოდ, რომელიც შეიცავს ინფორმაციას დროის მითითებით, როდესაც STA-ებმა შესაბამისად უნდა გადასცენ NDP ზონდირების ფრეიმები

საერთო რაოდენობა იზრდება. ერთდროულად გადაცემას, რომელიც იყენებს ტონის შერჩევას DL MU-MIMO-ს LTF-ზე დაფუძნებით, აქვს S-AP-ებს შორის მკაცრი სინქრონიზაციის მოთხოვნა. მიუხედავად იმისა, რომ არხის ზონდირების პროტოკოლმა შეიძლება შეამციროს ზონდირების ოვერჰედი, ის ზრდის CSI-ის გამოთვლით დატვირთვას STA-ს მხარეს, განსაკუთრებით მულტი-AP-ს სქემისთვის, სადაც ერთ AP-ს შეუძლია 16 სივრცითი ნაკადის მხარდაჭერა. ორმხრივ მულტი-AP სისტემაში, არხების არაცხადი ზონდირების სქემა იყენებს CSI-ს AP-ს მხარეს, რომ შეაფასოს ის STA-ზე, რაც მოითხოვს მიღება/გადაცემის წრედების დაკალიბრებას და მნიშვნელოვნად ამცირებს CSI-ს უკუკავშირის ოვერჰედს ცხად ზო-

ნდირებასთან შედარებით. როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 2.13 (ბ)-ზე, STA-ს უნდა ჰქონდეს მოთხოვნა, რომ MAP NDP ფრეიმი გაუგზავნოს S-AP-ებს არხის არაცხადი შეფასებისთვის. არხის შეფასების დასრულების შემდეგ, ყველა STA/S-AP-ებიდან CSI-ს მოპოვება შეიძლება გაგრძელდეს UL OFDMA/UL MU-MIMO გზით, რამაც შეიძლება შეამციროს CSI-ს მოპოვების დრო, CSI-ს მიმდევრობით უკუკავშირთან შედარებით.

CSI-ის მოპოვების პროცესში გადაცემის ხანგრძლივი დროის შემდგომი შემცირებისთვის, ამ თავის მე-4 პარაგრაფში განხილული ზონდირების გაუმჯობესებული სქემები შეიძლება გამოყენებულ იქნეს მულტი-AP-დან და მულტი-STA-დან CSI-ის შეგროვების პროცესში. შეგროვებული CSI-ის საფუძველზე, M-AP წყვეტს, თუ რომელი S-AP-ებია ყველაზე შესაფერისი მულტი-AP გადაცემისთვის და S-AP-ებს აცნობებს ამ არჩევანის შესახებ. თუ შერჩეულ S-AP-ს არ შეუძლია მონაწილეობა მიიღოს მულტი-AP გადაცემაში, მაშინ M-AP ახდენს სხვა პოტენციური S-AP-(ებ)ის არჩევას. გარდა ამისა, არსებობს მრავალი სხვა პოტენციური სტრატეგია მულტი-AP-ის შერჩევისთვის, მაგალითად, სტატიკური, ნახევრად სტატიკური და დინამიკური ქსელზე ორიენტირებული და მომხმარებელზე ორიენტირებული ერთობლივი კლასტერული შერჩევის სტრატეგიები და ინტელექტუალური შერჩევის სტრატეგიები, რომლებიც დაფუძნებულია დრმა განმტკიცებულ სწავლებაზე.

2) კოორდინირებული მულტი-AP გადაცემა: არხის ზონდირების პროცედურის განხორციელების შემდეგ M-AP ახდენს მულტი-AP გადაცემის ინიცირებას, რისთვისაც გადასცემს მმართველ ფრეიმს საბოლოოდ არჩეულ S-AP-ებს. როგორც უკვე აღვნიშნეთ, არსებობს მულტი-AP გადაცემის სხვადასხვა სქემები, როგორებიცაა C-OFDMA, CSR, CBF და JTX.

(ა) C-OFDMA: OFDMA არის ტექნოლოგია, რომელიც ყოფს სიხშირის გატარების მთლიან ზოლს OFDM ქვეგადამტანების ნაკრებთა სერიად, რომლებსაც IEEE 802.11ax-ში ეწოდება RU-ები, და სხვადასხვა RU-ს ანიჭებს სხვადასხვა მომხმარებელს მრავალჯერადი წვდომისათვის. EHT განავრცობს IEEE 802.11ax-ის OFDMA-ს ერთი AP-დან მრავალ AP-ზე, რაც განაპირობებს სიხშირული რესურსების ეფექტიან გამოყენებას ქსელში. სრულად კოორდინირებული OFDMA-სთვის (იხილეთ ნახ. 2.14 (ა)), AP-ები კოორდინაციას უწევენ ყველა STA-სთვის OFDMA-ს რესურსების გაზიარებას და სხვადასხვა STA-ს აძლევენ საშუალებას, მიიღონ ორთოგონალური დროითი და სიხშირული რესურსები, რითაც თავიდან აიცილებენ RU-ებს შორის კონფლიქტებს. ამან შეიძლება უზრუნველყოს რესურსების ეფექტიანი განაწილება, რადგან AP-ები შემოფარგლულია მხოლოდ

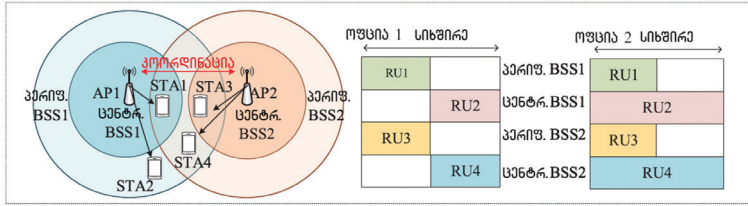
მათთვის დანიშნული რესურსით. სიხშირული სპექტრის გამოყენების შემდგომი გაუმჯობესების მიზნით, თითოეულმა AP-მ უნდა მოახდინოს RU-ების კოორდინაცია მხოლოდ ინტერფერენციებით შეზღუდული STA-ებისთვის, ანუ ნაწილობრივ კოორდინირებული OFDMA-თვის. მაგალითად, ინტერფერენციებით შეზღუდულ STA-ებს შეუძლიათ გადასცენ/მიიღონ ყველა RU-ებში, ხოლო ინტერფერენციებით შეზღუდულ STA-ებს შეუძლიათ გადასცენ კოორდინირებულ RU-ებში. C-OFDMA-ს ერთი პრობლემა არის ის, თუ როგორ უნდა გამოყოს შესაბამისი RU-ები/არხები მიმღებ STA-ებში. ლიტერატურაში განხილულია რესურსების განაწილების ორი ძირითადი სქემა, რომლებიც დაფუძნებულია სიხშირის განმეორებით გამოყენებაზე (სტატიკური) და ფიჭაზე დაფუძნებულ კოორდინაციაზე (დინამიკური). წინასწარ განაწილებული სტატიკური სიხშირული რესურსები ზოგადად გამოსაყენებლად მარტივია, მაგრამ ადვილი არ არის რესურსების განაწილების შეცვლა მომიჯნავე AP-ებს შორის ქსელის დინამიკური მახასიათებლების შესაბამისად. დინამიკურად განაწილებულმა რესურსებმა შეიძლება შეავსოს სტატიკური რესურსების ხარვეზები, მაგრამ ეს მოითხოვს AP-ებისგან, რომ დროულად იცოდნენ, თუ რომელი არხები/RU-ებია ხელმისაწვდომი.

ბ) CSR: სივრცის განმეორებითი გამოყენების მიზანია სისტემური დონის მახასიათებლების გაუმჯობესება, გარემოს რესურსების გამოყენება და ენერჯის დაზოგვა მჭიდრო განლაგების პირობებში ინტერფერენციების მართვის საშუალებით. არსებული სივრცის განმეორებით გამოყენების მექანიზმში, რომელიც არ არის კოორდინირებული, ერთ AP-ს შეუძლია გადასცეს მონაცემები გადაცემის მაქსიმალური სიმძლავრით, ხოლო დანარჩენმა AP-ებმა უნდა გადასცეს მონაცემები გადაცემის სიმძლავრით, რომელიც გათვლილია OBSS პაკეტის დეტექტირების განტოლებით, რის შედეგადაც ზოგიერთი STA მიიღებს ძალიან დაბალ SINR-ს, როდესაც ზოგიერთი AP შეამცირებს გადაცემის სიმძლავრეს, და დაიწყებს OBSS სიგნალების დეტექტირებას. გარდა ამისა, როდესაც მრავალი AP ერთდროულად გადასცემს მონაცემებს მაქსიმალური გადაცემის სიმძლავრით, AP-ებს შორის კოორდინაციის გარეშე გადაცემის სიმძლავრის მართვა შეიძლება არაეფექტიანი გახდეს ინტერფერენციების შესამცირებლად. IEEE 802.11ax-ში განხილული სივრცის განმეორებითი გამოყენების მეთოდების გასაუმჯობესებლად, EHT იძლევა რეკომენდაციას, კოორდინირებულად იმართოს AP-ებს შორის გადაცემის სიმძლავრე, მაგალითად პერიოდულად გაკონტროლდეს სიმძლავრე, რომელიც არ არის გამოვლენილი სხვა AP-ებზე, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 2.14

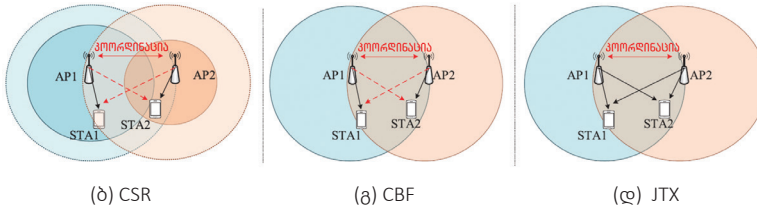
(ბ)-ზე ან იმართოს სიმძლავრე ყველა გადაცემის დროს გამტარუნარიანობის გაზრდისთვის. სისტემის ოვერჰედზე ფრეიმების გაცვლის გავლენის გაუთვალისწინებლად გადაცემის ყველა პროცესში სიმძლავრის მართვა იქნება საუკეთესო გზა სივრცის განმეორებით გამოყენებისას გამტარუნარიანობის გაუმჯობესებისთვის. კომპიუტერული სიმულაციის შედეგებმა აჩვენა, რომ CSR-ს შეუძლია მიაღწიოს გამტარუნარიანობის უფრო მაღალ მოგებას IEEE 802.11ax-თვის შემუშავებული სივრცის განმეორებით გამოყენების მეთოდთან შედარებით. სიმულაციური პარამეტრების თანახმად, კოორდინირებული SR-ის საშუალებით, 30%-ზე მეტი გამტარუნარიანობის მიღება შეიძლება UL-ში, ხოლო 20%-ზე მეტი გამტარუნარიანობის მიღება შეიძლება DL-ში. გარდა ამისა, CSR შეიძლება გაერთიანდეს კოორდინირებულ OFDMA-სთან. როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 2.14 (ა)-ზე, თითოეული AP კოორდინაციას უწევს RU-ებს მხოლოდ ინტერფერენციების თვალსაზრისით შეზღუდული პერიფერიული STA-ებისთვის, ხოლო ცენტრალური STA-ებს, რომლებიც დამორებულია ხელშემშლის შემქმნელი AP-დან, შეუძლიათ, სიგნალები გაგზავნონ/მიიღონ ყველა RU-ში ინტერფერენციების გარეშე.

(გ) CBF: MIMO სისტემებში სხივების ფორმირება არის უსადენო ტექნოლოგია, რომლის საშუალებითაც AP-ს, ინტერფერენციების ჩახშობის მიზნით, შეუძლია განათავსოს სივრცითი ნულოვანი გამოსხივება არამოსახურებადი STA-დან ან STA-სკენ. დღეისათვის სხივების ფორმირება ხორციელდება მხოლოდ ცალკეული AP-თი დამოუკიდებლად WLAN-ისგან, რასაც მივყავართ AP-ებს შორის არაკონტროლირებად ინტერფერენციებამდე. სივრცის განმეორებით უკეთ გამოყენებისთვის და ფიჭებს შორის ხელშემშლის შესამსუბუქებლად, EHT რეკომენდაციას უწევს CBF-ს განსაზღვრულ STA-ებზე თითოეული გადასაცემი სიგნალისთვის და, ასევე, სიგნალის განულებას არამოსახურებად STA-ებზე, რითაც მიიღწევა მრავალი ერთდროული გადაცემა. მრავალრიცხოვან BSS-ებში სივრცითი გამოსხივების განულების განსახორციელებლად შეიძლება გამოყენებულ იქნეს სხვადასხვა მეთოდი. კომპიუტერული სიმულაციის შედეგებმა აჩვენა, რომ CBF-ს შეუძლია დიდი მოგების მიღწევა ჯამური გამტარუნარიანობის თვალსაზრისით ერთეულოვან AP-სა და CSR-თან მიმართებაში. მეტიც, CBF შეიძლება შეერწყას კოორდინირებულ OFDMA-ის ინტერფერენციების უფრო ეფექტიანი მართვის მიზნით. მაგალითად, თუ STA 1, STA 2 და STA 3 შორის არიან საკუთარი AP-ებისგან, STA 1-ს და STA 3-ს შეუძლიათ იმავე RU-ს/არხის გაზიარება CBF-ის დანერგვით, ხოლო





(ა) C-OFDM



(ბ) CSR

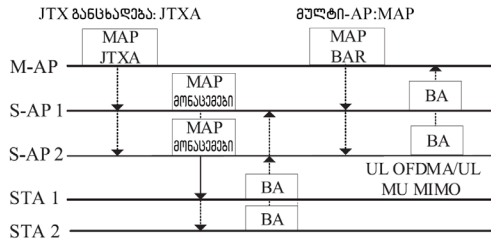
(გ) CBF

(დ) JTX

**ნახ. 2.14.** მულტი-AP გადაცემის სქემების მაგალითი: (ა) C-OFDM-ში თითოეული AP კოორდინაციას უწევს RU-ებს ყველა STA-სთვის ან მხოლოდ ინტერფერენციებით შეზღუდული (პერიფერიული) STA-ებისთვის; (ბ) CSR-ში AP-ებმა უნდა იცოდნენ მიმღები STA-ები, რომ განსაზღვრონ სხვის მაფორმირებული ვექტორი და გადაცემის სიმძლავრე; (გ) CBF-ში სასურველ STA-ზე გადაცემის პროცესში თითოეული AP ანულებს სივრცის დომენს და ზღუდავს მის მიერ STA-ებზე გამოწვეულ ინტერფერენციებს სხვა BSS-ებში; (დ) JTX-ში STA-ები შეიძლება ერთდროულად იყოს მომსახურებული მრავალი განაწილებული AP-სგან ყველა მონაწილე STA-ს მონაცემების გამოყენებით

STA 1-ს და STA 2-ს შეუძლიათ გამოიყენონ სხვადასხვა RU/არხი კოორდინირებული OFDMA-ს რეალიზაციით.

(დ) JTX: როგორც ნაჩვენებია ნახ. 2.14 (დ)-ზე, JTX შეიძლება ჩაითვალოს ვირტუალურ MIMO სისტემად, რომელიც შედგება მრავალი AP-ისა და მრავალი STA-ისგან. ეს ტექნოლოგია ასევე იძლევა ოპტიმალურ AP-სთან სწრაფად დაკავშირების შესაძლებლობას და აუმჯობესებს ხელახლა დაკავშირების სიჩქარეს, როდესაც მომხმარებლები გადაადგილდებიან (მაგალითად, ოფისებში, ცხელ წერტილებში, სახლის პირობებში). JTX მიზნად ისახავს ერთობლივი გადაცემის/მიღების უზრუნველყოფას არაკოლოკაციურ, დროის/ფაზის მიხედვით სინქრონიზებულ AP-ებს და დროის/ფაზის მიხედვით სინქრონიზებულ STA-ებს შორის. ნახ. 2.15-ზე, M-AP აგზავნის JTX განცხადების (JTXA) ფრეიმს, რომელიც შეიცავს დაგეგმვისა და სხვა მმართველ ინფორმაციას, ერთობლივი გადაცემის პროცესის დაწყებისათვის S-AP-ებზე, შემდეგ კი ყველა S-AP აგზავნის მონაცემებს ერთდროულად STA-ებზე. თითოეული STA გადასცემს Ack/BA



**ნახ. 2.15.** DL JTX პროცედურის მაგალითი. M-AP-დან JTXA ფრეიმის მიღების შემდეგ S-AP-ებმა იციან, თუ რომელი მონაცემთა ფრეიმები უნდა გადასცენ, გადაცემის რა პარამეტრები გამოიყენონ და ამის შემდეგ S-AP-ები მონაცემებს გადასცემენ STA-ებს. ახლად შემუშავებული BA/Ack გადაცემის სქემების შესაბამისად, მონაცემთა მიღების შემდეგ, თითოეული STA გადასცემს Ack/BA ფრეიმს მასთან ასოცირებულ S-AP-ზე ან M-AP-ზე, BA მოთხოვნის (BAR) ფრეიმის მიღების შემდეგ

ფრეიმს (მონაცემების მიღების შემდეგ) საკუთარ ასოცირებულ S-AP-ს ან M-AP-ს, BA მოთხოვნის (BAR) ფრეიმის მიღების შემდეგ. UL JTX უზრუნველყოფს უფრო მეტ საიმედოობას სხვადასხვა პრაქტიკული სქემისთვის და სხვადასხვა მიდგომა განიხილება EHT სამუშაო ჯგუფში, მათ შორის, ხელშეშლების განაწილებული ჩახშობა, რომელიც აუმჯობესებს UL მონაცემთა მიწოდებას და ერთობლივი მიღება, რომელიც მოითხოვს, რომ ყველა AP-მ ერთობლივად დაამუშაოს ყველა STA-დან მიღებული მონაცემები. DL JTX-სთვის მრავალი STA-დან ერთდროული გადაცემისთვის განკუთვნილი ერთი დიდი წინასწარი კოდირების მოწყობილობა შეიძლება გამოყენებულ იქნეს კომბინირებულ საანტენო მესერზე, რომელიც შედგება ყველა განაწილებული AP-ს გადამცემი ანტენებისგან. ჩვეულებრივი AP-სთვის, მის ერთობლივად გამოყენებულ ანტენებს აქვთ საერთო ხედვა არხის სტატუსის შესახებ (თავისუფალი/დაკავებული), რომელიც ეყრდნობა CSMA/CA-ს. JTX-სთვის AP-ებს შორის ფიზიკური განცალკევება იწვევს არხის სტატუსის განსხვავებულ ხედვას. ამ მიზეზის გამო, შეიმუშავეს ახალი ცენტრალიზებული CSMA/CA მექანიზმი, რომლის მიხედვითაც თითოეული AP ანგარიშს აწვდის PU-ს CCA სტატუსის შესახებ, რომელიც არხს თავისუფლად მიიჩნევს, შემდეგ კი მას მიჰყვება JTX. როდესაც მრავალი AP განაგრძობს არხების დაკავებას JTX-სთვის, ტრადიციულ AP-ებს არ შეუძლიათ არხის რესურსების გამოყენება, რადგან არხები დაკავებულად აღიქმება. ამიტომ საჭიროა კომპრომისის მიღწევა ეფექტიანი ფუნქციონირების თვალსაზრისით ცენტრალიზებულ CSMA/CA-ს და ტრადიციულ CSMA/CA-ს შორის. გარდა ამისა, აღსა-

ნიშნავია არქიტექტურასთან დაკავშირებული ახალი მიმართულებებიც, მაგალითად, MAC/PHY განცალკევება და სხვა.

## 2.6 ლინკის გაუმჯობესებული ადაპტაცია და განმეორებითი გადაცემა

HARQ არის კიდევ ერთი განხილვადი კანდიდატი ფუნქცია EHT-ის დისკუსიების დროს, რომელიც მუშაობის მახასიათებლების გასაუმჯობესებლად (როგორებიცაა, მაგალითად, საიმედოობის გაზრდა, შეყოვნების შემცირება) აერთიანებს განმეორებით გადაცემებს დეკოდირებამდე. ამ პარაგრაფში ჩვენ განვიხილავთ HARQ-სთან დაკავშირებული რამდენიმე საკითხს, რომლებიც მოიცავს HARQ გრანულირებას, HARQ პროცესს და HARQ მეთოდებს.

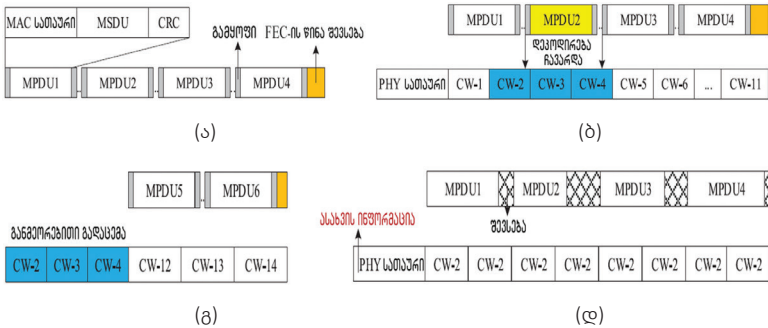
### 2.6.1 HARQ გრანულირება

გრანულირება დაკავშირებულია შეცდომების გასწორებასთან განმეორებითი გადაცემის გამოყენების პროცესში. ამჟამინდელ IEEE 802.11 სისტემებში, ARQ გრანულირების მხარდაჭერა შესაძლებელია მხოლოდ MAC დონეზე, მაგრამ არა PHY დონეზე. თეორიულად, როგორც ნაჩვენებია ნახ. 2.16-ზე, HARQ გრანულირების მხარდაჭერა შესაძლებელია A-MPDU-ის დონეზე, MPDU-ის დონეზე და კოდური სიტყვის (CW) დონეზე (განსხვავებით პირველი თავისაგან, CW მეორე თავში აღნიშნავს კოდურ სიტყვას). HARQ განმეორებითი გადაცემის სხვადასხვა დონისთვის განვიხილავთ, რა შესაძლო ცვლილებების შეტანა იქნება საჭირო PHY და MAC ფენებში.

1) HARQ A-MPDU-ს დონეზე: როდესაც მთელი A-MPDU განმეორებითაა გადასაცემი (იხ. ნახ. 2.16 (ა)), განმეორებით გადაცემული A-MPDU ჩვეულებრივ შეიცავს ცვლილებებს თავდაპირველად გადაცემულთან შედარებით, MPDU-ებს შორის გამყოფების ნებისმიერი რაოდენობის, თითოეული MPDU-ს სათაურის გამეორების ბიტის, სხვადასხვა დამიფრული ტექსტის და სხვადასხვა CRC ბიტების გამო. MAC-ის სასარგებლო დატვირთვაში, ამ რამდენიმე განსხვავებული მცირე რაოდენობის ბიტების გამო, რასაც მიყვავართ PHY-ში სხვადასხვა სასარგებლო დატვირთვამდე, დამაჯერებლობის ლოგარითმული ფარდობების (LLRs) გაერთიანება PHY-ში შეუძლებელია. გარდა ამისა, PHY-ში არ არსებობს MPDU-ების შესახებ ცოდნა და ეს სასარგებლო დატვირთვა გარდაიქმნება განმეორებით გადაცემულ CW-ებად, რომლებიც გარკვეულწილად განსხვავდება CW-ებისაგან, რომლებიც შეესაბამება თავდაპირველ გადაცემას. ამრიგად, MAC-ში შეიძლება საჭირო გახდეს ცვლილებები,

რათა უზრუნველყოფილ იქნეს იმავე A-MPDU-ს განმეორებით გადაცემა, რაც იყო საწყის გადაცემაში.

2) HARQ MPDU-ს დონეზე: ნახ. 2.16 (ბ)-ზე ჩანს, რომ ჩავარდნილმა MPDU-მ შეიძლება მოიცვას ორი ნაწილობრივი CW და ერთი სრული CW.



**ნახ. 2.16.** HARQ გრანულირების ილუსტრაცია: (ა) HARQ A-MPDU-ს დონეზე; (ბ) HARQ MPDU-ს დონეზე; (გ) HARQ CW-ს დონეზე; (დ) შევსება MPDU-ს და CW-ს საზღვრების გათანაბრებისთვის

ჩავარდნილ MPDU-ს ექნება სხვადასხვა ბიტები განმეორებითი გადაცემის დროს: MPDU-ს სათაურის განმეორების ბიტი, დაშიფრული ტექსტისა და CRC ბიტები. ამრიგად, CW-ებს, რომლებიც შეესაბამება ჩავარდნილ MPDU-ს, აქვთ განსხვავებული კოდირებული ბიტები და მათი გაერთიანება LLR დონეზე შეუძლებელია. გარდა ამისა, ეს ჩავარდნილი MPDU აისახება სხვადასხვა CW-ზე და თითოეულ CW-ს ექნება განსხვავებული შეცდომების პირდაპირი გამასწორებელი (FEC) კოდირების შევსება. ჩავარდნილი და განმეორებით გადაცემული MPDU-ების CW-ებში ერთმანეთის მიმართ არასწორი განლაგება გამოიწვევს CW-ების არასწორ კომბინირებას PHY-ში.

3) HARQ CW-ს დონეზე: ამჟამინდელ IEEE 802.11 სტანდარტებში, არ არსებობს PHY დონეზე განმეორებითი გადაცემის მხარდაჭერა. ნახ. 2.16 (გ)-ზე, HARQ მოითხოვს, რომ PHY ცნობდეს შეცდომების შემცველ CW-ებს, და, შესაბამისად, მას შეეძლოს განმეორებით გადაცემული CW-ების შერწყმა. ამიტომ, PHY-ში ჩართული იქნება უფრო მეტი სიგნალი, რათა წარმოადგინოს ასახვა CW-ებსა და MPDU-ებს შორის და დააკავშიროს ჩავარდნილი CW-ები MPDU-ებთან. გარდა ამისა, MAC ქვეფენამ უნდა აცნობოს PHY-ს, CRC-ით MPDU-ების სტატუსის შემოწმების შესახებ. თითოეულ CW-ს შეიძლება დასჭირდეს დამატებითი CRC ინფორმაცია ცრუ დე-

ტექტირების თავიდან ასაცილებლად. ეს შეიძლება იყოს, მაგალითად, კოდირებული ბიტები, რომლებიც ბოლოს დაემატება თითოეულ CW-ს.

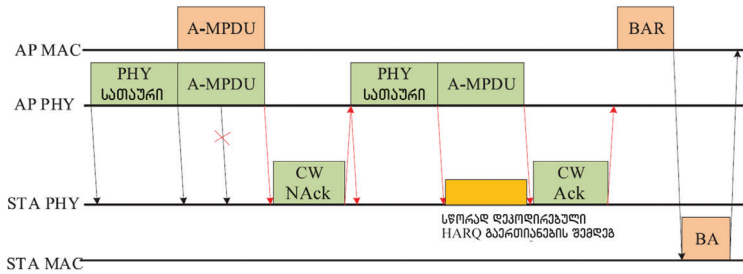
CW-ების არასწორი განლაგება განმეორებით გადაცემულ A-MPDU-ში ან MPDU-ში მნიშვნელოვანი საკითხია, რომელიც დიდ გამოწვევებს უქმნის კომბინირების და დეკოდირების ოპერაციებს. MPDU-ს და CW-ების საზღვრის გათანაბრების მიზნით, დეკოდირის გამოსასვლელი ბიტების ნაკადი შეიძლება გადაეცეს MAC-ს, ტექსტის სინტაქსური ანალიზის, გამყოფების იდენტიფიკაციისა და CRC-ების გადამოწმების მიზნით. ამ გზით ის საშუალებას აძლევს MAC ქვეფენას, განსაზღვროს, თუ რომელი MPDU-ები მიიღება სწორად. ამავე დროს, PHY-ს შეუძლია განსაზღვროს იმ CW-ების ადგილმდებარეობა, რომლებიც არ არის სწორად დეკოდირებული. როგორც ნაჩვენებია ნახ. 2.16 (დ)-ზე, ლიტერატურაში განხილული MAC შევსება ასევე შეიძლება გამოყენებულ იქნეს MPDU-ის და CW-ის საზღვრის გათანაბრების მიზნით, LDPC კოდირების და BA-ის არსებული კონსტრუქციების შენარჩუნებით. ამ მეთოდით, MPDU-ისა და CW-ის შორის ასახვის შესახებ საჭირო ინფორმაციის საფუძველზე, მიმღებს უნდა მიეწოდოს მინიმალური ინფორმაცია, რომელიც საჭიროა CW-ების გაერთიანებისთვის. მეორე მხრივ, შევსებამ შეიძლება გამოიწვიოს ოვერჰედის გაზრდა.

### **2.6.2 HARQ პროცესი**

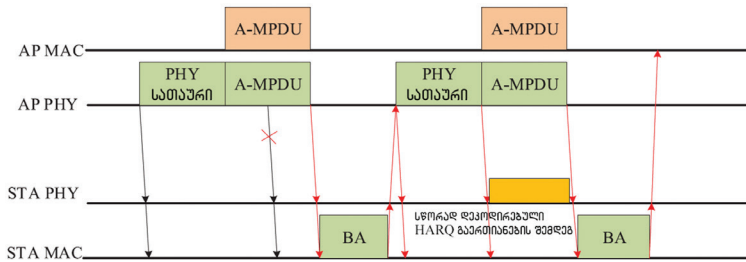
HARQ-თი მხარდაჭერილი STA, რომელიც ცდილობს განმეორებით გადაცემულ PPDU-ის დეკოდირებას, არ უგულებელყოფს წინა წარუმატებელ PPDU-ს, და ამის ნაცვლად აერთიანებს მათ ბიტებს LLR-ების მეშვეობით, რათა გაიზარდოს სწორად დეკოდირების ალბათობა. HARQ რეალიზდება PPDU-ს მონაცემთა ნაწილზე და მას სჭირდება PPDU-ს პარამეტრების ცოდნა იმ PPDU-ის დასადგენად, რომელიც უნდა იქნეს გაერთიანებული. პარამეტრების გადატანა შეიძლება PHY სათაურით, PHY/MAC ფენის ახალი SIG ველით ან ახალი MAC ფრეიმით, რომლებიც ჩვეულებრივ კოდირდება განცალკევებულად გადაცემის სხვადასხვა პარამეტრის (მაგალითად, MCS, კოდირების სიჩქარე) შემცველი მონაცემებისგან და რომელთაც აქვთ დეკოდირების უკეთესი მახასიათებლები. განმეორებითი გადაცემის გრანულირების სხვადასხვა ხარისხის მიხედვით PHY დონის HARQ პროცესი, რომელიც დაფუძნებულია CW-ებზე და MAC დონის HARQ პროცესი დაფუძნებული MPDU-ზე, წარმოდგენილია ნახ. 2.17-ზე.

შეცდომების შემოწმება ხორციელდება კოდური სიტყვების საფუძველზე PHY დონის პროცესში ლუწობის შემოწმების საშუალებით და ხორციელდება CRC შემოწმებით MPDU-ის საფუძველზე MAC დონის პროცესში. HARQ პროცესის დასაწყებად აუცილებელია, რომ HARQ უკუკავშირის მეთოდი მიუთითებდეს მიღების შემოწმების სტატუსს და იმას, თუ რომელი CW/MPDU-ები უნდა გადაიყვანოს განმეორებით. მაგალითად, განიხილება არსებული BA ფრეიმის გამოყენება MAC დონეზე HARQ უკუკავშირისთვის და PHY დონის ახალი უკუკავშირის ფრეიმის შემუშავება, რომელშიც შედის რიგითი ნომერი თითოეული CW-ს თვალყურის სადევნებლად. გარდა ამისა, ინფორმაცია MAC(MPDU)-დან და PHY(CW)-დან ახლა შეიძლება გაერთიანდეს ერთ BA ფრეიმში, რომელიც დადასტურებს MPDU-ების მიღებას და მოითხოვს CW-ების განმეორებით გადაცემას. ასეთი ორმაგი უკუკავშირი, რომელიც გამოყენებული იქნება CW-ს დონეზე, შეიძლება იყოს უფრო ეფექტიანი, ვიდრე ახალი HARQ უკუკავშირის ფრეიმის შექმნა.

HARQ უკუკავშირის საფუძველზე, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 2.17 (ა)-ზე, STA ახდენს HARQ ოპერაციის ინიცირებას PHY-ზე თითოეული გადაცემისთვის, სანამ ის არ იქნება წარმატებული, ან არ მიაღწევს HARQ-სთვის განმეორებითი გადაცემის დასაშვებ მაქსიმალურ მნიშვნელობას. STA-ს შეუძლია გამოიყენოს ლუწობის შემოწმება იმის დასადგენად, საჭიროა თუ არა მისთვის ამ CW-ის შენახვა, შემდეგ კი ის AP-ს უკუკავშირით უგზავნის ინფორმაციას ჩავარდნილი CW-ების შესახებ. AP-მ უნდა შეინახოს ორიგინალი CW-ები PHY დონეზე და განმეორებით გადასცეს მხოლოდ ის CW-ები, რომლებიც მოთხოვნილია HARQ უკუკავშირით. STA იღებს ამ განმეორებით გადაცემულ CW-ებს, აერთიანებს მათ წინა შენახულ CW-ებთან და სწორად დეკოდირებულ ბიტების ნაკადს უგზავნის MAC ქვეფენას. MAC ქვეფენა ასრულებს CRC შემოწმებას და წყვეტს განმეორებით გადაცემას, აგზავნის რა MPDU-ს დონის უკუკავშირის სიგნალს AP-ზე. HARQ სესია უნდა დასრულდეს, სანამ გარემოში დაიწყება ახალი გადაცემა. ვინაიდან PHY-ებს შორის შეიძლება განხორციელდეს განმეორებითი გადაცემები, MAC ქვეფენას შეიძლება დიდხანს მოუწიოს ლოდინი, სანამ მათი ARQ პროცედურები არ იქნება მხარდაჭერილი HARQ-სთვის. ამრიგად, შესაძლებელია განისაზღვროს განმეორებითი გადაცემების მაქსიმალური ფიქსირებული რაოდენობა ან განისაზღვროს MAC-სთვის დროითი ლიმიტი. ნახ. 2.17 (ბ)-ზე MPDU და CW შეიძლება გათანაბრდნენ დამატებითი MAC შევსების გამოყენებით, ასე რომ, განმეორებით გადაცემის პროცედურა შედარებით მარტივი იქნება.



(ა) HARQ პროცესი CW-ის დონეზე



(ბ) HARQ პროცესი MPDU-ის დონეზე

**ნახ. 2.17.** HARQ პროცესის მაგალითი. (ა) HARQ პროცესისთვის CW-ის დონეზე განისაზღვრება, არის თუ არა მთელი A-MPDU წარმატებით გადაცემული PHY ფენაში. განმეორებით გადაცემული A-MPDU-ის შეცდომებზე შემოწმება ხორციელდება CW-ის ან CW-ების საფუძველზე და უნდა განისაზღვროს უკუკავშირის ახალი მექანიზმი და HARQ უკუკავშირის ახალი ფრეიმი (მაგალითად, CW-ს მიმართ ნეგატიური (Negative) Ack (Nack) ან Ack); (ბ) MPDU-ის დონეზე HARQ პროცესისთვის, როდესაც მთელი A-MPDU განმეორებით უნდა გადაიცეს, MAC ქვეფენა ამზადებს A-MPDU-ის განმეორებითი გადაცემისთვის. შეცდომების შემოწმება ხორციელდება MPDU-ის საფუძველზე და არსებული BA პროტოკოლი შეიძლება გამოყენებულ იქნეს, როგორც HARQ უკუკავშირი

ამასთან, ამან შეიძლება გამოიწვიოს დამატებითი ოვერჰედი. დამატებითი შევსების გარეშე, MPDU-ისა და CW-ის შორის ასახვის ინფორმაციამაც შეიძლება გამოიწვიოს დამატებითი ოვერჰედი. გარდა ამისა, უნდა აღინიშნოს, რომ MAC დონის განმეორებითი გადაცემა უფრო თავსებადია არსებულ ARQ-სთან, ვიდრე PHY დონის განმეორებითი გადაცემა.

### 2.6.3 HARQ მეთოდები

ზოგადად, არსებობს HARQ განმეორებით გადაცემის სამი მეთოდი: ჩეიზის კომბინირება (CC), რომელიც იმეორებს ერთსა და იმავე კოდირებულ

MPDU-ს, პერფორირებული CC (PCC), რომელიც ახდენს მოდიფიცირებას CC-ს შემდეგ და ზრდადი სიქარბე (IR), რომელიც განმეორებით გადაცემაში იყენებს დამატებით ლუწობის შემოწმებულ ბიტებს. CC-ის შემთხვევაში, ვინაიდან განმეორებითი გადაცემა აგზავნის CW-ის იმავე კოდურ ბიტებს, რომლებიც შეესაბამება MPDU-ის საწყის გადაცემას, ადვილია განმეორებით გადაცემული ბიტების გაერთიანება წინა შენახულ ბიტებთან. CC მოითხოვს ინტერლივინგის მოწყობილობას ან LDPC კოდის ტონის ამსახველს, რომელიც ცვალებადია სხვადასხვა გადაცემაში, სიხშირული განცალკევების მოგების მისაღწევად, ხოლო PCC-ს და IR-ს არა აქვთ ასეთი წაყენებული მოთხოვნები. PCC-ის გამოყენებისას LDPC კოდის ყველა ბიტი გადაიცემა თავდაპირველ გადაცემაში, ხოლო პერფორირებული კოდური ბიტები ხელახლა გადაიცემა HARQ განმეორებითი გადაცემის დროს. PCC-ს მსგავსად, IR მხარს უჭერს CW-ის კოდური ბიტების პერფორაციას HARQ განმეორებითი გადაცემის დროს. საწყის გადაცემებში გადაიცემა ყველა ინფორმაციული ბიტი და ლუწობის შემოწმებული ბიტების ქვეჯგუფი, ხოლო ბიტები, რომლებიც იყო პერფორირებული და არ იყო გადაცემული თავდაპირველად, მონაწილეობენ განმეორებითი გადაცემის პროცესში. CC-სგან განსხვავებით IR-ის, კოდირების მეთოდის გამო, რამდენიმე სხვა პრობლემაც აქვს. IR-ისთვის, თითოეული განმეორებითი გადაცემისას პერფორირების სხვადასხვა ნიმუშის გამოყენება შეიძლება განვიხილოთ, როგორც ლუწობის შემოწმებული ახალი ბიტების შექმნა, რომლებიც შეიძლება მხოლოდ მისადაგებული იყოს RU-ის ზომაზე (ნაკლებია ან ტოლი 242 ტონზე). ამრიგად, მოგება ვერ მიიღწევა RU-ის უფრო დიდი ზომისთვის. LDPC კოდირების სქემისთვის IR-ს შეუძლია მხარი დაუჭიროს LDPC კოდის დღეისთვის გამოყენებულ სიჩქარეებს (1/2, 2/3, 3/4, 5/6) და CW-ს სიგრძეს (1944 ბიტი), რასაც ვხვდებით IEEE 802.11 სტანდარტებში. HARQ-ს სხვადასხვა მეთოდს აქვს განსხვავებული რეალიზაციის სირთულეები და უპირატესობები. HARQ-ის ზუსტი მეთოდების არჩევა სხვადასხვა გარემოში რთული ამოცანაა. HARQ-დან მიღებული მოგება დამოკიდებულია ლინკის ადაპტაციის მეთოდზე, რომელიც ცდილობს შეცვალოს გადაცემის სიჩქარე რეალური დროში არხის მდგომარეობის საფუძველზე, იმისათვის, რომ გაუმჯობესდეს გადაცემის მახასიათებლები საწყისი გადაცემის წინ. არსებობს სიჩქარის შერჩევის/ ადაპტაციის სამი ტიპი: ფიქსირებული MCS საწყის გადაცემასა და განმეორებით გადაცემაში, გრძელვადიან SNR-ზე დაფუძნებული ცვლადი MCS და სიჩქარის ოპტიმალური ადაპტაცია HARQ უკუკავშირის საფუძველზე, რომელიც შეიძლება მოიცავდეს ინფორმაციას მოკლევადიანი SNR-ის



შესახებ. HARQ-ს (PCC და IR) სპექტრული ეფექტიანობის მოგება შეისწავლეს ამ სამი ტიპის სიჩქარის შერჩევის/ადაპტაციის პირობებში და სიმულაციის შედეგებმა აჩვენა, რომ ყველაზე ღიდი მოგება მიიღწევა უკუკავშირზე დაფუძნებული სიჩქარის ადაპტაციის შემთხვევაში და 25 დბ-ზე ნაკლები SNR-ის დროს. ამასთან, ოვერჰედით გამოწვეული დანაკარგები მნიშვნელოვანი ხდება HARQ PDU-ის მცირე ხანგრძლივობისთვის. ამრიგად, რეალურ სისტემებში HARQ-ს მნიშვნელოვანი მოგების მისაღწევად აუცილებელი იქნება ოვერჰედით გამოწვეული დანაკარგის შეზღუდვა. ლიტერატურაში შეფასებულია EHT-ს ეფექტიანობა HARQ-ის გამოყენებისას კონფლიქტებისგან თავისუფალ (ადიტიური თეთრი გაუსის ხმაურით დასუსტებულ) და კონფლიქტებით დომინირებულ (ინტერფერენციებით დასუსტებულ) გარემოში. კომპიუტერული სიმულაციის შედეგებმა აჩვენა მანასიათებლების გაუმჯობესება, მაგრამ ასევე აჩვენა, რომ საჭიროა სხვადასხვა სტრატეგიის შემუშავება კონფლიქტებით დომინირებულ გარემოში. თუ განვიხილავთ უფრო მეტ სხვადასხვა პირობას (მაგალითად, აპარატურის სირთულეს), HARQ-ის დანერგვის პროცესში საჭიროა შემდგომი კვლევების ჩატარება, მაგალითად მრავალი ლინკის, მრავალი მომხმარებლის ან მრავალი AP-ს შემცველი სქემებისთვის.

## 2.7 მომავალი განვითარება და კვლევითი შესაძლებლობები

ამ პარაგრაფში განხილულია რამდენიმე ღია ტექნიკური საკითხი, რომელთა შესწავლაც საჭიროდ მიგვაჩნია და, ასევე, რამდენიმე პერსპექტიული კვლევითი მიმართულება. მოსალოდნელია, რომ ამ თემების განხილვა ხელს შეუწყობს უსადენო საკომუნიკაციო ქსელების განვითარებას და რამდენიმე ტექნიკური გამოწვევის გადაჭრის პროცესს, რომელთა შორისაა 6 გჰც-ში თანაარსებობის პრობლემა, დაბალი და მაღალი სიხშირული დიაპაზონების ინტეგრირება, QoS-ის გარანტირებული უზრუნველყოფა, რომელიც დაფუძნებულია მანქანურ სწავლებაზე, ენერჯის მართვასა და სხივების ჰიბრიდულ ფორმირებაზე.

### 2.7.1 6 გჰც სიხშირულ დიაპაზონში თანაარსებობა

EHT-ს ერთ-ერთი მთავარი მიზანია 6 გჰც სიხშირულ დიაპაზონში 1.2 გჰც-მდე სპექტრის რესურსების სრულად გამოყენება. ამასთან, ამ სიხშირული რესურსების ეფექტიანად გამოყენებისთვის EHT-ს მოუწევს თანაარსებობა იმავე დიაპაზონში მოქმედ ისეთ სხვა განსხვავებულ ტექნოლოგიებთან, როგორცაა, მაგალითად, IEEE 802.11ax და 5G არა-

ლიცენზირებულ დიაპაზონში. უსადენო ქსელებს შორის თანაარსებობა რთული ამოცანაა, განსაკუთრებით როდესაც ეს ქსელები არაერთგვაროვანია. სპექტრზე წვდომის წესები განსხვავებულია სხვადასხვა ქსელში, რამაც შეიძლება ხელი შეუშალოს სპექტრის რესურსების სამართლიან განაწილებას.

უნდა გამოვყოთ, სულ მცირე, თანაარსებობის ორი ვარიანტი: პირველი მათგანის დროს ქსელები ნერგავენ თანაარსებობის მექანიზმებს დამოუკიდებლად, საკუთარ მეზობლებთან ყოველგვარი კონსულტაციის გარეშე და მეორე მათგანის დროს ქსელები პირდაპირ თუ არაპირდაპირ ახდენენ თავიანთ ქმედებათა კოორდინაციას მათი თანაარსებობის შესამსუბუქებლად. კოორდინირებული თანაარსებობის პირობებში კოორდინაცია შეიძლება მოითხოვდეს საერთო მართვის სიბრტყეს ისეთ ჰეტეროგენულ ტექნოლოგიებს შორის, როგორებიცაა, დრუბლის მართვა, SDN, ან პირდაპირი საკომუნიკაციო გვირაბი. არაკოორდინირებული თანაარსებობის პირობებში, არაკოორდინირებულ სქემებს შეიძლება დასჭირდეს უფრო დახვეწილი ტექნიკა თანაარსებობის სქემების განსახორციელებლად მეზობლების გათვალისწინებით და ქსელები ცდილობენ, სხვა ქსელებთან თანაარსებობის უზრუნველყოფას, ძირითადად მათი ადგილობრივ დაკვირვებათა საფუძველზე. ივარაუდება, რომ მანქანური სწავლება იქნება კრიტიკული ინსტრუმენტი თანაარსებობის მიზნების მისაღწევად, რომელიც უზრუნველყოფს აუცილებელ ინტელექტსა და ადაპტაციის მექანიზმებს, მაგალითად, მანქანური სწავლების გამოყენებით თანაარსებობის მისაღწევად ქსელის დინამიკის აღმოჩენის ან მიმდებარე ქსელების სპექტრის გამოყენების პროგნოზირების გზით. ახალი მანქანური სწავლების ალგორითმები გაზრდის სწავლების სიჩქარეს, ხოლო განაწილებული გამოთვლითი რესურსების გამოყენება პერიფერიაზე და დრუბელზე შეიძლება ძალიან სასარგებლო იყოს თანაარსებობის მისაღწევად კონკრეტული სიტუაციიდან გამომდინარე.

### **2.7.2 დაბალსიხშირული და მაღალსიხშირული დიაპაზონების ინტეგრირება**

6 გვც დიაპაზონში ფუნქციონირებადი მჭიდროდ განლაგებული WLAN ქსელები დამოუკიდებლად ვერ უზრუნველყოფენ მობილური სერვისების მიერ მოთხოვნილ უწყვეტ კავშირს და მობილური ინტერნეტის ტრაფიკის სწრაფ ზრდას მომავალ უსადენო ქსელებში. შედეგად, WLAN ქსელის შემუშავებისას ერთ-ერთი მთავარი მიღწევა ემყარება მრავალი სხვადასხვა ზოლის (მაგალითად, მიკროტალღოვანი და მილიმეტრულ-

ტალღოვანი) ინტეგრაციას. ინტეგრირებული სისტემა, რომელსაც შეუძლია მრავალი სიხშირის გამოყენება მიკროტალღების/მილიმეტრული ტალღების/ტპვ სპექტრის მასშტაბით, საჭიროა უწყვეტი და ინტელექტუალური კავშირის უზრუნველსაყოფად, როგორც გაფართოებულ, ასევე ლოკალურ დონეზე. არსებულ IEEE 802.11 სტანდარტებს უკვე შეუძლიათ ე.წ. „მოლაპარაკებათა მილის“ უზრუნველყოფა სხვადასხვა სიხშირულ დიაპაზონებს შორის FST და არხსმიდა გვირაბის საშუალებით მრავალსაფეხურიანი ოპერაციებისთვის (მაგალითად, სესიის სწრაფი გადაცემა). გარდა ამისა, უკვე არსებობს მრავალი პოტენციური გადაწყვეტილება მობილურობის მართვისა და ქსელური მონაცემების მიგრაციის მართვისთვის მიკროტალღების/მილიმეტრული ტალღების სპექტრის ინტეგრირების პროცესში. ამასთან, დაბალი და მაღალი სიხშირული დიაპაზონების ინტეგრირებული გამოყენება გამოიწვევს რამდენიმე ახალ პრობლემას ცალკეული აპარატურის კონსტრუირებიდან მთლიანი სისტემის დიზაინამდე. მაგალითად, ამ მრავალ სიხშირულ სპექტრში მაღალი მობილურობის მხარდაჭერა, ახალი მრავალჯერადი წვდომისა და ქსელის პარადიგმების განვითარება და ახალი გადამცემი არქიტექტურის შექმნა აუცილებელია მიკროტალღოვანი/მილიმეტრული ტალღების/ტპვ სიხშირეების გავრცელების ახალი მოდელების შემუშავებასთან ერთად. კვლევის კიდევ ერთი მნიშვნელოვანი მიმართულებაა ამ მრავალი სპექტრის მასშტაბით კოლაბორაციული ოპერაციების შესწავლა.

### **2.7.3 მანქანურ სწავლებაზე დაფუძნებული QoS-ის გარანტირებული უზრუნველყოფა**

როგორ ამოვიცნოთ ინტელექტუალურად და სათანადოდ მრავალფეროვანი QoS მოთხოვნები და ეფექტიანად გამოვიყენოთ უსადენო რესურსები სხვადასხვა QoS მოთხოვნების მქონე მომხმარებლებისთვის, ეს არის აქტუალური თემა სტანდარტიზაციის პროცესში. არსებულ QoS-ით მხარდაჭერილ WLAN-ში, EDCA არეგულირებს ბექოფის პარამეტრებს MAC ქვეფენის დონეზე პრიორიტეტულ არხზე წვდომის განსახორციელებლად, რასაც შეუძლია უზრუნველყოს გარკვეული ხარისხით გარანტირებული QoS ტრაფიკის სხვადასხვა ტიპისთვის, რომელთაც აქვთ სხვადასხვა QoS მოთხოვნები. ქსელის ახალი და მრავალფეროვანი სერვისების გამოჩენამ (მაგალითად, თამაშები, VR/AR და 4k/8k ვიდეო) შექმნა ახალი გამოწვევები სხვადასხვა ტიპის მომხმარებლის მრავალფეროვან მოთხოვნებში, როგორცაა გამტარუნარიანობა, შეყოვნება, ჯიტერი და დანაკარგების რაოდენობა. ეს ხშირად მოითხოვს ქსელისაგან, სწრაფად

მოახდინოს რეაგირება სამომხმარებლო გამოცდილებაზე, გამოყოს უსადენო რესურსები სხვადასხვა QoS მოთხოვნების მქონე მომხმარებლებისთვის და შესთავაზოს მათ უკეთესი QoS. ამასთან, ამჟამინდელი EDCA კარგია სტატისტიკური თვალსაზრისით, მაგრამ შეიძლება მან ვერ გასწიოს დახმარება ყველაზე ცუდი შეყოვნების და ჯიტირის გაუმჯობესებაში ისეთი შეზღუდვების გამო, როგორცაა მაგალითად, ტრაფიკის სხვადასხვა ტიპის გარჩევა მხოლოდ QoS სფეროების მიხედვით და ის პირდაპირ არ ასახავს შეყოვნების მოთხოვნებს ლატენცურად მგრძობიარე პროგრამებისთვის. გარდა ამისა, შემოკლებული ტრიგერის ფრემების გამოყენებისას ტრიგერზე დაფუძნებული PDDU გადაცემის მისაღებად ტრაფიკის დროის რეალურ მასშტაბში გადატანისთვის, რიგებთან დაკავშირებულმა ახალმა დიზაინმა შეიძლება გაუმჯობესოს ყველაზე ცუდი შემთხვევის შეყოვნება (ა) წვდომის შეყოვნების პირდაპირი მიხედვით იმ შეყოვნებაზე, რომელიც მოთხოვნილია შეყოვნების მიმართ კრიტიკული ტრაფიკისთვის, (ბ) ტრაფიკის კატეგორიზაციით მეტი პარამეტრის გათვალისწინებით, (გ) არხზე წვდომის უფრო მაღალი პრიორიტეტით და ა.შ. გარდა ამისა, მანქანურ სწავლებასთან დაკავშირებული მეთოდები სიტუაციურ ცოდნასთან ერთად შეიძლება ეფექტიანი საშუალებები იყოს მომხმარებლების QoS მოთხოვნების დაკმაყოფილების თვალსაზრისით, თუ გამოყენებული იქნება მთელი რიგი დაკვირვებები, რომლებიც ასახავს ქსელის მდგომარეობას და მომხმარებლის აღქმას. მაგალითად, მრავალ ლინკზე მომუშავე მოწყობილობას შეუძლია გამოიყენოს მანქანური სწავლების ალგორითმები, იმისთვის რომ წინასწარ განსაზღვროს ლინკის სტატუსი (დატვირთული/თავისუფალი) ლინკის შესახებ ისტორიული ინფორმაციის ნაკრების შესაბამისად (მაგალითად, ლინკის სტატუსი, ლინკის ტრაფიკი ან ლინკის გამოყენება), შემდეგ კი ადაპტიურად და სწრაფად გადართოს ძლიერი ინტერფერენციების ზეგავლენის ქვეშ მყოფი ლინკი სხვა შესაბამის ლინკზე, რათა უზრუნველყოფილი იყოს კომუნიკაციის ხარისხი. გარდა ამისა, მანქანური სწავლების ალგორითმები ამჟამად განიხილება, როგორც იმედის მომცემი ინსტრუმენტები განსხვავებული მიზნებით მრავალ სფეროში, დაწყებული PHY/MAC პროტოკოლების დიზაინიდან ისეთი თეორიული საფუძვლების შემუშავებამდე, როგორებიცაა პარამეტრების ოპტიმიზაცია (მაგალითად, კონკურენციის ფანჯრის ან EDCA-ს პრიორიტეტის რეგულირება), პროტოკოლის ვერსიის შერჩევა, მრავალარხიანი/მრავალლინკიანი აგრეგაცია, არხების მოდელირება, დროში ცვალებადი არხების სწრაფი შეფასება, მოდულაციის ამოცნობა, RU განაწილება, მრავალ ანტენის შერჩევა 16 სივრცითი ნაკადით SU-MIMO/MU-MIMO გადაცემისთვის, მრავალი AP-ს შე-

რჩევა და მულტი-AP ქსელის განთავსება მულტი-AP კოორდინაციისთვის და ა.შ. მაგალითად, მულტი-AP ქსელს შეუძლია, წინასწარ განსაზღვროს მომავალი მომხმარებლების QoS მოთხოვნები და გარემო პირობები ისეთი თვისებების მიხედვით, როგორებიცაა მულტი-AP გადაცემის პარამეტრები და დაყენება (მაგალითად, MCS და სიხშირის გატარების ზოლი), შემდეგ კი მოახდინოს ქსელის რესურსების მართვის ოპტიმიზაცია და მთლიანი მულტი-AP ქსელის მუშაობის გაუმჯობესება.

### **2.7.4 ენერჯის მართვა**

მობილური მოწყობილობები იკვებება ბატარეით და მათ აქვს ავტონომიური მუშაობის შეზღუდული დრო. ბატარეის პარამეტრების გაუმჯობესების გარდა, მნიშვნელოვანია ენერჯის დაზოგვის მექანიზმების გაძლიერება. EHT-ს ახალი მოთხოვნებითა და მახასიათებლებით, როგორებიცაა მრავალლინკიანი ოპერაცია, ერთდროული მუშაობა მრავალი AP-თი და HARQ, EHT მოწყობილობების ენერჯის მოხმარების დონე შეიძლება მნიშვნელოვნად გაიზარდოს. მაგალითად, შედარებით მცირე ტრაფიკით დატვირთვის პირობებში, მრავალი ლინკით ფუნქციონირების შესაძლებლობის მქონე მობილური მოწყობილობა შეიძლება საკმაოდ დიდხანს იყოს მოსმენის რეჟიმში, რაც შეიძლება წარმოადგენდეს მრავალლინკიანი მოწყობილობის ენერჯის მოხმარების მნიშვნელოვან ნაწილს. შედეგად, ენერჯის დაზოგვის ახალი და უფრო ეფექტიანი მექანიზმები უნდა იქნეს შემუშავებული, რომ გაუმჯობესდეს გაზრდილ ენერგომომარებას. მაგალითად, ლინკების მოქნილი ფორმით ჩართვა/გამორთვა ქსელის რეალური პირობების ან ეფექტიანი პროგნოზირების მეთოდების საფუძველზე შეიძლება იყოს იდეალური მიდგომა ენერჯის დაზოგვისთვის იმ რეჟიმებთან შედარებით, სადაც ერთდროულად ჩართულია ყველა ლინკი. ასევე, ხელოვნური ინტელექტის ალგორითმების და ენერჯის მართვის კომბინირებაც ინტელექტუალური მაღალი ეფექტიანობისა და ენერჯის დაზოგვის მისაღწევად მრავალი კვლევის ობიექტია. მაგალითად, მულტი-AP ქსელში, გადაცემებში მონაწილე AP-ებს შეუძლიათ ხელოვნური ინტელექტის მეთოდების გამოყენებით გაზარდონ ან შეამცირონ გადაცემის სიმძლავრე მომხმარებლების ზუსტად პროგნოზირებული მოძრაობის ტრაექტორიაზე, მომხმარებლის QoS მოთხოვნებზე და არხის პირობებზე დაყრდნობით. ამისდა მიუხედავად, ენერჯის დაზოგვის პროგნოზირების ალგორითმების აქტუალობა და სიზუსტე უფრო დრამად უნდა იქნეს შესწავლილი.

### 2.7.5 სხივების ჰიბრიდული ფორმირება

სხივის ციფრული მეთოდებით ფორმირებისგან განსხვავებით, რომელსაც ამჟამად იყენებენ 6 გჰც WLAN ქსელებში, სადაც ყველა სივრცითი ნაკადი საჭიროებს ძვირადღირებულ რადიოსიხშირულ (RF) წრედს, სხივების ჰიბრიდული ფორმირება ხშირად მოითხოვს, რომ RF წრედების რაოდენობა ბევრად ნაკლები იყოს ანტენების რეალურ რაოდენობაზე. სხივების ჰიბრიდული ფორმირება ძალიან ეფექტიანია მოქნილობის დაბალანსების და ხარჯებთან დაკავშირებული კომპრომისის თვალსაზრისით და ამავე დროს იძლევა ისეთი სისტემის ფორმირების შესაძლებლობას, რომელიც აკმაყოფილებს ფუნქციონირებისთვის საჭირო პარამეტრებს. მომავალ უსადენო საკომუნიკაციო სისტემებში სხივების ჰიბრიდული ფორმირების მისაღწევად მთავარი შესასწავლი საკითხია ტრანსივიერების სტრუქტურების სისტემური მოდელები და მატრიცები ანტენების შესაძლო კონფიგურაციის გამოყენებით. სხივების ჰიბრიდული ფორმირებისა და მოდელირების ალგორითმების სისტემური დონის მოდელი უნდა იქნეს შესწავლილი და შეფასებული პარამეტრების ერთობლიობის (მაგალითად, RF, ანტენათა მესერი და სიგნალის დამუშავების კომპონენტები), ანტენათა მართვის და არხების კომბინაციების საფუძველზე.

### 2.8 მეორე თავის დასკვნები

ბოლო წლების განმავლობაში ზოგიერთმა ახალი გამოყენების აუცილებლობამ და წარმოქმნამ ულტრამაღალი გამტარუნარიანობისა და ულტრადიდიანი შეყვანების მოთხოვნებით ხელი შეუწყო IEEE 802.11 სტანდარტის კიდევ უფრო განვითარებას ამ ახალი სერვისების მახასიათებლების დასაკმაყოფილებლად. მაგალითად, ვირტუალური რეალობა, სოციალური ქსელები, საგანთა ინტერნეტი და კონტენტის ულტრამაღალი სიჩქარით მიწოდება WLAN-ს ახალ მოთხოვნებს უყენებს. შედეგად, IEEE 802.11 სტანდარტი განაგრძობს ევოლუციას საკვანძო ტექნიკის და ახალი სტანდარტის შემუშავების თვალსაზრისით, რომელიც ცნობილია, როგორც EHT ან ახალი ფორმულირებით, რომელსაც Wi-Fi 7-ს უწოდებენ.

უეჭველია, რომ მაღალი ეფექტიანობის PHY და MAC პროტოკოლების შემუშავება EHT-ისთვის რთული ხასიათის ამოცანაა, მაგრამ ამავე დროს ის საინტერესო კვლევითი სფეროცაა. ამ თავში ჩვენ ყურადღება გავამახვილეთ ახალ საკითხებზე და მნიშვნელოვან წინადადებებზე, რომლებიც დღეის მდგომარეობით შემოთავაზებულია EHT-ის სტანდა-

რტიზაციის პროცესში. კონკრეტულად, ამ თავში განხილულია ყველა ის მიმზიდველი ტექნოლოგია, რომლებიც შეიძლება შეტანილი იყოს EHT WLAN სტანდარტში, მათ შორის მულტი-RU მხარდაჭერა, 4096-QAM, მრავალღივიანი აგრეგაცია და ოპერაციები, გაუმჯობესებული MIMO, მულტი-AP კოორდინაციის ტექნიკა და HARQ. ცხადია, რომ WLAN პროტოკოლის ასეთმა დიდმა ცვლილებებმა შეიძლება EHT გადააქციოს საეტაპო სტანდარტულ პროტოკოლად IEEE 802.11 ოჯახის ევოლუციაში. გარდა ამისა, დღეისთვის განიხილება რამდენიმე ახალი კვლევითი პერსპექტივა, რომლებიც დაკავშირებულია 6 გჰც დიაპაზონთან თანაარსებობასთან, დაბალი და მაღალი სიხშირეების დიაპაზონების ინტეგრირებასთან, QoS-ის თვალსაზრისით უკეთესი მახასიათებლების უზრუნველყოფასთან. ყოველივე ეს დაფუძნებული იქნება მანქანურ სწავლებაზე, სხივების ჰიბრიდულ ფორმირებასა და ენერჯის მართვაზე. არსებობს მოლოდინი, რომ PHY ფენის პიკური სიჩქარე შეიძლება გაუმჯობესდეს სხვა უფრო ეფექტიანი კოდირების ტექნოლოგიებისა და მრავალჯერადი წვდომის ახალი ტექნოლოგიების გამოყენებით (მაგალითად, არაორთოგონალური მრავალჯერადი წვდომის ტექნოლოგიებით). გარდა ამისა, როგორც ბოლო წლების განვითარებადი და მიმზიდველი სფერო, Wi-Fi ზონდირება ჩაირთვება IEEE 802.11 პროტოკოლში ღირებულებისა და დაბალი სირთულის ხელის შესტების ამოცნობის, მაღალი სიზუსტით მოძრაობის გამოვლენის, ჯანმრთელობის მონიტორინგის, მანძილის განსაზღვრისა და პოზიციონირების და სხვა ამგვარი ამოცანების გადაჭრისთვის.

დაბოლოს, აღვნიშნავთ, რომ EHT სტანდარტიზაციის პროცესი ახლახან დაიწყო, ამიტომ კვლევების უმეტესობა ამჟამად მიმდინარეობს და ღიაა. შესაბამისად, IEEE 802.11be სტანდარტის შემუშავება გრძელდება და ვარაუდობენ, რომ მისი საბოლოო ვერსის წარმოდგენა მოხდება 2024 წლის განმავლობაში.

## ჰიბრიდული Li-Fi და Wi-Fi ქსელები

### 3.1 შესავალი

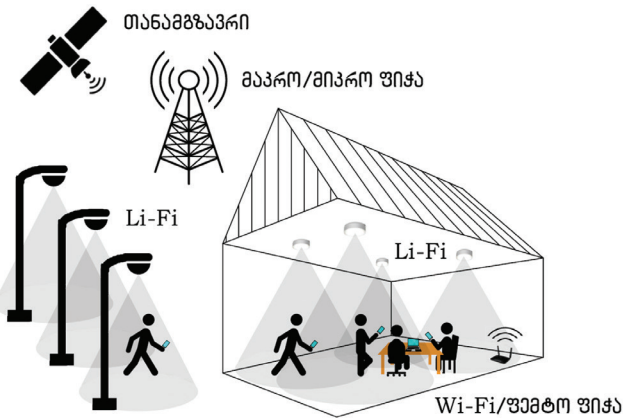
Cisco Systems-ის მიერ გამოქვეყნებული ბოლოდროინდელი ვიზუალური ქსელური ინდექსი პროგნოზირებს, რომ 2022 წლისთვის მობილური მონაცემების ტრაფიკი ინტერნეტპროტოკოლის ტრაფიკის 71 პროცენტი იქნება, ხოლო მობილური ინტერნეტის ტრაფიკის 80%-ზე მეტი წარმოქმნება შენობებს შიგნით. ეს საშუალებას მისცემს მცირე რადიუსში ფუნქციონირებად ისეთ უსადენო საკომუნიკაციო ტექნოლოგიას, როგორცაა Wi-Fi, გახდეს მობილური ქსელებისა და სისტემების მთავარი კომპონენტი მეხუთე თაობისა (5G) და მის შემდგომ ეპოქაში. გლობალური მასშტაბით, 2022 წლისთვის იქნება თითქმის Wi-Fi-ის 549 მილიონი ცხელი წერტილი, 2017 წლის 124 მილიონი ცხელი წერტილისგან განსხვავებით. რადიოსიხშირული (RF) სპექტრის შეზღუდული მოცულობის გამო Wi-Fi-ს ცხელი წერტილების მჭიდრო განლაგება იწვევს ინტენსიურ კონკურენციას ხელმისაწვდომი არხებისთვის. ეს გამოწვევას უქმნის RF სისტემას, იმისათვის, რომ დააკმაყოფილოს მობილური მონაცემების ტრაფიკზე ექსპონენციალურად მზარდი მოთხოვნა, რაც 7-ჯერ გაიზრდება 2017-დან 2022 წლამდე და 2022 წლის ბოლოსთვის თვეში 77.5 ექსაბაიტს მიადრწევს.

RF-ში მოსალოდნელი სპექტრის უკმარისობის დაძლევის მიზნით იმ უსადენო კომუნიკაციის ტექნოლოგიებმა, რომლებიც იყენებენ უკიდურესად მაღალ სიხშირეებს, ბოლო პერიოდში დიდი ყურადღება დაიმსახურეს. ამ ტექნოლოგიების ბაზაზე აგებულია, მაგალითად, სინათლის



სხვით ფორმირებული ქსელები (Li-Fi). სინათლის ტალღის სიგნალის მატარებლად გამოყენებით ამ შედარებით ახალ ტექნოლოგიას შეუძლია გამოიყენოს ფართო ოპტიკური სპექტრი, თითქმის 300 ტჰც. Li-Fi-ის წვდომის წერტილები (AP) შეიძლება ინტეგრირდეს არსებულ განათების ინფრასტრუქტურაში და შექმნას ორმაგი დანიშნულების სისტემა, რომელიც უზრუნველყოფს განათებას და კომუნიკაციას ერთდროულად. ბოლოდროინდელი გამოკვლევებიდან ჩანს, რომ ერთი სინათლის გამომსხვივებელი დიოდის (LED) საშუალებით, Li-Fi-ს შეუძლია მიაღწიოს მონაცემების გადაცემის 10 გბიტ/წმ-ზე მეტ ჰიკურ სიჩქარეს. Li-Fi გვთავაზობს ბევრ სხვა უპირატესობასაც RF ანალოგთან შედარებით, მათ შორის: (ა) ლიცენზირებისგან თავისუფალ ოპტიკურ სპექტრს; (ბ) გამოყენების შესაძლებლობას RF-ით ისეთ შეზღუდულ ადგილებში, როგორებიცაა საავადმყოფოები და წყლის ზედაპირის ქვემოთ განთავსებული სივრცეები; (გ) უსაფრთხო უსადენო კომუნიკაციების უზრუნველყოფის შესაძლებლობას, რადგან სინათლე არ აღწევს გაუმჭვირვალე ობიექტებში. Li-Fi-ს ასევე აქვს გარკვეული შეზღუდვები, რადგან იგი ფარავს შედარებით მოკლე დიაპაზონს, როგორც წესი, რამდენიმე მეტრს ერთი AP-თი და ის მგრძობიარეა დაბრკოლებათა გამო კავშირის დაკარგვისადმი.

Li-Fi-ის მაღალსიჩქარიანი მონაცემთა გადაცემისა და Wi-Fi-ს საყოვე-



**ნახ. 3.1.** 5G-ისა და შემდგომი პერიოდისთვის ქსელების კონვერგენციის ხედვა

ლადგილო დაფარვის კომბინირებით, ჰიბრიდული Li-Fi და Wi-Fi (HLW) ქსელის კონცეფცია პირველად სამეცნიერო ლიტერატურაში ნახსენები იყო 2011 წელს. ამის შემდეგ სწრაფად გაფართოვდა კვლევები Li-Fi-ის

და ფემტო ფიჭების ინტეგრაციის მიმართულებით. დადასტურებულია, რომ ეს ჰიბრიდული ქსელები ადწევს გაცილებით უკეთეს ტექნიკურ მახასიათებლებს, ვიდრე ცალკე ადებული Li-Fi ან RF სისტემა. ნახ. 3.1 წარმოგვიდგენს ძირითადი უსადენო ქსელებისა და Li-Fi-ის კონვერგენციასთან დაკავშირებულ ხედვას 5G-ისა და მისი შემდგომი პერიოდისთვის. შენობებს გარეთა სისტემებში მობილურ მომხმარებლებს შეიძლება მოემსახურონ თანამგზავრები, მაკრო/მიკრო ფიჭები ან Li-Fi-ზე დაფუძნებული ქუჩის ნათურები. შენობებს შიგნით გადაადგილებისას უფრო მაღალი ხარისხის მომსახურების მისაღწევად მომხმარებლები გადადიან HLW ქსელზე.

დღეის მდგომარეობით გამოქვეყნებულია მრავალი კვლევითი ნაშრომი ოპტიკური უსადენო კომუნიკაციების (OWCs) და შესაბამისი ქსელების თემაზე, მაგრამ ამ ნაშრომებს შორის მხოლოდ რამდენიმეა დაკავშირებული ოპტიკურ უსადენო ჰიბრიდულ ქსელებთან. მოვიყვანოთ რამდენიმე მაგალითს: განიხილეს რადიოსიხშირული (RF) და თავისუფალ სივრცეში ოპტიკური კომუნიკაციის (FSO) ჰიბრიდული სისტემები - RF/FSO, რომლებიც ფოკუსირებულია ოპტიმალური ფორმით სიგნალების გადაცემასა და მარშრუტიზაციაზე; შეჯამდა შესაძლებლობები და გამოწვევები Li-Fi-ის და Wi-Fi-ის თანაარსებობასთან დაკავშირებით, განსაკუთრებით გარემოსთან წვდომისა და მოდულაციის სქემების თვალსაზრისით; შეისწავლეს ჰიბრიდული ქსელები მათში გამოყენებულ ხელშემწყობ ტექნოლოგიებთან ერთად, მათ შორის ქსელის ფუნქციის ვირტუალიზაცია (NFV), პროგრამულად განსაზღვრული კოეფიციენტი (SDC) და SDN; განიხილეს დატვირთვის დაბალანსება (LB) და ჰენდოვერი ხილული სინათლით კომუნიკაციის (VLC) დახმარებით ჰიბრიდულ ქსელებში; შეისწავლეს ჰიბრიდული VLC/RF ქსელების ოპტიმიზაციის თემა და, ასევე, წარმოადგინეს ჰიბრიდული RF/OWC სისტემების მიმოხილვა, სადაც ყურადღება იყო გამახვილებული ვერტიკალური ჰენდოვერის და დატვირთვის დაბალანსების საკითხებზე.

ეს თავი მიზნად ისახავს HLW ქსელებისთვის უკვე ჩატარებული და მიმდინარე კვლევების მიმოხილვას, უნიკალური გამოწვევებისა და, ჩვენი აზრით, პერსპექტიული კვლევითი მიმართულებების წარმოდგენას. ძირითადი კონტრიბუციებია:

- სისტემის დიზაინის ჩარჩოს წარმოდგენა, რომელიც მოიცავს ქსელის არქიტექტურას, ფიჭების განლაგებას, მრავალჯერადი წვდომისა და მოდულაციის სქემებს, განათების მოთხოვნებს და ბექჰოლს.

- მუშაობის ეფექტიანობის ძირითადი მაჩვენებლების შეჯამება და HLW ქსელების მახასიათებლების მიმოხილვა მათი უპირატესობების ხაზგასასმელად.

- მომხმარებლის ქცევის მოდელირების განხილვა და მისი გავლენის განსაზღვრა HLW ქსელების მუშაობაზე.

- არსებული კვლევების მიმოხილვა და კლასიფიკაცია HLW ქსელების თვალსაზრისით სამი კვლევითი მიმართულებით: ინტერფერენციების მართვა, ჰენდოვერი და დატვირთვის დაბალანსება.

- HLW ქსელების სარგებლიანობის შესწავლა ისეთ გამოყენებით სერვისებში, როგორებიცაა საგანთა ინტერნეტი, შენობებს შიგნით ადგილმდებარეობის განსაზღვრა და ფიზიკური ფენის უსაფრთხოება.

- HLW ქსელების პრაქტიკული დანერგვისა და სამომავლო განვითარების ტენდენციების, გამოწვევებისა და პერსპექტიული კვლევითი მიმართულებების განხილვა.

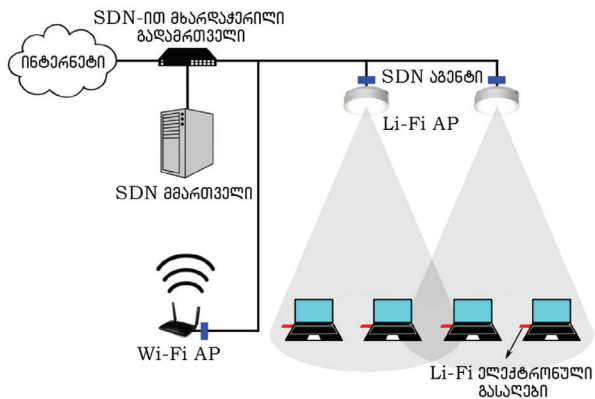
ამ თავის დანარჩენი ნაწილი შემდეგნაირად არის ორგანიზებული: HLW ქსელების სისტემის პროექტირების სტრუქტურა წარმოდგენილია 3.2 პარაგრაფში, ხოლო მუშაობის ძირითადი მაჩვენებლები შეჯამებულია 3.3 პარაგრაფში. მომხმარებლის ქცევის მოდელირება შესწავლილია 3.4 პარაგრაფში. Li-Fi-ის ინტერფერენციების მართვასთან დაკავშირებული კვლევა განხილულია 3.5 პარაგრაფში. ჰენდოვერი და დატვირთვის დაბალანსება HLW ქსელებში წარმოდგენილია შესაბამისად, 3.6 და 3.7 პარაგრაფებში. HLW ქსელების მიღწევები გამოყენებით სერვისებში გამოკვლეულია 3.8 პარაგრაფში. დაბოლოს, 3.9 პარაგრაფში წარმოდგენილია მესამე თავის ძირითადი დასკვნები.

### 3.2 სისტემის პროექტირების სტრუქტურა

ამ პარაგრაფში HLW ქსელების სტრუქტურა განხილულია ხუთი ასპექტის მიხედვით: ქსელების არქიტექტურა, ფიჭების განთავსება, მრავალჯერადი წვდომისა და მოდულაციის სქემები, განათების მოთხოვნები და ბექჰოლი. პარაგრაფის მიზანია HLW ქსელების პროექტირებისთვის რეკომენდაციების წარმოდგენა.

#### 3.2.1 ქსელის არქიტექტურა

ზოგადად, Li-Fi შეიძლება ჩართულ იქნეს არსებულ Wi-Fi სისტემაში ორი ძირითადი გზით: ავტონომიურით და ცენტრალიზებულით. პირველი მიდგომა დაკავშირებულია Wi-Fi-ს ამჟამინდელი ავტონომიური ქსელის სტრუქტურის გაფართოებასთან Li-Fi-ზე. მომხმარებელს შეუძ-



**ნახ. 3.2.** SDN-ით მხარდაჭერილი HLW ქსელის სქემატური დიაგრამა

ლია, თავისუფლად აირჩიოს AP ქსელის ნებისმიერი დომენისგან, ხოლო AP-ს შეუძლია გამოიყენოს ნებისმიერი დაუკავებელი არხი. მიუხედავად იმისა, რომ ამ მიდგომით ქსელის მართვა იოლდება, სამწუხაროდ მისი ეფექტიანობა ეცემა. ალტერნატიული მიდგომა – ეს არის Li-Fi და Wi-Fi AP-ების (რომლებიც ერთსა და იმავე მფლობელს ეკუთვნის) მართვა ცენტრალური მმართველი ბლოკის საშუალებით. ამ დროს ქსელის დონეზე მიიღწევა ოპტიმალური მარშრუტიზაცია და რესურსების განაწილება. ეს არქიტექტურა დაფუძნებულია SDN-ზე, რომელიც აცალკევებს მმართველ სიბრტყეს გადამგზავნი მოწყობილობების მონაცემთა სიბრტყიდან. HLW ქსელების SDN პლატფორმაზე რეალიზაციის სქემატური დიაგრამა ნაჩვენებია ნახ. 3.2-ზე. SDN-ით მხარდაჭერილი გადამრთველი აკავშირებს Li-Fi და Wi-Fi AP-ებს და ამ AP-ებიდან იღებს ძირითადი მახასიათებლების ინდიკატორების ინფორმაციას SDN აგენტების საშუალებით. ამის შემდეგ ეს ინფორმაცია ეგზავნება SDN მმართველს, რომელიც იღებს გადაწყვეტილებას თითოეული შემოსული მონაცემთა პაკეტის მარშრუტის შესახებ. ადვინშნავთ, რომ ამჟამად HLW ქსელების ექსპერიმენტული შემუშავება ჯერ კიდევ საწყის ეტაპზეა.

### 3.2.2 ფიჭების განთავსება

მაშინ, როდესაც Wi-Fi AP-ებს შენობებს შიგნით შეუძლიათ იფუნქციონონონ 50 მეტრამდე რადიუსში, Li-Fi AP-ები ჩვეულებრივ ფარავნ შედარებით მცირე ტერიტორიას, დიამეტრით მხოლოდ რამდენიმე მეტრამდე.

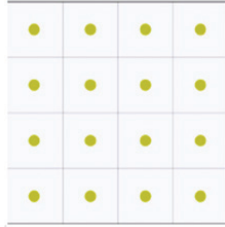
ქსელის მაღალხარისხიანი მუშაობის მისაღწევად მნიშვნელოვანია Li-Fi AP-ების სწორი განთავსება, რომლებიც ჩვეულებრივ ინტეგრირებულია ქერის ნათურებში. პრაქტიკაში ფიჭების განლაგება ექვემდებარება გარემოს მიერ შემოტანილ შეზღუდვებს, მაგალითად, ოთახის ფორმებს. ამჟამინდელ ლიტერატურაში ჩვეულებრივ განიხილება ფიჭების განლაგების სამი მოდელი: ექვსკუთხედის, მატრიცის და ჰუასონის წერტილოვანი პროცესის (PPP) შესაბამისად.

- ექვსკუთხა განლაგება ფიჭური ქსელების იდეალური სტრუქტურაა. დადასტურებულია, რომ იგი უზრუნველყოფს SINR-ის მიხედვით დაფარვის ყველაზე უფრო მაღალ ალბათობას Li-Fi-ში. მიუხედავად იმისა, რომ ყოველდღიურ ცხოვრებაში ჩვეულებრივი არ არის ნათურების ასეთი სტრუქტურის პოვნა, ექვსკუთხა განლაგება, მახასიათებლების ანალიზიდან გამომდინარე, გვთავაზობს ზედა ზღვრულ მნიშვნელობას.

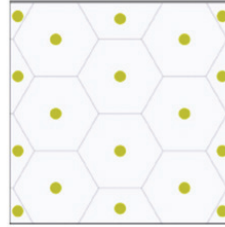
- ნათურების მატრიცულ განლაგებას ფართოდ იყენებენ ინსტალაციის სიმარტივის გამო. ამ განლაგებას იყენებენ VLC და HLW ქსელებთან დაკავშირებულ უმეტეს კვლევებში. მისი გამოყენებით შესაძლებელია მიღებულ იქნეს SINR-ით დაფარვის ალბათობა, რომელიც ძალიან ახლოსაა ექვსკუთხა განლაგებით მიღებულ მნიშვნელობასთან.

- PPP განლაგებას იყენებენ შემთხვევითი წესით განთავსებული AP-ების კომპიუტერული სიმულაციისთვის. ამასთან, რთულია ამ განლაგების საშუალებით ერთგვაროვანი განათების მიღწევა. ამის გარდა, PPP გთავაზობს სამ განლაგებას შორის მოცემული SINR-ით ყველაზე უარეს დაფარვის ალბათობას.

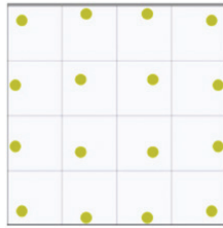
განლაგების ტოპოლოგიის გათვალისწინებით, AP-ებს შორის მანძილი იძლევა კომპრომისს ჰენდოვერის (განხორციელების) სიჩქარესა და დაფარვის ალბათობას შორის. ლიტერატურაში AP-ების სეპარაციის გავლენა შეისწავლეს მატრიცული განლაგებისთვის და ოპტიმალური სეპარაცია წარმოადგინეს, როგორც ჰენდოვერის ოვერჰედის და მომხმარებელთა საშუალო სიჩქარის ფუნქცია. დაასვენეს, რომ უმეტეს შემთხვევებში 3-მეტრიანი სეპარაცია ოპტიმალურია. ასევე შეისწავლეს გრადიენტის პროექციის მეთოდის გამოყენება AP-ების ოპტიმალური განლაგების მოსაძებნად. მატრიცულ და ექვსკუთხა განლაგებათა რეგულარული და ოპტიმალური განთავსება მოცემულია ნახ. 3.3-ზე. ორივე განლაგებისთვის ოპტიმალური განთავსება AP-ს ოდნავ გადაანაცვლებს გარეთ ჩვეულებრივ განთავსებასთან შედარებით. ამ ოპტიმალურმა განთავსებამ შეიძლება სისტემის გამტარუნარიანობა 70%-მდე გააუმჯობესოს. გარდა ამისა, Wi-Fi AP-ების ადგილმდებარეობა გავლენას ახ-



(ა) რეგულარული მატრიცა



(ბ) რეგულარული ექვსკუთხედი



(გ) ოპტიმიზებული მატრიცა



(დ) ოპტიმიზებული ექვსკუთხედი

**ნახ. 3.3.** Li-Fi AP-ების რეგულარული და ოპტიმიზებული განთავსება

დენს Li-Fi მომხმარებლების განაწილებაზე და ამით, თავის მხრივ, გავლენას ახდენს HLW ქსელების მუშაობაზე. ბოლოდროინდელი გამოკვლევების თანახმად, შემთხვევით განლაგებასთან შედარებით, Wi-Fi AP-ების რეგულარული მატრიცის შესაბამის განლაგებას შეუძლია სისტემის გამტარუნარიანობის 20%-მდე გაზრდა.

### 3.2.3 მრავალჯერადი წვდომა და მოდულაციის სქემები

ამჟამად ფართოდ განიხილება Li-Fi-ისა და Wi-Fi-ისთან დაკავშირებული მრავალჯერადი წვდომისა და მოდულაციის სქემები. მრავალჯერადი წვდომის თვალსაზრისით, მოქმედი Li-Fi სტანდარტებისთვის გათვალისწინებულია CSMA/CA და მრავალჯერადი წვდომა არხების დროითი დაყოფით (TDMA). იძლევა რა საშუალებას, რომ ერთდროულად მხოლოდ ერთი ლინკი იყოს აქტიური, CSMA/CA-მ შეიძლება შეამციროს ფიჭებს შორის ინტერფერენციები უმნიშვნელო დონემდე. ამასთან, მომხმარებლებისთვის წვდომის პროცესი შემთხვევითია და ყოველთვის არ არის სამართლიანი, განსაკუთრებით მჭიდრო განლაგებისას. გა-

რდა ამისა, Wi-Fi-ისგან განსხვავებით, დროითი დაყოფის დუპლექსით მუშაობისას, Li-Fi ჩვეულებრივ იყენებს ხილულ სინათლეს DL-ისთვის და ინფრაწითელ დიაპაზონს UL-ისთვის. ამან შეიძლება გამოიწვიოს უზარმაზარი კონფლიქტები, როდესაც არსებულ CSMA/CA-ს იყენებენ Li-Fi-ში. ამ პრობლემის მოსაგვარებლად, ლიტერატურაში შემოთავაზებულია არხის დაკავების ტონალური სიგნალის ფართოზოლოვანი გადაცემა, რამაც შეიძლება მნიშვნელოვნად შეამციროს კონფლიქტების ალბათობა. CSMA/CA-სთან შედარებით, TDMA-ს აქვს უპირატესობები ენერჯის მოხმარებისა და სიხშირის გატარების ზოლის გამოყენების თვალსაზრისით, მაგრამ ის სინქრონიზაციისა და ინტერფერენციების მართვაზე დამოკიდებული. OFDMA და არაორთოგონალური მრავალჯერადი წვდომა (NOMA) ასევე ფართოდ არის შესწავლილი Li-Fi-სთვის. ეს სქემები ახორციელებს რესურსების განაწილების მჭიდრო კოორდინაციას მთელ ქსელში და, შესაბამისად, საჭიროებს სისტემის შედარებით მაღალი რეალიზაციის სირთულეს. თუ OFDMA-ში, დროით-სიხშირული რესურსბლოკები ნაწილდება მომხმარებლებს შორის ერთდროული გადაცემის განსახორციელებლად, NOMA-ში დაჯგუფებული მომხმარებლებისთვის მომსახურება ხდება ერთსა და იმავე დროსა და სიხშირეზე, მაგრამ სიმძლავრის სხვადასხვა დონით, არხის მდგომარეობიდან გამომდინარე. NOMA-ს მახასიათებლების უპირატესობა OFDMA-სთან შედარებით იზრდება, როდესაც არხის პირობებში სხვაობა დიდია. ასევე დადგინდა, რომ LED ნახევარკუთხე მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს NOMA-ს მუშაობაზე Li-Fi-ში. დადასტურებულია, რომ NOMA-ს მუშაობის მახასიათებლების უპირატესობა ორთოგონალურ მრავალჯერად წვდომის ტექნიკასთან შედარებით შეიძლება კიდევ უფრო გაიზარდოს იმ მომხმარებელთა დაწყვილებით, რომელთაც აქვთ განსხვავებული საარხო პირობები.

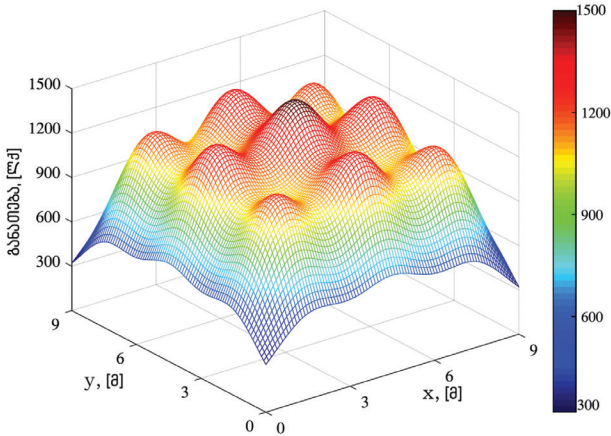
რაც შეეხება მოდულაციას, VLC-სთან დაკავშირებული IEEE 802.15.7 სტანდარტი იყენებს ცვლად იმპულსურ-პოზიციურ მოდულაციას (VPM) და ორპოზიციურ მანიპულაციას (OOK) PHY I და PHY II ფენებში და ფერად მანიპულაციას (CSK) PHY III ფენაში. როგორც მოდულაციის სქემებს ერთი გადამტანით, OOK-ს და VPM-ს შედარებით დაბალი რეალიზაციის სირთულე აქვთ და შეუძლიათ მონაცემთა გადაცემის დაბალი/საშუალო სიჩქარის უზრუნველყოფა,  $\approx 10$  კბიტ/წმ-დან  $\approx 100$  მბიტ/წმ-მდე. CSK სიხშირული მანიპულაციის მსგავსია, მაგრამ იყენებს რამდენიმე ოპტიკურ წყაროს ტალღის სხვადასხვა სიგრძეებით. მოდულაციის ეს მეთოდი სპეციალურად არის შემუშავებული Li-Fi-სთვის, რაც PHY III-ს საშუალებას

აძლევს, იმუშაოს სიჩქარეებით 12-დან 96 მბიტ/წმ-მდე. მოდულაციის სამი ზემოთ მოყვანილი ტექნიკა შეიძლება პირდაპირ იქნეს გამოყენებული Li-Fi-ისთვის, რადგან ისინი მისადაგებულია რეალური და არაუარყოფითი ოპტიკური სიგნალებისადმი. მათგან განსხვავებით, OFDM იძლევა რთულ და ბიპოლარულ სიგნალებს. რეალური OFDM სიგნალების აგება შესაძლებელია ფურიეს შებრუნებული სწრაფი გარდაქმნის შესასვლელი ვექტორის შუზღუდვით, ისე, რომ მას ჰქონდეს ჰერმიტიული (შეუღლებული) სიმეტრია. ამ პროცესს ოპტიკურ OFDM-ს (O-OFDM) უწოდებენ. დღეისთვის განიხილავთ O-OFDM-ის ორ ფორმას: მუდმივი დენის (DC) ოპტიკურ OFDM-ს (DCO-OFDM) და ასიმეტრიულად მოჭრილ ოპტიკურ OFDM-ს (ACO-OFDM). ACO-OFDM-ში, გადაცემული სიგნალი ხდება დადებითი, თავდაპირველი ბიპოლარული OFDM სიგნალის ნულს ქვემოთ მოჭრით და მხოლოდ დადებითი ნაწილების გადაცემით. DCO-OFDM-ში სიგნალს ემატება DC წანაცვლება, რომ იგი დადებითი გახდეს. ACO-OFDM-ში მხოლოდ კენტი ქვეგადამტანები გადასცემენ მონაცემთა სიმბოლოებს, ხოლო DCO-OFDM-ში ყველა ქვეგვეგადამტანს იყენებენ მონაცემთა სიმბოლოების გადასატანად. DCO-OFDM ნაკლებად ეფექტურია, ვიდრე ACO-OFDM საშუალო ოპტიკური სიძლავრის თვალსაზრისით ისეთი სიგნალთა კონსტელაციებისთვის, როგორებიცაა 4-QAM, 16-QAM, 64-QAM და 256-QAM, მაგრამ უფრო დიდი რიგის სიგნალთა კონსტელაციებისთვის, როგორებიცაა 1024-QAM და 4096-QAM, DCO-OFDM უფრო ეფექტურია. ეს დაკავშირებულია იმ გარემოებებთან, რომ DCO-OFDM-ში გამოყენებული DC წანაცვლება არაეფექტურია ოპტიკური სიძლავრის თვალსაზრისით, ხოლო ACO-OFDM-ში მონაცემების გადასატანად ქვეგადამტანების მხოლოდ ნახევრის გამოყენება არაეფექტურია სიხშირის გატარების თვალსაზრისით. მცირე რიგის სიგნალთა კონსტელაციებისთვის პირველი ეფექტი უფრო მნიშვნელოვანია და ACO-OFDM უკეთეს შედეგებს იძლევა, მაგრამ უფრო დიდი ზომის სიგნალთა კონსტელაციებისთვის მეორე ეფექტი დომინირებს და DCO-OFDM უკეთეს ტექნიკურ მახასიათებლებს იძლევა. IEEE 802.11bb სტანდარტის მიხედვით, არსებობს PHY-სთვის ორი ძირითადი წინადადება: (ა) არსებული IEEE 802.11 მიკროსქემების კომპლექტის გამომავალი სიგნალების ცენტრალური სიხშირის წანაცვლება და (ბ) VLC-სთან დაკავშირებული სტანდარტებიდან PHY ფენის გამოყენება. არსებული PHY-ს გამოყენების მთავარი უპირატესობა ის არის, რომ ის მოითხოვს მინიმალურ ცვლილებას არსებულ Wi-Fi-ს მიკროსქემებში, რამაც მნიშვნელოვნად უნდა შეამციროს გამოყენების პროცესში ნებისმიერი შესაძლო ბარიერის წარმოქმნა.



### 3.2.4 განათების მოთხოვნები

Li-Fi სისტემის დიზაინი უნდა შეესაბამებოდეს განათების მოთხოვნებს. სტანდარტიზაციის საერთაშორისო ორგანიზაცია (ISO) სინათლისა და განათების შესახებ განსაზღვრავს 300-დან 1500 ლუქსამდე (ლქ) განათებას საოფისე სამუშაოებისთვის. შესაბამისი ლიტერატურიდან ცნობილია ოთახში განათების განაწილებასთან დაკავშირებული მათემატიკური გამოთვლები. ამის მაგალითი ნაჩვენებია ნახ. 3.4-ზე, სადაც Li-Fi AP-ების ადგილმდებარეობა და გამომავალი სიმძლავრე ისეა შემუშავებული, რომ განათების მინიმალური მოთხოვნა 300 ლუქსი დაკმაყოფილდეს ოთახის კუთხეებში, ხოლო პიკური განათება 1500 ლუქსს არ აღემატებოდეს. როგორც აქ ნაჩვენებია, განათების სიკაშკაშე პიკს აღწევს ოთახის ცენტრში, მაგრამ კუთხეებში მნიშვნელოვნად დაბალია.



ნახ. 3.4. განათების განაწილების მაგალითი ოთახში

განათების მოთხოვნების შესაბამისად ქსელის უკეთესად მუშაობისთვის LED-ების ოპტიმიზაცია რთული ამოცანაა. ეს პროცესი მოიცავს LED-ებთან დაკავშირებულ რიგ ფაქტორებს, მათ შორის, მათ ადგილმდებარეობას, ორიენტაციას, ხედვის არეს, გამოსხივების მოდელს, გამომავალ სიმძლავრეს, სიხშირის გატარების ზოლს, ფერის ტემპერატურას და ა.შ. ლიტერატურაში შემოთავაზებულია სიმძლავრის განაწილების სქემა, რომელიც მაქსიმალურად გაზრდის მრავალი მომხმარებლის ჯამურ სიჩქარეს განათების შეზღუდვების პირობებში. აღმოჩნდა, რომ მონაცემთა გადაცემის მაღალი სიჩქარის მიღწევა შესაძლებელია უფრო

მაღალტემპერატურული ფერის შემთხვევაში. გარდა ამისა, პროცესი შეიძლება ჩამოყალიბდეს, როგორც მრავალმიზნიანი ოპტიმიზაციის პრობლემა, რომელიც იღებს სპექტრული ეფექტიანობის – განათების რეგიონის პარეტოს ფრონტს. ასევე დადგენილია, რომ სპექტრული ეფექტიანობის მაქსიმიზაციისთვის დიდი მნიშვნელობის მინიჭება იწვევს ფოტომეტრიული ციმციმის ზრდას. ეს ნიშნავს, რომ თვალის უსაფრთხოებისა და პროდუქტიულობისთვის დასაშვებ დონეზე ციმციმის შენარჩუნების მიზნით, შესაძლოა, საჭირო გახდეს სისტემის კონსტრუირებისას მართვის მექანიზმის გათვალისწინება.

### 3.2.5 ბექჰოლი

ბექჰოლი აუცილებელია AP-ების ძირითად ქსელთან დასაკავშირებლად. HLW ქსელებისთვის ბექჰოლის შემუშავება გართულებულია სამი ძირითადი ფაქტორის გამო: (ა) არსებობს AP-ების შედარებით დიდი რაოდენობა; (ბ) ქსელის ჰეტეროგენული სტრუქტურა; (გ) ქსელის მნიშვნელოვანი გამტარუნარიანობა, სადაც ერთ AP-ს შეუძლია უზრუნველყოს ლინკში მონაცემთა გადაცემის სიჩქარე გბიტ/წმ-ის ფარგლებში. შემოთავაზებულია მთელი რიგი ტექნოლოგიები, როგორც ბექჰოლი შენობებს შიგნით განთავსებული უსადენო ქსელებისთვის, მათ შორის ელექტროგადამცემი ხაზით კომუნიკაცია (PLC), ენერჯის გადაცემა ეზერნეტით (PoE), პლასტიკური ოპტიკური ბოჭკო (POF), მილიმეტრული ტალღები, ინფრაწითელი გამოსხივება და VLC.

VLC-ის ბექჰოლის მიზნით შენობებში არსებული ელექტროგადამცემი ხაზების გამოყენების კონცეფცია პირველად შემოთავაზებულ იქნა კომინესა და ნაკაგავას მიერ 2003 წელს. ბოლოდროინდელმა კვლევებმა საშუალება მოგვცა, დანერგილიყო ჰიბრიდული PLC-VLC არქიტექტურა, რომელიც უზრუნველყოფს მრავალმომხმარებლიან DL კომუნიკაციებს, თანაც ამ დროს ბექჰოლს შეუძლია მონაცემთა გადაცემის სიჩქარის 1 გბიტ/წმ-მდე გაზრდა. PoE კიდევ ერთი მიდგომაა მონაცემთა გადაცემისა და ელექტროენერჯის ერთდროულად უზრუნველყოფის მიზნით. PoE და VLC კასკადური სისტემის გამოყენებით შემოთავაზებულ იქნა ორნახტომიანი სარელეო გადაცემა ასევე 1 გბიტ/წმ სიჩქარიანი ბექჰოლით. სადენიანი ბექჰოლის მესამე ვარიანტია POF, რომელიც გვთავაზობს მონაცემთა გადაცემის სიჩქარეს რამდენიმე გბიტ/წმ-დე.

სადენიანი ბექჰოლის ტექნიკასთან შედარებით, უსადენო გადაწყვეტილებები უზრუნველყოფს უფრო მოქნილ ინსტალაციას მოწყობილობების უფრო მაღალ ფასად. ნაჩვენებია, რომ მილიმეტრული ტალღების

დიაპაზონში შესაძლებელია ბექჰოლის კავშირის უზრუნველყოფა მრავალი გბტი/წმ გადაცემის სიჩქარით. ასევე შემოთავაზებულ იქნა VLC-ზე დაფუძნებული ბექჰოლის გადაწყვეტა Li-Fi-ისთვის, სადაც წვდომისა და ბექჰოლის ლინკებისთვის გამოყენებული იყო ზოლსშიდა სრული დუპლექსის ტექნიკა. აქ ორნახტომიანი გადაცემის რეალიზაციისთვის იყენებენ ისეთ სარელეო პროტოკოლებს, როგორებიცაა გადლიერება და გადაცემა, და დეკოდირება და გადაცემა. ასევე შემუშავებულია მეთოდები, სადაც, როგორც ხილულ სინათლეს, ასევე ინფრაწითელ სიხშირულ დიაპაზონებს იყენებენ ბექჰოლის სქემის შესადგენად, თანაც დეტალურადაა აღწერილი ინტერფერენციები ბექჰოლსშიდა და ბექჰოლიდან წვდომამდე ქსელებს შორის. HLW ქსელებთან დაკავშირებით დადგენილია, რომ რესურსების განაწილება და ქსელის ოპტიმიზაცია Li-Fi-სა და Wi-Fi-ს საშუალებით შესაძლებელია, როდესაც ისინი იზიარებენ ერთსა და იმავე ბექჰოლს. მაგალითად, ენერჯის ბიუჯეტის გათვალისწინებით, ქსელის მუშაობის მახასიათებლების გასაუმჯობესებლად შესაძლებელია ენერჯის განაწილების ოპტიმიზაცია Li-Fi-ისა და Wi-Fi-ის შორის.

### 3.3 მუშაობის ძირითადი მაჩვენებლები

მთელ რიგ ძირითად მაჩვენებლებს იყენებენ უსადენო ქსელების მუშაობის შესაფასებლად, მათ შორის SINR-ით დაფარვის ალბათობას, სპექტრულ ეფექტიანობას, არეალის მიხედვით სპექტრულ ეფექტიანობას, ენერგოეფექტიანობას, ქსელის გამტარუნარიანობას, მომსახურების ხარისხსა და სამართლიანობას მომხმარებელთათვის. ამ პარაგრაფში მიმოხილულია HLW ქსელებთან მიმართებაში ეს მაჩვენებლები და მათ შესაფასებლად ჩატარებული შესაბამისი კვლევები.

#### 3.3.1 SINR-ით დაფარვის ალბათობა

SINR-ით დაფარვის ალბათობას, ანუ იმის ალბათობას, რომ მომხმარებლის SINR აღემატება გარკვეულ ზღურბლს, გადამწყვეტი მნიშვნელობა აქვს სტაბილური კავშირის უზრუნველსაყოფად. RF სისტემის შემთხვევაში, რომელიც იყენებს ყველა მიმართულებით მოქმედ ანტენებს, მიღებული სიგნალის სიმძლავრე დამოკიდებულია ლინკის მანძილზე და დაჩრდილვაზე. რაც შეეხება Li-Fi-ს, მომხმარებლის ორიენტაცია აქ ასევე გადამწყვეტ როლს ასრულებს. კერძოდ, სინათლის სხივის ნორმალური დაცემა იძლევა მიღებული სიგნალის სიმძლავრის პიკს, მაშინ, როდესაც სიგნალი არ მიიღება დაცემის ისეთი მიმართულებით, რომელიც ფოტოდiodების მხედველობის არეს (FoV) მიღმაა. ამ მიზეზით, მომხ-

მარბლის ორიენტაციის ცვლილებებმა შეიძლება მნიშვნელოვნად შეუცვალოს ფორმა Li-Fi AP-ების დაფარვის ზონებს. მიუხედავად იმისა, რომ ფოტოდირექტიული დიდი FoV-ით აფართოებს მიღების ორიენტაციის დიაპაზონს, ეს იწვევს მეტ ინტერფერენციებს. ერთი ფოტოდირექტიული გამოყენების ალტერნატივა – ეს არის მიმღები კუთხური მიმორიგებით (ADR), რომელიც შედგება მრავალი ვიწრო FoV-ის მქონე ფოტოდირექტიულიდან. ასეთი სქემა მნიშვნელოვნად აუმჯობესებს მომხმარებლის SINR-ს, 20 დბ-დან 50 დბ-მდე, კომბინირების არჩეული სქემის შესაბამისად. ასევე, ჩატარდა კვლევა HLW ქსელების SINR-ით დაფარვის ალბათობის ანალიზისთვის. ნაჩვენებია, რომ HLW ქსელებს შეუძლიათ, ეფექტიანად გააუმჯობესონ SINR-ით დაფარვის ალბათობა ავტონომიურად ფუნქციონირებად Li-Fi ან Wi-Fi ქსელებთან შედარებით, განსაკუთრებით, ერთი ფოტოდირექტიული მიმღებთათვის, რომელთა ხედვის კუთხის ნახევარი 45 გრადუსზე ნაკლებია.

### **3.3.2 სპექტრული ეფექტიანობა და არეალის მიხედვით სპექტრული ეფექტიანობა**

სპექტრული ეფექტიანობა განსაზღვრავს, თუ რამდენად ეფექტიანად იყენებენ სინშირული სპექტრის გარკვეულ რაოდენობას. ლიტერატურაში აღწერილია ექსპერიმენტული VLC სისტემა, რომლისთვისაც მიადწიეს სპექტრულ ეფექტიანობას 4.85 ბიტი/წმ/ჰც-ზე. ეს სისტემა ემყარება ამპლიტუდურ-ფაზურ მოდულაციას გადამტანი სინშირის გარეშე (CAP), ანუ QAM-ის ვარიანტს. VLC-სთვის ასევე იყენებენ განზოგადებულ სივრცით მოდულაციას სიკამკამის მართვით, რაც საშუალებას იძლევა, მიღებულ იქნეს 10 ბიტი/წმ/ჰც-ზე მეტი სპექტრული ეფექტიანობა. სპექტრული ეფექტიანობის კიდევ უფრო გასაუმჯობესებლად განხორციელდა DCO-OFDM-ის შეთავსება ადაპტიურ ბიტურ დატვირთვასთან და ექსპერიმენტულად მიიღეს კავშირის სიჩქარე 15.73 გბიტი/წმ. რაც შეეხება HLW ქსელებს, შესაძლებელია მომხმარებლების ერთი ქსელიდან მეორეზე გადაყვანა SINR-ის უფრო მაღალი მნიშვნელობისთვის და, შესაბამისად, უკეთესი სპექტრული ეფექტიანობისთვის. ამ მიდგომით, ორი ქსელის ავტონომიურად ფუნქციონირების შემთხვევასთან შედარებით, HLW ქსელებს შეუძლიათ გააუმჯობესონ სპექტრული ეფექტიანობა მისი 10%-დან 30%-მდე გაზრდით.

Wi-Fi-სგან განსხვავებით, Li-Fi-ს შეუძლია, მრავალჯერ განმეორებით ეფექტიანად გამოიყენოს სპექტრული რესურსი სივრცეში, ვინაიდან ერთი Li-Fi AP მხოლოდ 2-3 მეტრის დიამეტრის შეზღუდულ არეალს მო-

იცავს. Li-Fi-ის და მისი RF ანალოგების სპექტრული ეფექტიანობის სამართლიანად შედარებისთვის, უნდა განისაზღვროს არეალის მიხედვით სპექტრული ეფექტიანობა (ASE), რომელიც ზომავს მონაცემთა გადაცემის მაქსიმალური საშუალო სიჩქარეების ჯამს ერთდროულად სიხშირის გატარების ზოლის ერთეულზე და ფართობის ერთეულზე. კვლევებმა აჩვენა, რომ Li-Fi-ს შეუძლია უზრუნველყოს მინიმუმ 10-ჯერ უფრო მაღალი ASE ვიდრე RF ფემტო ფიჭების სისტემას. რაც შეეხება ჰიბრიდულ Li-Fi და ფემტო ფიჭების სისტემას, მას შეუძლია გაზარდოს ASE, მინიმუმ, ორჯერ ავტონომიურ RF ქსელთან შედარებით. ასევე გაანალიზებული იყო HLW ქსელების ASE. დადგინდა, რომ მცირე ბლოკირებამ შეიძლება სასარგებლო გავლენაც კი იქონიოს ASE-ზე, რადგან წინააღმდეგობებმა შეიძლება უფრო მეტად დაბლოკონ ინტერფერენციები, ვიდრე სასურველი ოპტიკური სიგნალები.

### **3.3.3 ენერგეტიკული ეფექტიანობა და ქსელის გამტარუნარიანობა**

მიუხედავად იმისა, რომ AP-ების განთავსების სიმჭიდროვის გაზრდა ხელს შეუწყობს ASE-ს გაუმჯობესებას, ენერჯის მოხმარების ღირებულება ასევე სწრაფად იზრდება. ამრიგად, ენერგოეფექტიანობა გადაიქცა ძალიან მნიშვნელოვან საკითხად ულტრამჭიდრო ქსელებში. არსებობს კომპრომისი ენერგოეფექტიანობასა და სპექტრულ ეფექტიანობას შორის, რადგან უფრო მაღალი სპექტრული ეფექტიანობა მოითხოვს მეტ ენერგეტიკულ დანახარჯს ბიტზე. ლიტერატურაში შესწავლილია OFDM-ზე დაფუძნებული VLC სისტემების ენერგოეფექტიანობა და ნაჩვენებია, რომ ACO-OFDM უფრო ენერგოეფექტიანია, ვიდრე DCO-OFDM, როდესაც სპექტრული ეფექტიანობა დაბალია, მაგალითად, როდესაც ის 2 ბიტი/წმ/ჰც-ზე ნაკლებია. მომხმარებელთა სხვადასხვა ქსელზე გადართვის შესაძლებლობის გამო HLW ქსელებს აქვთ ენერგოეფექტიანობის გაუმჯობესების პოტენციალი. ეს შეიძლება ჩამოყალიბდეს სიხშირის გატარების ზოლის და ენერჯის განაწილების ოპტიმიზაციის პრობლემად HLW ქსელების ენერგოეფექტიანობის მაქსიმალურად გაზრდის მიზნით. ამ მიდგომის გამოყენებით, ნაჩვენებია, რომ ჰიბრიდული RF/VLC ქსელის მაჩვენებელი ავტონომიურ RF სისტემასთან შედარებით შეიძლება გაუმჯობესდეს 75%-მდე. ასევე გაანალიზდა გამჭოლი ენერგოეფექტიანობა ჰეტეროგენული Li-Fi და RF ქსელისთვის და დადგინდა, რომ Li-Fi ატოფიჭის AP-ების გამოყენებამ შეიძლება შეამციროს ენერჯის საერთო მოხმარება თითქმის 10%-ით შენობებს შიგნით ფუნქციონირებად მილიმეტრული ტალღების უსადენო ტექნოლოგიასთან შედარებით.

უსადენო ქსელებთან მიმართებაში ქსელის გამტარუნარიანობა ზომავს მონაცემების გადაცემის მაქსიმალურ მისაღწევ ჯამურ სიჩქარეს, რომელიც შეიძლება რეალიზებულ იქნეს ქსელში გარკვეული შეზღუდვებით, რაც, როგორც წესი, არის მოთხოვნა ბიტის მეცდომით მიღების ალბათობაზე. ეს მანასიათებელი უმთავრესია ქსელის გამართული მუშაობის უზრუნველსაყოფად. სხვადასხვა ტიპის უსადენო ტექნოლოგიების ინტეგრაციის წყალობით HLW ქსელებს შეუძლიათ გაზარდონ ქსელის გამტარუნარიანობა, განსაკუთრებით იმ სქემაში, სადაც Wi-Fi AP-ები მჭიდროდაა განლაგებული. გარდა ამისა, Wi-Fi-ის არსებობამ შეიძლება შეამციროს Li-Fi-ის გამტარუნარიანობის დეგრადაცია, რომელიც გამოწვეულია სინათლის გზის ბლოკირებით. ბოლო წლების განმავლობაში HLW ქსელის გამტარუნარიანობის მაქსიმიზაციამ დიდი ყურადღება მიიპყრო კვლევების თვალსაზრისით, რაც გამოწვეულია Li-Fi-ისა და Wi-Fi-ის მიერ დაფარული ზონების გადაფარვით. ეს ოპტიმიზაციის პროცესი არსებითად მოიცავს დატვირთვის დაბალანსებას, რომელიც დეტალურადაა განხილული 3.7 პარაგრაფში.

### **3.3.4 მომსახურების ხარისხი და მომხმარებლის სამართლიანობა**

მამინ, როდესაც PHY ფენის მაჩვენებლები კონცენტრირებულია ბიტებზე, ქსელურ ფენაში პაკეტები მონაცემთა რაოდენობრივ ერთეულს წარმოადგენს. პაკეტების რამდენიმე ასპექტი, მათ შორის გამტარუნარიანობა, პაკეტების დაკარგვის კოეფიციენტი, შეყოვნება და ჯიტერი, ჩვეულებრივ გათვალისწინებულია მომსახურების ხარისხის (QoS) გაზომვის პროცესში. შენობებს შიგნით განთავსებული მომავალი უსადენო ქსელი ხელს შეუწყობს გამოყენებათა მრავალფეროვან QoS მოთხოვნებს. მაგალითად, ჰოლოგრაფიული 3D ეკრანი მოითხოვს მონაცემთა გადაცემის ძალიან მაღალ, 10 გბიტ/წმ-ზე მეტ სიჩქარეს, ხოლო ავტომატიზებული მართვადი ავტომობილის პოზიციონირებას ესაჭიროება ულტრადაბალი შეყოვნება, 1 მლწმ-ის ქვემოთ. ამასობაში, საგანთა ინტერნეტის გავრცელება მნიშვნელოვნად ზრდის მოწყობილობების რაოდენობას. რაც უფრო მჭიდროდაა მოწყობილობები განთავსებული, მით უფრო მაღალია საშუალო შეყოვნება და ჯიტერი, რაც ზღუდავს ისეთ გამოყენებათა ტიპებს, რომელთა მხარდაჭერა შესაძლებელია მხოლოდ მაღალი სიმჭიდროვის Wi-Fi-ის საშუალებით (ადგილმდებარეობა შეიძლება კლასიფიცირდეს როგორც მაღალი სიმჭიდროვის, თუ AP-ს 30-ზე მეტი მომხმარებელი უკავშირდება). ჩატარებული კვლევა აჩვენებს, რომ Li-Fi-ის მონაწილეობით HLW ქსელებს შეუძლიათ მნიშვნელოვნად გააუმჯობე-

სონ პაკეტების მიღების მაქსიმალური სიჩქარე და, ასევე, შეამცირონ შეყვინება.

ყველა ზემოაღნიშნული მახასიათებელი კონცენტრირებულია ქსელის მთლიან მუშაობაზე. პრაქტიკაში, მომხმარებლებს შეიძლება ჰქონდეთ განსხვავებული მოთხოვნები გამტარუნარიანობის, შეყვინების, სამომხმარებლო გამოცდილებისა და ა.შ. მიმართ და, შესაბამისად, აუცილებელია იმის უზრუნველყოფა, რომ თითოეულმა მომხმარებელმა მიიღოს სისტემის რესურსების სამართლიანი წილი. ტიპური გაზომვები მოიცავს ჯეინის სამართლიანობის ინდექსს, მაქსიმალურ-მინიმალურ (Max-min) სამართლიანობას და გამოცდილების ხარისხის (QoE) სამართლიანობას. მათ შორის ჯეინის სამართლიანობის ინდექსი, რომელიც აფასებს მომხმარებელთა მიმართ გამტარუნარიანობის სამართლიანობას, ფართოდაა გამოყენებული თანამედროვე ლიტერატურაში. მხოლოდ ქსელის გამტარუნარიანობის მაქსიმუმაცია გამოიწვევს რესურსების განაწილების უპირატესობას ხმოვანი არხის ხარისხის მქონე მომხმარებლებისთვის. ეს უსამართლობა განსაკუთრებით მკვეთრადაა გამოხატული HLW ქსელებში, როდესაც მომხმარებელთა დიდი რაოდენობა კონკურენციას უწევს ერთმანეთს შეზღუდული Wi-Fi რესურსების მოსაპოვებლად. მომხმარებლის სამართლიანობის ასამაღლებლად, HLW ქსელებში რესურსების გამოყოფისთვის, როგორც წესი, გათვალისწინებულია პროპორციული სამართლიანობის სქემები. ამ საკითხის დეტალური განხილვა მოცემულია 3.7 პარაგრაფში.

### 3.4 მომხმარებლის ქცევის მოდელირება

როგორც ადრე აღვნიშნეთ, Li-Fi-სთან დაკავშირებული ჰიბრიდული ქსელების სისტემის მუშაობაზე არსებით გავლენას ახდენს მომხმარებელთან დაკავშირებული ფაქტორები, მათ შორის მომხმარებლის მობილურობა, მოწყობილობის ორიენტაცია და სინათლის გზის ბლოკირება. ამ ფაქტორებს ერთობლივად უწოდებენ მომხმარებლის ქცევას. ამ პარაგრაფში განხილულია Li-Fi-სთან დაკავშირებულ ქსელებში მომხმარებლის ქცევის მახასიათებლების მოდელირება.

#### 3.4.1 მომხმარებლის მობილურობა

მობილურობის მოდელირება კარგად არის შესწავლილი უსადენო სპეციალიზებული (Ad Hoc) ქსელების მახასიათებლების განხილვის პროცესში. იმ გარემოებაზე დამოკიდებულებით, აქვს თუ არა მოძრაობას მენსიერება და/ან შეზღუდვა, ამ მოდელირების კლასიფიკაცია შესაძლებელია სამ

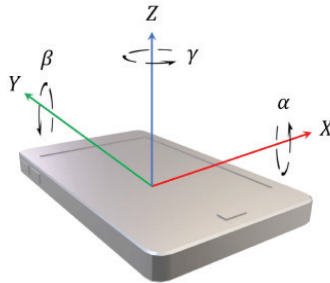
კატეგორიად: შემთხვევითი მოდელები, მოდელები დამოკიდებულებით და მოდელები გეოგრაფიული შეზღუდვებით. შენობებს გარეთა მობილურობასთან შედარებით, შენობებს შიგნით (შიდა) მობილურობა უფრო შემთხვევითი და ცვალებადია. ლიტერატურაში შემოთავაზებულ იქნა მობილურობის გაუმჯობესებული მოდელები შიდა გამოყენებისთვის, მაგალითად, წესზე დაფუძნებული მოდელი, რომელიც ახდენს რეალისტური შიდა მოძრაობების იმიტირებას რამდენიმეოთახიანი შენობის შიგნით, სადაც მომხმარებლები კონკრეტული გზებით დადიან ერთი ოთახიდან მეორეში. ამასთან, ეს მოდელები განიხილავენ სპეციფიკურ გარემოს, რაც ართულებს უსადენო ქსელის ზოგადი მუშაობის შეფასებას. ამჟამინდელ ლიტერატურაში შემთხვევითი მოდელები როგორც ალტერნატივა, ფართოდ არის გამოყენებული HLW ქსელების მუშაობის მანასიათებლების გასაზომად. შემთხვევითი საგზაო წერტილის (RWP) მოდელი თავდაპირველად დაინერგა ადამიანის მოძრაობათა შემთხვევითი მეთოდით მოდელირებისთვის. მომხმარებელი ზიგზაგის წყობის ხაზების გასწვრივ გადაადგილდება ერთი პუნქტიდან მეორეში, თანაც საგზაო წერტილები ნაწილდება შემთხვევითი წესით. გზის ორ მიმდევრობით წერტილს შორის მომხმარებელი მოძრაობს წინ სწორ ხაზზე და მუდმივი სიჩქარით. თავდაპირველი RWP მოდელის საშუალებით მომხმარებელი დახტიალებს შენობებს გარეთა (გარე) დიდ არეალში და ცვლის სიჩქარეს თითოეულ გზის წერტილში მისვლისას. ამასთან, შიდა გამოყენებებში ორ საგზაო წერტილს შორის მანძილი შედარებით მცირეა. მოდიფიცირებული RWP მოდელი რეალიზებადია მოკლე დროში მუდმივი სიჩქარის შენარჩუნების გზით. კვლევის შედეგები ცხადყოფს, რომ მომხმარებლის სიჩქარე დიდ გავლენას ახდენს HLW ქსელებში წვდომის წერტილის შერჩევაზე. ზოგადად, სწრაფად მოძრავ მომხმარებლებს ურჩევნიათ Wi-Fi-ის გამოყენება, ხოლო ნელა მოძრავი მომხმარებლების მომსახურება შესაძლებელია Li-Fi-ით. ჰენდოვერის პროცესში მნიშვნელოვან როლს ასრულებს მოძრაობის გზაც. ამ საკითხის დეტალური განხილვა მოცემულია 3.6 პარაგრაფში.

#### **3.4.2 მოწყობილობის ორიენტაცია**

ფოტოდირექტებს აქვთ შეზღუდული FoV, რაც ზედუდავს კუთხეებს, რომელთა მიხედვითაც მოწყობილობას შეუძლია მიიღოს ოპტიკური სიგნალები. მიმდები კუთხეების ფარგლებში, მიღებული ოპტიკური ინტენსივობა დამოკიდებულია დაცემული სინათლის მიმართულებაზე. ეს მოწყობილობის ორიენტაციას მნიშვნელოვან ფაქტორად აქცევს, რამაც



შეიძლება მნიშვნელოვნად იმოქმედოს Li-Fi-ის ლინკის მუშაობაზე. ეს საკითხი კარგად არ იყო განხილული ადრეულ კვლევებში Li-Fi-ისა და HLW ქსელების შესახებ. სხვა ტიპის სავარაუდო მოდელის არარსებობის გამო ლიტერატურაში ძირითადად განიხილებოდა მოწყობილობის ფიქსირებული ორიენტაცია. ბოლო პერიოდში ჩატარდა რამდენიმე კვლევა HLW ქსელების მუშაობის შესაფასებლად შემთხვევით ორიენტირებული მოწყობილობების შემთხვევაში, მაგალითად, ეილერის როტაციის თეორემის საფუძველზე. კერძოდ, R3 სივრცეში ბრუნვის ნებისმიერი ფორმა შეიძლება ცალსახად განისაზღვროს დეკარტის სამგანზომილებიან კოორდინატთა სისტემაში სამი დერძული ბრუნვის კომპოზიციით, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 3.5-ზე.



**ნახ. 3.5.** მობილური მოწყობილობის დერძული ბრუნვები

მოწყობილობის ორიენტაციის პირველ ემპირიულ მოდელში ავტორებმა მოახერხეს დროის რეალურ მასშტაბში დერძული ბრუნვის მნიშვნელობების მიღება სმარტფონებისგან, რომლებიც მიეკუთვნება ჩადგმულ გიროსკოპს. პოლარულ კუთხეს (ანუ კუთხეს Z დერძსა და მოწყობილობის ნორმალურ ვექტორს შორის) აქვს ლაპლასის განაწილება ჯდომის და გაუსის განაწილება სიარულისთვის. ასევე წარმოადგინეს მოწყობილობის ორიენტაციის ექსპერიმენტული გაზომვები არაკონტროლირებადი საქმიანობისთვის. აღმოჩნდა, რომ ამ შემთხვევაში მობილური მოწყობილობების პოლარული კუთხე უკეთესად შეესაბამება ლაპლასის განაწილებას, ვიდრე გაუსის განაწილებას. მოწყობილობის ორიენტაციის ცვლილებები შეისწავლეს მონაცემთა გაზომვების საფუძველზეც. აღმოჩნდა, რომ შემთხვევითი ორიენტაციის კოჰერენტობის დრო ასობით მილიწამის რიგისაა. ამ გარემოების გათვალისწინებით, შიდა ოპტიკური უსადენო არხები, რომელთა ტიპური გავრცელების

შეყოვნება ნანოწამების რიგისაა, შეიძლება განიხილებოდეს, როგორც ნელა ცვალებადი არხები. მოწყობილობის ორიენტაციის მოდელის RWP მობილურობის მოდელთან შერწყმით, შემოთავაზებულ იქნა RWP მოდელი ორიენტაციის გათვალისწინებით, რომელმაც წარმოგვიდგინა Li-Fi-ის მუშაობის ანალიზის რეალისტური და ზუსტი სტრუქტურა. ნაჩვენებია, რომ ეს მოდელი, ჩვეულებრივ RWP მოდელთან შედარებით, გაცილებით უკეთ წყვეტს HLW ქსელებში ხშირი ჰენდოვერების პრობლემას. ორიენტაციაზე გათვლილი RWP მოდელი ამის შემდეგ გამოიყენეს HLW ქსელებში მობილური ტელეფონის მომხმარებლებისთვის დატვირთვის დინამიკური დაბალანსების და დროის რეალურ მასშტაბში რესურსების განაწილების მიზნითაც.

### **3.4.3 სინათლის გზის ბლოკირება**

მილიმეტრული ტალღებისა და ტერაჰერცული კომუნიკაციების მსგავსად, Li-Fi მგრძობიარეა არხების ბლოკირების მიმართ, რაც გამოწვეულია ისეთი გაუმჭირვალე დაბრკოლებებით, როგორებიცაა კედლები, ავეჯი, ადამიანების სხეულები და ა.შ. მკვლევრებს განსაკუთრებით აინტერესებთ ადამიანის სხეულის ფაქტორი, რადგანაც ის მჭიდროდაა დაკავშირებული მობილური მოწყობილობების გამოყენებასთან. ამ შემთხვევაში, მოწყობილობის სინათლის გზა შეიძლება დაიბლოკოს მოწყობილობის მომხმარებლის და მის გარშემო მყოფი სხვა პირების მიერ. როგორც წესი, ადამიანის სხეული მოდელირდება როგორც ცილინდრული ან მართკუთხა ობიექტი. ბლოკირების ეს მოდელი შეიძლება გაერთიანდეს RWP მოდელთან ორიენტაციის გათვალისწინებით და, შედეგად, შეიქმნას ერთობლივი მოდელი მომხმარებლის ქცევის გავლენის სრულყოფილად ანალიზისთვის. ასევე ხელმისაწვდომია ბლოკირების სტატისტიკური მოდელი, რომელიც ახასიათებს ბლოკირებას წარმოქმნის სიხშირით და დაკავების ხანგრძლივობით. ეს ზომავს, შესაბამისად, თუ რა სიხშირით წარმოიშობა ბლოკირება და რამდენ ხანს გრძელდება იგი. ბლოკირების გამო მუშაობის დეგრადაციის შესამსუბუქებლად შემუშავებულია რამდენიმე მეთოდი: მაგალითად, დაფარვის არეალის გასაღივებლად იყენებენ ნახევრინტენსივობის უფრო ფართო კუთხის მქონე LED-ს, მაგრამ ამ მეთოდით წარმოიქმნება მეტი ინტერფერენციები. ალტერნატიული საშუალებაა ყველა მიმართულების მქონე მიმღები, რომელიც იყენებს ფოტოდiodებს ტელეფონის თითოეულ მხარეს და შეუძლია, იგი დაბლოკვის მიმართ მდგრადი გახადოს. რაც შეეხება HLW ქსელებს, მომხმარებელი შეიძლება გადავიდეს Wi-Fi სისტემაში, როდეს

საც განიცდის სინათლის გზის მკაცრ ბლოკირებას და ბრუნდება უკან მას შემდეგ, რაც აღდგება Li-Fi კავშირი. ეს პროცესი მოიცავს ვერტიკალურ ჰედლოვერს, რომელიც განხილულია 3.6 პარაგრაფში.

### 3.5 ინტერფერენციების მართვა

AP-ების სიმჭიდროვის გაზრდა ქსელის შემჭიდროების თვალსაზრისით მნიშვნელოვან ასპექტს და მომავალი ათწლეულის განმავლობაში უსადენო ევოლუციის მთავარ მიდგომას წარმოადგენს, თანაც ინტერფერენციების მართვას აქვს განსაკუთრებული მნიშვნელობა. Li-Fi და Wi-Fi მუშაობენ სხვადასხვა სიხშირულ სპექტრში და ერთმანეთს ინტერფერენციებს არ უქმნიან. ასევე, Wi-Fi-ის მიერ გამოყენებულ CSMA/CA-ს შეუძლია შეამციროს ერთ არხში ფუნქციონირებად AP-ებს შორის ინტერფერენციები უმნიშვნელო დონემდე. შესაბამისად, ამ პარაგრაფში ჩვენ ყურადღებას გავამახვილებთ Li-Fi-ისთვის ინტერფერენციების მართვის განხილვაზე. ეს ტექნიკა შეიძლება დაიყოს ორ ძირითად კატეგორიად: ინტერფერენციების ჩახშობად და ინტერფერენციების თავიდან აცილებად.

#### 3.5.1 ინტერფერენციების ჩახშობა

ლიტერატურაში ინტერფერენციების ჩახშობა განსაზღვრულია როგორც კლასი მეთოდებისა, რომლებიც ახდენს სასურველი ინფორმაციის დეკოდირებას და ამ ინფორმაციას იყენებს არხის შეფასებებთან ერთად მიღებული სიგნალიდან მიღებული ინტერფერენციების აღმოსაფხვრელად ან შესამცირებლად. ამ ტიპის ტექნიკა მუშაობს მიმღების მხარეს, ანუ ინტერფერენციებით დამახინჯებული სიგნალის მიღების შემდეგ.

1) წინასწარი კოდირება: წინასწარი კოდირების ტექნიკას ფართოდ იყენებენ DL-ში ინტერფერენციული სიგნალების აღმოსაფხვრელად. ძირითადი პრინციპი მდგომარეობს სინგულარულ მნიშვნელობებზე დეკომპოზიციის გზით ორთოგონალური არხების ხელოვნურად შექმნაში. ოპტიკური სიგნალების არაუარყოფითობის გამო წინასწარი კოდირების ტრადიციული ტექნიკა უნდა შეიცვალოს Li-Fi-ს შესატყვისად, მაგალითად, მუდმივი დენის წანაცვლების ვექტორის დამატებით. კოდირების ტექნიკა შეიძლება დაიყოს ორ ქვეკატეგორიად: მრავალმომხმარებლიან დეტექტირებად (MUD) და კოორდინირებულ მრავალწერტილიან (CoMP) გადაცემად. MUD მიზნად ისახავს, ჩაახშოს ინტერფერენციები ერთსა და იმავე AP-ში თანაარხის მომხმარებლებს შორის. ნაჩვენებია, რომ ბლოკური დიაგონალიზაციის მეთოდის გამოყენებით, SINR-ის მნიშვნელობა

20 დბ შეიძლება მიღწეულ იქნეს ორი VLC მომხმარებლისთვის შიდა სივრცის უმეტეს ნაწილში, როდესაც ერთი LED-ის სიმძლავრეა 10 მლვტ. სიმძლავრის იმავე დონისთვის, ნულოვან იძულებაზე დაფუძნებული მეთოდით VLC სისტემას შეუძლია მიაღწიოს SINR-ის მნიშვნელობას 30 დბ უფრო მჭიდროდ განლაგებული AP-ებით. ასევე აჩვენებს, რომ ნულოვანი იძულებით ACO-OFDM იძლევა DCO-OFDM-ზე უკეთეს მახასიათებლებს დაბალი ოპტიკური სიმძლავრისთვის და იმავე ტენდენციას აქვს ადგილი, როდესაც არ იყენებენ წინასწარ კოდირებას. ასევე შეისწავლეს ოპტიკური ადაპტიური წინასწარი კოდირება, რაც ახშობს მხოლოდ დესტრუქციულ ინტერფერენციებს. CSI-ზე დამოკიდებულების შემცირებით, ეს მეთოდი უფრო რობასტულია არაზუსტი CSI-ისთვის, ვიდრე არხის ინვერსიის წინასწარი კოდირება. ფიჭებს შორის ინტერფერენციების (ICI) აღმოფხვრის მიზნით, CoMP მოითხოვს კოორდინაციას AP-ებს შორის CSI-ს შესახებ ცოდნის გაცვლის მიზნით. შესაბამისი კვლევა ჩატარდა Li-Fi-ისთვის, მომხმარებელთა დაჯგუფებისა და სხივების კოორდინირებული ფორმირების ინტერესების გათვალისწინებით. წინასწარი კოდირების მეთოდები ეყრდნობა ყველა თანაარხის მომხმარებლებისთვის არხის მდგომარეობის შესახებ ინფორმაციას გადამცემში (CSIT). თუმცა, Li-Fi-ის UL ჩვეულებრივ იყენებს ინფრაწითელ დიაპაზონს, როდესაც განათება არ არის საჭირო, რაც ქმნის დუპლექსურ სისტემას სიხშირული დაყოფით. შედეგად, Li-Fi-ის წინასწარი კოდირების ტექნიკის გამოყენებას მივყავართ უკუკავშირის მოცულობით სისტემამდე. ეს საკითხი ჯერ კიდევ არ არის სათანადოდ განხილული თანამედროვე ლიტერატურაში. გარდა ამისა, არაზუსტი CSI გააუარესებს წინასწარი კოდირების მუშაობის მახასიათებლებს. ეს პრობლემა უფრო გამოხატულია Li-Fi-ში, ვინაიდან მოწყობილობის ორიენტაციის სწრაფმა ცვლილებებმა შეიძლება გამოიწვიოს სწრაფად ცვალებადი არხები. შესაბამისად, Li-Fi-ისთვის წინასწარი კოდირების ტექნიკის გამოყენების პრაქტიკულობა ჯერ კიდევ არ არის დადასტურებული.

2) ინტერფერენციების ბრმა გასწორება: როდესაც გადამცემში ზუსტი CSI არ არის ხელმისაწვდომი, ინტერფერენციების ბრმა გასწორება (BIA) შეიძლება მიღწეულ იქნეს დროის მიხედვით სელექციური მომხმარებლის სიხშირის მიხედვით სელექციურ მომხმარებელთან დაწყვილებით. აქ ძირითადი იდეა მდგომარეობს თანაარხებში ფუნქციონირებადი მომხმარებლების თავისუფლების ხარისხის მაქსიმალურად გაზრდაში და ეს ხორციელდება გადაცემული სიგნალების შენიღბვის მეშვეობით არხის კოჰერენტულობის საფუძველზე. წინასწარი კოდირებისგან გან-

სხვაგვებით, BIA-ს შეუძლია, მხოლოდ გარკვეულწილად შეამციროს ინტერფერენციები. ვინაიდან BIA-ისთვის არხის კოჰერენტულობის პირობა შეიძლება ყოველთვის არ დაკმაყოფილდეს, საჭირო ხდება არხის მანიპულირება. RF სისტემებში ეს ხდება რეკონფიგურირებადი ანტენებით, რაც მიმღებს საშუალებას აძლევს, აწარმოოს გადართვა სხვადასხვა ანტენას შორის. რაც შეეხება Li-Fi-ს, ის იყენებს ფოტოდiodებს, როგორც მიმღებ ანტენებს. რამდენიმე კვლევა ჩატარდა Li-Fi-ში BIA-ს გამოყენების თვალსაზრისით. თითოეული მომხმარებლის ერთი ფოტოდiodითა და მრავალი ოპტიკური ფილტრით აღჭურვილ, BIA სქემა მოითხოვს 3-5 დბ-ით ნაკლებ ოპტიკური გადამცემის სიმძლავრეს, ვიდრე TDMA. ასევე შეისწავლეს BIA-ს მახასიათებლები HLW ქსელში, რამაც აჩვენა, რომ Li-Fi ფიჭის საზღვარზე განლაგებული მომხმარებლების Wi-Fi-ზე გადაყვანამ შეიძლება BIA-ს მისცეს უფრო დიდი მოგება TDMA-სთან შედარებით. თუმცა, BIA-ს აქვს უკეთესი მახასიათებლები, ვიდრე TDMA-ს მხოლოდ მაღალი ოპტიკური გადამცემი სიმძლავრის დიაპაზონში, მაგალითად, 50 დბმ-ზე ზემოთ. LED სიმძლავრის ასეთი მაღალი დონე არ არის შესაფერისი განათებისთვის, რაც ზღუდავს BIA-ს გამოყენებას Li-Fi-სთვის.

3) ინტერფერენციების მიმდევრობითი ჩახშობა: ინტერფერენციების მიმდევრობითა ჩახშობამ (SIC) შეიძლება განახორციელოს თანაარხების სიგნალების დექუტირება მათი განსხვავებული სიმძლავრის დონეების გარჩევის საფუძველზე. აღსანიშნავია, რომ, როდესაც ენერჯის მართვა ხორციელდება Li-Fi-ში, განათების მოთხოვნები უნდა დაკმაყოფილდეს. ვინაიდან ოპტიკური სიგნალების მხოლოდ ცვლადი დენის კომპონენტი გარდაიქმნება ეფექტიან ელექტრულ სიგნალად, შესაძლებელია ცვლადი დენის კომპონენტის რაოდენობის კორექტირება გადაცემის საშუალო ოპტიკური სიმძლავრის იმავე დონის შენარჩუნებით. ლიტერატურაში შესწავლილია ენერჯის მართვა, როდესაც მომხმარებელს ემსახურება მრავალი AP, სადაც თითოეული AP შედგება ვიწრო FoV-ის მქონე LED-ებისგან. ამ მეთოდს შეუძლია უზრუნველყოს 2 – 5 დბ-ით უფრო მეტი SINR ვიდრე ეს გვაქვს TDMA-ს შემთხვევაში. ვინაიდან SIC თითო ეტაპზე ამჟღავნებს ერთ მომხმარებელს, გამოთვლითი სირთულე და შეყოვნება პირდაპირპროპორციულ კავშირშია თანაარხის მომხმარებლების რაოდენობასთან. გარდა ამისა, ინტერფერენციების პარალელური ჩახშობა (PIC) ამჟღავნებს ყველა მომხმარებელს ერთდროულად და მას შეუძლია შეამციროს შეყოვნება გაზრდილი სირთულის ფასად. რაც შეეხება Li-Fi-ს, აქ SIC-ის გამოყენება უფრო სასურველია ვიდრე PIC-ისა, რადგან თითოეული Li-Fi AP მოიცავს შედარებით მცირე ტე-

რიტორიას და, სავარაუდოდ, ემსახურება მხოლოდ რამდენიმე მომხმარებელს. მრავალჯერადი წვდომის მისაღწევად SIC-ის გამოყენება ქმნის NOMA-ის კონცეფციას. გასათვალისწინებელია ის გარემოება, რომ SIC-ზე დაფუძნებული მეთოდები უყრდნობა თანაარხის მომხმარებლების შესაბამის წყვილს, რომელიც შეიძლება ყოველთვის არ გვქონდეს ულტრამჭიდრო ქსელებში, ერთ ფიჭაში მომხმარებელთა სიმეჩხრის გამო.

4) სპეციალურად შემუშავებული მეთოდები: არსებობს ინტერფერენციების ჩახშობის ორი მეთოდი, რომლებიც სპეციალურადაა შემუშავებული Li-Fi-სთვის: ADR და პოლარიზაციის ტექნიკა. როგორც უკვე აღინიშნა, ADR იყენებს მრავალ ვიწრო FoV-ის მქონე ფოტოდიოდს ერთი ფართო FoV-ის მქონე ფოტოდიოდის ნაცვლად, იმისათვის, რომ შემცირდეს ინტერფერენციები თითოეულ ფოტოდიოდში. ლიტერატურაში შესწავლილია სიგნალის კომბინირების სხვადასხვა სქემის მახასიათებლები ADR-სთვის, მათ შორის საუკეთესო კომბინირების შერჩევა, თანაბარი მოგების კომბინირება, მაქსიმალური თანაფარდობით კომბინირება და ოპტიმალური კომბინირება. ნაჩვენებია, რომ ოპტიმალური კომბინირებით ADR-ს შეუძლია მიაღწიოს SINR-ის მახასიათებლებს, რომლებიც ახლოსაა ინტერფერენციების გარეშე მომუშავე სისტემების მახასიათებლებთან. ასევე, შეისწავლეს სქემა, სადაც წინასწარი კოდირება ნულოვანი იძულებით გაერთიანდა ADR-თან. ამ მიდგომამ შეიძლება შესამჩნევად გააუმჯობესოს SINR-ის მნიშვნელობა, განსაკუთრებით Li-Fi-ს ფიჭის საზღვარზე განლაგებული მომხმარებლებისთვის. შესწავლილია ADR-ის ოპტიმალური სტრუქტურაც, რომელიც დამოკიდებულია ფოტოდიოდების რაოდენობასა და LED-ების განლაგებაზე. ნაჩვენებია, რომ გვერდითი ფოტოდიოდების შესაბამისი დახრის კუთხის არჩევას შეუძლია, დიდი გავლენა მოახდინოს SINR-ზე და ფლუქტუაციის დიაპაზონი შეადგენს 20 დბ-ს. მიუხედავად იმისა, რომ ვიწრო FoV-ის მქონე ფოტოდიოდებს შეუძლიათ თავიდან აიცილონ ინტერფერენციები, ისინი მგრძნობიარე არიან მოწყობილობის ორიენტაციის ცვლილების მიმართ. ჯერჯერობით ADR-ის ეფექტიანობის შემოწმება რეალურ მობილურ გარემოში არ არის განხილული არსებულ ლიტერატურაში.

სინათლის პოლარიზაციის თვისება ასევე შეიძლება გამოყენებულ იქნეს ინტერფერენციების ჩახშობის მიზნით დიფერენციალური დეტექტირების განხორციელების პროცესში. კერძოდ, პერპენდიკულარული მიმართულების ორი პოლარიზებული ოპტიკური სიგნალი არ უშლის ხელს ერთმანეთს, რაც წარმოქმნის მულტიპლექსირებას ორთოგონალური დაყოფით. შეისწავლეს მიმღებში ინტერფერენციების ჩახშობა

პოლარიზაციის განსხვავებული ფილტრის მქონე ორი ფოტოდiodის გამოყენებით. ამგვარი მეთოდი შემოთავაზებული იყო არაპოლარიზებული ოპტიკური ინტერფერენციებისადმი წინააღმდეგობის გაწევის მიზნითაც. ეს მდგომები არ საჭიროებს დამატებით უკუკავშირს CSI-ის გაცვლის მიზნით, თუმცა ისინი ეყრდნობიან პოლარიზაციის მიმართულებების სრულყოფილ გასწორებას გადამცემსა და მიმღებს შორის. სამწუხაროდ, ყოველივე ეს დღეის მდგომარეობით შესაძლებელია მხოლოდ ლაბორატორიულ ექსპერიმენტებში და პრაქტიკაში მისი განხორციელება საკმაოდ რთულია.

### **3.5.2 ინტერფერენციების თავიდან აცილება**

ინტერფერენციების თავიდან აცილება განეკუთვნება ისეთ მეთოდებს, რომლებსაც იყენებენ გადამცემის მხარეს. ამ მეთოდებს შორისაა ორთოგონალური დაყოფის სქემები, მათ შორის TDMA, OFDMA და მრავალჯერადი წვდომა არხების სივრცითი დაყოფით (SDMA). ზოგიერთი კვლევა ენერჯის მართვასაც განიხილავს როგორც ინტერფერენციების თავიდან აცილების მეთოდს. ამასთან, ამ ტიპის მეთოდი ვერ მუშაობს SIC-ის გარეშე და, შესაბამისად, მას განიხილავენ, როგორც SIC-ზე დაფუძნებულ ინტერფერენციების ჩახშობას. ინტერფერენციების თავიდან აცილების სხვა მეთოდებში შედის სიხშირის განმეორებითი გამოყენება და გადახტომები სიხშირის/დროის მიხედვით.

1) სიხშირეების განმეორებითი გამოყენება: სიხშირის განმეორებითი გამოყენება (FR) ფართოდ გავრცელებული მეთოდია მეზობელ ფიჭებს შორის ICI-ის თავიდან ასაცილებლად, სადაც სიხშირეებს ხელახლა იყენებენ რეგულარული სქემით. რამდენიმე კვლევა ჩატარდა FR-ის Li-Fi-ზე მისადაგების თვალსაზრისით. მაგალითად, შესრულდა ექსპერიმენტული სამუშაო Li-Fi-ში FR-ის გამოყენების დემონსტრირების მიზნით სამ AP-ს შორის, რომლის დროსაც მიაღწიეს მონაცემთა გადაცემის ჯამურ სიჩქარეს 0.5 მბიტ/წმ. ასევე გააანალიზეს სიხშირის ფრაქციული განმეორებითი გამოყენება (FFR) Li-Fi-ისთვის, „მკაცრი“ FFR-ით და სიხშირის „რბილი“ განმეორებითი გამოყენებით (SFR). პირველი სქემა ანაწილებს ფიჭის არეალს სამ თანაბარ სექტორად, ხოლო მეორე უზრუნველყოფს ორიარუსიან ფიჭურ სტრუქტურას. „მკაცრი“ FFR-თან შედარებით, SFR უფრო მოქნილია და, ამდენად, შეუძლია მიაღწიოს სიხშირეების ხელახლა გამოყენებას უფრო მაღალი კოეფიციენტით და ინტერფერენციების ჩახშობის იმავე შესაძლებლობებით. AP-ების განსხვავებული სიმჭიდროვის გათვალისწინებით, ასევე შემოთავაზებულ იქნა დინამიკური

SFR სქემა, სიხშირული სპექტრის რეგულირებადი განაწილების გამოყენებით. ეს სქემა არსებითად ქმნის SFR-თან შედარებით უფრო მოქნილ ფიჭურ სტრუქტურას.

2) სიხშირის/დროის მიხედვით გადახტომები: გადახტომის ეს მეთოდები სწრაფად გადართავენ სიგნალის გადამტანს მრავალ სიხშირულ არხზე ან დროის მონაკვეთებში, ფსევდომემთხვევითი თანმიმდევრობის გამოყენებით, რომელიც ცნობილია როგორც გადამცემის, ასევე მიმღებისთვის. ლიტერატურაში შესწავლილია Li-Fi-ისთვის დროის მიხედვით გადახტომის მეთოდი, სადაც ოპტიკური გადამტანის პერიოდი და სამუშაო ციკლი იცვლება ფსევდომემთხვევითი გზით. მიუხედავად იმისა, რომ ამ ტიპის მეთოდს შეუძლია შეამციროს ორი მომხმარებლის მიერ ერთი და იმავე სიხშირული ბლოკის დაკავების ალბათობა, ის მოითხოვს მკაცრ სინქრონიზაციას გადამცემსა და მიმღებს შორის.

### **3.5.3 ინტერფერენციების მართვასთან დაკავშირებული საკითხების შეჯამება**

Li-Fi AP-ების მართვა შესაძლებელია ცენტრალიზებულად, რადგან ისინი განლაგებულია ერთსა და იმავე ოთახში, რაც Li-Fi-ს უფრო მეტ შესაძლებლობებს აძლევს ინტერფერენციების მართვის თვალსაზრისით. მეორე მხრივ, Wi-Fi უნდა დაეყრდნოს გადამტანების ზონდირებას და თავიდან აიცილოს კონფლიქტები. სპეციალურად გამოყოფილი ბექჰოლის საშუალებით, ცენტრალიზებულ Li-Fi სისტემას შეუძლია გაამარტივოს წინასწარი კოდირების რეალიზაცია. მაგრამ Li-Fi არხები შეიძლება სწრაფად იცვლებოდეს, რაც აუარესებს წინასწარი კოდირების შესაძლებლობებს. შედეგად, არხის ცვალებადობა უნდა იქნეს გათვალისწინებული Li-Fi-ის წინასწარი კოდირების სქემების შემუშავებისას. ცენტრალიზებული სისტემებიც უწყობენ ხელს სპექტრის დაგეგმვას FR-ში და მათ შეუძლიათ გამოიყენონ Li-Fi-ისთვის ხელმისაწვდომი ფართო სიხშირული სპექტრი. თუმცა FR-ის ზედმეტად გართულებული სტრუქტურა აუარესებს რესურსების განაწილების პრობლემას.

Li-Fi AP-ები, როგორც წესი, მჭიდროდაა განლაგებულნი და მათ შორის დაშორება 2-3 მეტრია. ეს ADR-ს აქცევს პერსპექტიულ მიდგომად ინტერფერენციების თავიდან აცილების პროცესში. ADR-ს ასევე შეუძლია გააუმჯობესოს მიღებული სიგნალის სიმძლავრე, რადგან ფოტოდირექციის მგრძობიანობა დამოკიდებულია დაცემული სიგნალის მიმართულებაზე. ამის საპირისპიროდ, ერთი ფართო FoV-ის მქონე ფოტოდირექციის არ იმუშავებს კარგად, როდესაც ის მნიშვნელოვნად არის დახრილი. ეს



ასტიმულირებს ერთდროულად მრავალი ფოტოდიოდის გამოყენებას ყველა მიმართულების მქონე მიმღების შესაქმნელად. Li-Fi-ის მჭიდრო განლაგება ასევე ზრდის არეალის მიხედვით სპექტრულ ეფექტიანობას, როდესაც იყენებენ FR-ს. იმავდროულად, ტიპურ შიდა გამოყენებებში, როგორებიცაა ოფისი და სახლი, ფუნქციონირებენ მცირე რაოდენობის მომხმარებლები. ამ მიზეზით, სიხშირული სპექტრის რეგულირებად გამოყოფას შეუძლია FR უფრო ეფექტიანი გახადოს Li-Fi-ისთვის.

მიუხედავად იმისა, რომ Wi-Fi და Li-Fi არ უქმნიან ინტერფერენციებს ერთმანეთს, ეს არ ნიშნავს, რომ Wi-Fi გავლენას არ ახდენს Li-Fi-ის მიერ ინტერფერენციების მართვაზე. შესაბამისად, HLW ქსელების მომხმარებლების ასოციაციას შეუძლია დაენმაროს Li-Fi-ის ინტერფერენციების შემსუბუქებაში, მაგალითად, კონფლიქტების გრაფების თეორიაზე დაყრდნობით. AP-ს შერჩევა Li-Fi-ისა და Wi-Fi-ის შორის HLW ქსელებისთვის მთავარი საკითხია და განვიხილავთ შემდეგ პარაგრაფებში. მომხმარებლების ასოციაციის დადგენის შემდეგ, რესურსების შესაბამისმა განაწილებამ ქვეარხის ან დროის მონაკვეთის მიხედვით, ასევე შეიძლება გააუმჯობესოს ინტერფერენციებთან დაკავშირებული სიტუაცია. ამგვარად, Li-Fi-ისთვის ინტერფერენციების მართვა უნდა შეესაბამებოდეს მომხმარებელთა ასოციაციის მოთხოვნებს და რესურსების განაწილებას HLW ქსელის სრულ სურათში.

### 3.6 ჰენდოვერი

ზოგადად, ჰიბრიდულ ქსელში ჰენდოვერის პროცესი იყოფა ორ კატეგორიად: ჰორიზონტალურ ჰენდოვერად (HHO) და ვერტიკალურ ჰენდოვერად (VHO). HHO ხორციელდება უსადენო წვდომის ერთი ტექნოლოგიის სფეროში, ხოლო VHO ხორციელდება სხვადასხვა ტექნოლოგიას შორის. VHO-ის გამოყენებისას საეთერო ინტერფეისი იცვლება, მაგრამ მარშრუტი დანიშნულების ადგილისკენ იგივე რჩება. ლიტერატურაში ზოგან შემოღებულია მესამე კატეგორია, სახელწოდებით დიაგონალური ჰენდოვერი, სადაც შეცვლილია როგორც საეთერო ინტერფეისი, ასევე მარშრუტი დანიშნულების ადგილამდე. დღეისთვის ჩატარებულია მნიშვნელოვანი კვლევები ჰეტეროგენული ქსელებისთვის ჰენდოვერის გამოყენების თემაზე. ლიტერატურაში განხილულია ჰენდოვერის სხვადასხვა ტიპის სქემები, რომლებიც შემუშავებულია მიღებული სიგნალის სიმძლავრის (RSS) საფუძველზე, დატვირთვის დაბალანსებასთან დაკავშირებული და ენერჯის დაზოგვასთან დაკავშირებული საკითხების გათვალისწინებით. ჰენდოვერის პროცესის შემუშავება HLW ქსელებში

უფრო რთულია, ვიდრე ჰეტეროგენულ ქსელებში დაფარვის მცირე არეალის გამო, განსაკუთრებით Li-Fi AP-ების შემთხვევაში. ამ პარაგრაფში ჩვენ მიმოვიხილავთ მიმდინარე ლიტერატურას, რომელიც შეისწავლის: HHO-ს Li-Fi-ში, VHO-ს Li-Fi-ისა და Wi-Fi-ის შორის და HHO-სა და VHO-ს შორის უკეთესის შერჩევას.

### 3.6.1 ჰორიზონტალური ჰენდოვერი

Li-Fi-ს ერთი AP-ით აქვს შედარებით მცირე დაფარვის დიაპაზონი, ჩვეულებრივ 2-3 მეტრი დიამეტრით. ულტრააპატარა ფიჭა აიძულებს Li-Fi-ს, აწარმოოს საკმაოდ ხშირი ჰენდოვერები, მაშინაც კი, როდესაც მომხმარებელი ზომიერი სიჩქარით მოძრაობს. ასევე, Li-Fi არხი დაკავშირებულია ფოტოდiodის მიმღებ ორიენტაციასთან, რომლის ცვლილებაც შეიძლება იყოს ძალიან სწრაფი და უეცარი. ამან შეიძლება გამოიწვიოს ხშირი და მოულოდნელი ჰენდოვერები. ამრიგად, ჰენდოვერის ღირებულება ხდება კრიტიკული ფაქტორი Li-Fi-ში. ჰენდოვერების გათვალისწინებით, AP-ებს შორის სეპარაციის მანძილი გავლენას ახდენს ქსელის გამტარუნარიანობაზე ორ ასპექტში. ერთი მხრივ, მცირე სეპარაცია უზრუნველყოფს მოცემულ ფართობზე უფრო მაღალ სპექტრულ ეფექტიანობას. მეორე მხრივ, უფრო დიდი სეპარაცია ჰენდოვერის სიჩქარეს ამცირებს. ამიტომ შეისწავლეს Li-Fi AP-ების ოპტიმალური განთავსება და გამოიკვლიეს ჰენდოვერის პროცედურა არაგადაფარებადი დაფარვისთვის. ეს კვლევა ვარაუდობს „რბილ“ ჰენდოვერს AP-ებისთვის არაგადაფარებადი დაფარვით და სხვა შემთხვევაში „მყარ“ ჰენდოვერს. ამ კვლევებში განხილული იყო მხოლოდ მომხმარებლის მობილურობა მიმღების ფიქსირებული ორიენტაციით. გაანალიზებული იყო ჰენდოვერის სიჩქარე, მომხმარებლის ადჟურვილობის როგორც გადაადგილების, ასევე ბრუნვის პროცესში. აღმოჩნდა, რომ ჰენდოვერის სიჩქარე პიკს აღწევს, როდესაც მომხმარებლის მოწყობილობა დახრილია 60 გრადუსიდან 80 გრადუსამდე.

მიუხედავად იმისა, რომ AP-ების ოპტიმალურ განთავსებას შეუძლია, გარკვეულწილად შეამციროს ჰენდოვერებთან დაკავშირებული ზარალი, გამტარუნარიანობის დეგრადაცია მაინც მნიშვნელოვანია სწრაფად მოძრავი მომხმარებლებისთვის. ჰენდოვერის სიჩქარის შემდგომი შემცირების მიზნით შემოიღეს ჰენდოვერის გამოტოვების კონცეფცია (HS), რაც მომხმარებელს საშუალებას აძლევს, გადავიდეს არამომიჯნავე AP-ებს შორის. შემოთავაზებულ იქნა ტოპოლოგიის შესახებ ინფორმირებული HS სქემა, რომლის საშუალებითაც მომხმარებელს შეეძლება გამოტოვოს

ის AP-ები, რომელთა ქორდის სიგრძე მოთავსებულია წინასწარ განსაზღვრული ზღურბლის ქვემოთ. ამგვარი მეთოდის გამოყენებით კვლევის სფერო შემდეგში გაფართოვდა მრავალი AP-ის ასოციაციაზე. ამ ტიპის მიდგომა უყრდნობა მომხმარებლის ტრეექტორიისა და ქსელის ტოპოლოგიის ცოდნას. ამასთან, Li-Fi-ის ეკვივალენტური ქსელის ტოპოლოგია დინამიკურია და მომხმარებელზე დამოკიდებული ფოტოდოდების მიღების ორიენტაციის გავლენით. ასევე, პოზიციონირების მეთოდებია საჭირო მომხმარებლის ტრეექტორიის შესახებ ცოდნის მისაღებად, ხოლო უკუკავშირი აუცილებელია ამ ინფორმაციის AP-ებისთვის გაზვანისთვის. ზემოაღნიშნული მკაცრი მოთხოვნების გვერდის ავლის მიზნით შეიმუშავეს RSS-ზე დაფუძნებული HS მიდგომა RSS-ის ცვლილების სიჩქარის გამოყენებით, რათა მითითებული ყოფილიყო, მიდის თუ არა მომხმარებელი გარკვეული AP-ისკენ. ეს მეთოდი იყენებს RSS-ის საშუალო შეწონილს და მისი ცვლილების მაჩვენებელს ჰენდოვერის გადაწყვეტილებათა მისაღებად და არ საჭიროებს დამატებით უკუკავშირს, ვინაიდან RSS-ს ჩვეულებრივად იყენებენ მიმდინარე გადაცემის სქემებში. თანაც, რაც მთავარია, ის არ უყრდნობა ქსელის ტოპოლოგიის ცოდნას. ნაჩვენებია, რომ RSS-ზე დაფუძნებულ HS მეთოდს შეუძლია გააუმჯობესოს ქსელის გამტარუნარიანობა, შესაბამისად, დაახლოებით 70%-ით LTE-სთან და 30%-ით ტრეექტორიაზე დაფუძნებულ HS მეთოდთან შედარებით.

### **3.6.2 ვერტიკალური ჰენდოვერი**

მომხმარებელი ჩვეულებრივ მოითხოვს VHO-ს Li-Fi-დან Wi-Fi-სკენ, როდესაც კარგავს Li-Fi კავშირს. Li-Fi კავშირის დაკარგვა შეიძლება გამოწვეული იყოს ორი მიზეზით: (ა) სინათლის გზა ბლოკირებულია ისეთი გაუმჭირვალე საგნებით, როგორცაა ადამიანების სხეულები და ავეჯი და (ბ) ფოტოდოდის მიმღები ორიენტაცია მნიშვნელოვნად გადახრილია პირდაპირი ხედვის (LoS) გზიდან. ლიტერატურაში გააანალიზეს VHO-ს აღბათობა და აჩვენეს, რომ არსებობს კომპრომისი ჰენდოვერების რაოდენობასა და მათ შეყვანებას შორის. ეს ხაზს უსვამს ჰენდოვერის პროცესში ჰისტერეზისის შესაბამისი დონის მნიშვნელობას. არაერთი კვლევა ჩატარდა VHO სქემების შემუშავების მიმართულებით Li-Fi-ით ფუნქციონირებადი ჰიბრიდული ქსელებისთვის. შემოთავაზებულია მარკოვის გადაწყვეტილების პროცესზე დაფუძნებული VHO სქემა. ეს მეთოდი Wi-Fi-ისთვის რიგის სიგრძისა და Li-Fi-ისთვის არხის მიდგომარეობის ანალიზის საფუძველზე განსაზღვრავს, უნდა განხორციელდეს თუ არა VHO.

ჰიბრიდული Li-Fi და LTE ქსელებისთვის შემოთავაზებულია კიდევ ერთი VHO სქემაც, რომელიც პროგნოზირებს სისტემის მდგომარეობას შეფერხების ხანგრძლივობის, შეტყობინების ზომისა და წვდომის შეყოვნებათა თვალსაზრისით. ეს პარამეტრები, რომლებიც ჩაწერილია მომხმარებლის ადჭურვილობის მიერ დროის რეალურ მასშტაბში, შეიძლება გამოყენებულ იქნეს ჰენდოვერით სარგებლობაზე გადაწყვეტილების მისაღებად. ამგვარი მიდგომა შეიმუშავეს ჰიბრიდული Li-Fi და ფემტო ფიჭების ქსელებისთვის, მრავალი ატრიბუტის გათვალისწინებით, ისეთებისა, როგორცაა ქსელის დინამიკური პარამეტრები (მაგალითად, შეყოვნება, რიგის სიგრძე და მონაცემთა გადაცემის სიჩქარე) და ფაქტობრივი ტრაფიკის პრეფერენცია. ზემოაღნიშნულ მეთოდებს აქვთ ერთი საერთო წერტილი: ისინი არეგულირებენ ქსელის პრეფერენციას არხისა და ტრაფიკის პირობების მიხედვით. თუმცა, ისინი არ ითვალისწინებს ჰენდოვერის ოვერჰედს და მომხმარებლის მობილურობას, რაც სხვადასხვა სახის ჰენდოვერზე ახდენს განსხვავებულ ზემოქმედებას. აღვნიშნავთ, რომ VHO-ისა და HHO-ის უპირატესობებისა და უარყოფითი მხარეების აუწონ-დაუწონავად, ძნელია HLW ქსელებისთვის ჰენდოვერის ეფექტიანი პროცესის განხორციელება.

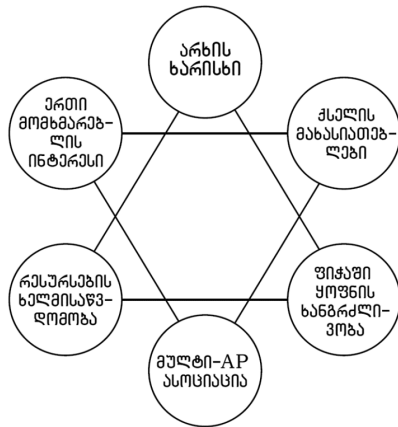
### **3.6.3 არჩევანი VHO-სა და HHO-ს შორის**

საეთერო ინტერფეისების შეცვლის გამო, VHO-ს ჩვეულებრივ დამუშავების გაცილებით მეტი დრო სჭირდება, ვიდრე HHO-ს. ასევე, Wi-Fi სისტემას აქვს უფრო დაბალი სისტემური გამტარუნარიანობა, ვიდრე Li-Fi-ის და, შესაბამისად, Wi-Fi მომხმარებლების გადაჭარბებული რაოდენობა გამოიწვევს გამტარუნარიანობის არსებით შემცირებას. ამრიგად, არჩევანს HHO-სა და VHO-ს შორის დიდი მნიშვნელობა აქვს HLW ქსელებისთვის. ამიტომ ყველა ის მომხმარებელი, რომელიც კარგავს Li-Fi კავშირს, მყისიერად არ უნდა იყოს გადართული Wi-Fi-ზე, მაგალითად, ის მომხმარებლები, რომლებისთვისაც ადგილი აქვს სინათლის გზის დროებით ბლოკირებას. ამას გარდა, მომხმარებლის სიჩქარე ასევე მნიშვნელოვანი ფაქტორია იმის გადაწყვეტაში, მომხმარებელს Li-Fi უნდა ემსახუროს თუ Wi-Fi. ზოგადად, სწრაფად მოძრავი მომხმარებლები უპირატესობას ანიჭებენ Wi-Fi-ს, რადგან მათ ხშირად უწევთ HHO-ს გამოყენება Li-Fi-ში. HHO-სა და VHO-ს შორის არჩევანთან დაკავშირებული გართულებული პრობლემის გადასაჭრელად შემოთავაზებულ იქნა ჰენდოვერის სქემა, რომელიც ეფუძნებოდა ბუნდოვან ლოგიკას (Fuzzy Logic). ეს მეთოდი იღებს გადაწყვეტილებებს ჰენდოვერის შესა-

ნებ პარამეტრების გაზომვით, რომლებიც მოიცავს არა მხოლოდ CSI-ს, არამედ მომხმარებლის გადაადგილების სიჩქარესა და მონაცემთა გადაცემის სიჩქარის მოთხოვნას. სამწუხაროდ, ეს მეთოდი არ განიხილავს Li-Fi-ში არხების ბლოკირების საკითხს. მეორე მხრივ, ბოლოდროინდელ შრომებში, სინათლის გზების ბლოკირების შესახებ სტატისტიკური ინფორმაციის გამოყენებით, ჰენდოვერის პროცესი ჩამოყალიბდა როგორც ოპტიმიზაციის პრობლემა, რომლის მიხედვითაც ხდება გამტარუნარიანობის მაქსიმიზაცია დროის განსაზღვრული პერიოდის განმავლობაში. ასეთი მეთოდი მოითხოვს შედარებით მაღალ გამოთვლით სირთულეს. ასევე შეისწავლეს Li-Fi-ში ჰენდოვერის გამოტოვების კონცეფცია, რომელიც შემდგომ მიუსადაგეს HLW ქსელებს. კერძოდ, დინამიკური ქსელის პრეფერენცია, რომელიც ადაპტირებულია მომხმარებლის გადაადგილების სიჩქარეზე, შემოიტანეს და შეისწავლეს სხვადასხვა ქსელის დაფარვის არეალის რეგულირებისთვის. ამ მიდგომას 40%-ით შეუძლია შეამციროს ჰენდოვერების რაოდენობა სიარულით და 70%-ით სირბილით გადაადგილებისას. დაბოლოს, ქსელის პრეფერენცია შესწავლილია ხელოვნური ნეირონული ქსელის საშუალებითაც, მომხმარებლის გადაადგილების სიჩქარისა და ქსელის განთავსების გათვალისწინებით. ამ მეთოდს შეუძლია, კიდევ უფრო გააუმჯობესოს ქსელის გამტარუნარიანობა და მიაღწიოს 50%-ით მეტ მოგებას, ტრაექტორიაზე დაფუძნებულ მეთოდთან შედარებით.

ზოგადად, HHO-სა და VHO-ს შორის არჩევანის პროცესი შეიძლება ორ ნაწილად დაიყოს: პირველი ნაწილი – ეს არის AP-ის შერჩევა ჰენდოვერის ღირებულების გათვალისწინებლად. ეს არის AP-ის ტიპური შერჩევის პროცესი, რომელიც საჭიროებს არხის ხარისხის და რესურსების ხელმისაწვდომობის გაზომვას. არხის მაღალი ხარისხი ნიშნავს მაღალ სპექტრულ ეფექტიანობას. ამასთან, იმ AP-ის შერჩევა, რომელიც უზრუნველყოფს არხის მაღალ ხარისხს, არ ნიშნავს მონაცემთა გადაცემის მაღალ სიჩქარეს, ვინაიდან რესურსი შეიძლება სრულად იყოს გამოყენებული. ამრიგად, რესურსის ხელმისაწვდომობა უნდა იქნეს გათვალისწინებული არხის ხარისხთან ერთად. მეორე ნაწილი არის ჰენდოვერის ღირებულების შეფასება. ფიჭაში ყოფნის ხანგრძლივობა (CDT), რომელიც განისაზღვრება როგორც დრო, როდესაც მომხმარებელი რჩება AP-თან გათიშვის გარეშე, იმისგან დამოუკიდებლად, ეს გამოწვეულია მომხმარებლის მობილურობით თუ არხების დაბლოკვით, არის ჰენდოვერის პროცესის ძირითადი მაჩვენებელი. ამგვარად, HHO/VHO შერჩევა საჭიროებს ერთობლივად იქნეს განხილული არხის ხარისხი,

რესურსების ხელმისაწვდომობა და CDT, ოპტიმიზაციის ან გადაწყვეტილების მიღების მეთოდების გამოყენებით. ჰენდოვერის შესახებ გადაწყვეტილება შეიძლება მიღებულ იქნეს (ა) ერთი მომხმარებლის ან (ბ) საერთო ქსელის მანასიათებლის მიხედვით. გარდა ამისა, მრავალ AP-ს შეუძლია ერთდროულად ემსახუროს მომხმარებელს, მაგალითად, CoMP სქემის შემთხვევაში. ამ სიტუაციაში ჰენდოვერი ხორციელდება AP-ების ჯგუფის სახით. ექვსი ფაქტორი, რომელიც გასათვალისწინებელია HLW ქსელებისთვის ჰენდოვერის შემუშავებისას, ქმნის ჰექსაგრამას, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 3.6-ზე. HHO-სა და VHO-ს შორის არჩევანის საკითხი ასევე მოიცავს დატვირთვის დაბალანსებას, რომელიც შემდგომ პარაგრაფშია განხილული.



**ნახ. 3.6.** HLW ქსელებისთვის ჰენდოვერის პროცესში განსახილველი ფაქტორები

### 3.7 დატვირთვის დაბალანსება

უსადენო ქსელების სფეროში, დატვირთვის დაბალანსება (LB) განეკუთვნება ტექნიკას, რომელიც ავრცელებს მომხმარებლის სესიებს AP-ებზე, რომელთა მიერ დაფარული ტერიტორიები, თავის მხრივ, გადაფარულია. LB-ის მიზანია რესურსების გამოყენების ოპტიმიზაცია, გამტარუნარიანობის მაქსიმალური გაზრდა, რეაგირების დროის შემცირება და ქსელის გადატვირთულობის შემცირება. ერთგვაროვან ქსელებში AP-ებს შორის დაფარვების გადაფარვა შეზღუდულია, იმისათვის, რომ შემცირდეს ICI-ის ზეგავლენა. შედეგად, LB ვრცელდება მხოლოდ ფიჭის

საზღვარზე განლაგებულ მომხმარებლებზე, როდესაც ისინი მიმართავენ დაუბალანსებელ ტრაფიკს სხვადასხვა AP-ზე. სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ, LB-ის გამოყენება არ არის საჭირო, როდესაც მომხმარებელთა მოთხოვნები მონაცემთა გადაცემის სიჩქარეზე ერთნაირად არის განაწილებული ტერიტორიის მიხედვით. Wi-Fi-სთან დაკავშირებული LB ტექნიკა კლასიფიცირდება ორ კატეგორიად, რომლებიც მომხმარებელზეა დაფუძნებული და AP-ზე დაფუძნებული. მომხმარებელზე დაფუძნებული მეთოდებით, თითოეული მომხმარებელი ირჩევს AP-ებს თავისი ინტერესების შესაბამისად და, ამ შემთხვევაში, ძნელია ქსელის მუშაობის ოპტიმალური მახასიათებლების მიღწევა. პირიქით, AP-ზე დაფუძნებული მეთოდების გამოყენებით LB ხორციელდება მთლიანი ქსელის მასშტაბით, რაც ცენტრალური ბლოკის მეშვეობით AP-ების კოორდინაციას მოითხოვს.

LB ჰიბრიდულ ქსელებში მნიშვნელოვანი და რთული გამოწვევა ხდება ორი ძირითადი ფაქტორის გამო: (ა) Li-Fi-ის და Wi-Fi-ის დაფარვის არეალები ერთმანეთზეა გადაფარებული და (ბ) Wi-Fi AP-ებს უფრო დიდი დაფარვის ზონა აქვთ, მაგრამ უფრო დაბალი სისტემური გამტარუნარიანობა, ვიდრე Li-Fi AP-ებს. ეს Wi-Fi-ს მგრძობიარეს ხდის ტრაფიკის გადატვირთვის მიმართ, მაშინაც კი, როდესაც მომხმარებელთა მოთხოვნები მონაცემთა გადაცემის სიჩქარეზე ტერიტორიის მიხედვით ერთნაირად არის განაწილებული. დიდი კვლევა ჩატარდა ჰეტეროგენულ ქსელებში LB მიდგომების შესასწავლად, მათ შორის გამარტივებული ოპტიმიზაციის, მარკოვის გადაწყვეტილების პროცესის, თამამთა თეორიის და ფიჭების დიაპაზონის გაფართოების თვალსაზრისით. მიუხედავად იმისა, რომ ეს მეთოდები ვრცელდება HLW ქსელებზეც, ისინი აწყდება მომხმარებლის მობილურობასთან დაკავშირებულ სერიოზულ პრობლემას, ერთეულოვანი Li-Fi AP-ის დაფარვის მცირე დიაპაზონის გამო. ალგორითმის ტიპის მიხედვით LB ალგორითმები, რომლებიც შემუშავებულია HLW ქსელებისთვის ორ კატეგორიად იყოფა: ოპტიმიზაციად და გადაწყვეტილების მიღებად. ამ ჰარაგრაფში ჩვენ ეს მეთოდები განვსაზღვრეთ, როგორც (ა) LB სტაციონარული არხისთვის და (ბ) LB მობილურობის გათვალისწინებით, იმისდა მიხედვით, არის თუ არა მომხმარებლის მობილურობა მხედველობაში მიღებული.

### **3.7.1 სტაციონარული არხის დატვირთვის დაბალანსება**

სატელეკომუნიკაციო არხი სტაციონარულია, თუ მისი მახასიათებლები არ იცვლება დროის მიხედვით. უსადენო არხი შეიძლება ჩაითვალოს

სტაციონარულად კოჰერენტობის დროის ფარგლებში, ანუ იმ პერიოდის განმავლობაში, როდესაც არხის იმპულსური გამოძახილი არ იცვლება. სტაციონარული არხების გამოყენებისას LB პრობლემის გადაჭრა საჭიროებს არხის ხარისხის კომპრომისს რესურსების ხელმისაწვდომობასთან. ლიტერატურაში LB მეთოდი შემოთავაზებულ იქნა მომხმარებლებს შორის პროპორციული სამართლიანობის მისაღწევად რესურსების გამოყოფის როგორც ცენტრალიზებული, ისე განაწილებული ალგორითმების ფორმით. ასევე, მომსახურების ხარისხის გასაუმჯობესებლად, LB საკითხი ფორმულირებულია როგორც შერეული მეთორიცხვიანი არაწრფივი პროგრამირების ამოცანა, რომელიც ითვალისწინებს მომხმარებელთა შორის მონაცემთა გადაცემის სიჩქარის განსხვავებულ მოთხოვნებს. ორი ზემოაღნიშნული მეთოდი აყალიბებს გამოთვლით ტექნიკაში ცნობილ NP-რთულ პრობლემას და პრობლემის გადაჭრა მოითხოვს გამოთვლითი სირთულის გადაჭარბებულ მნიშვნელობას, რომელიც ექსპონენციალურად იზრდება AP-ების რაოდენობასთან ერთად. გამოთვლითი სიმძლავრის შესამცირებლად ლიტერატურაში აღწერეს ევოლუციური თამამთა თეორიაზე დაფუძნებული განმეორებითი ალგორითმი მრავალჯერადი სამართლიანობის ფუნქციებით. აქ სინათლის გზების ბლოკირება, მიმდების თავისუფალი ორიენტაცია და მონაცემთა გადაცემის სიჩქარის მოთხოვნები დახასიათებული და გამოყენებულია პრაქტიკული საკომუნიკაციო სქემის მოდელირებისთვის. ლიტერატურაში აღწერილია იტერაციული ალგორითმიც, რომელიც ორიენტირებულია სიმძლავრის განაწილებაზე. ეს ალგორითმი შეიცავს ორი მდგომარეობას: (ა) თითოეული AP-ის სიმძლავრის ოპტიმალური განაწილების პოვნას მისი გამტარუნარიანობის მაქსიმალურად გაზრდის მიზნით და (ბ) მომხმარებლისთვის სხვა AP-ის მოძებნას მონაცემების გადაცემის სიჩქარის მინიმალური მაჩვენებლით, საერთო გამტარუნარიანობის გასაზრდელად და სისტემის სამართლიანობის ასამაღლებლად. ზემოხსენებული იტერაციული ალგორითმები შეიძლება ჩაითვალოს ავტონომიურ ოპტიმიზაციად, რომელიც ინდივიდუალურად ხორციელდება თითოეულ AP-სთვის.

ცენტრალიზებულმა ოპტიმიზაციამ უნდა გადაჭრას NP-რთული პრობლემა, ხოლო ავტონომიური ოპტიმიზაცია მოითხოვს იტერაციების გარკვეულ რაოდენობას სტაბილური მდგომარეობის მისაღწევად. ორივეს სჭირდება დამუშავების მნიშვნელოვანი დრო. HLW ქსელებში CSI შეიძლება სწრაფად იცვლებოდეს მობილური მომხმარებლებისთვის, თუნდაც ისინი მოკრძალებული სიჩქარით მოძრაობდნენ. ეს ზღუდავს და-



მუშავეების დროს და ამით ეჭვქვეშ აყენებს ზემოაღნიშნული მეთოდების პრაქტიკულობას. გარდა ამისა, როგორც ალტერნატიულ გზას, იყენებენ გადაწყვეტილების მიღების პირდაპირ მეთოდებს, რომლებიც უზრუნველყოფს დამუშავეების დროის მნიშვნელოვან შემცირებას. ლიტერატურაში წარმოდგენილი ერთ-ერთი ასეთი LB მეთოდი პროცესს ყოფს ორ ეტაპად: (ა) განსაზღვრავს მომხმარებლებს, რომლებსაც უნდა ემსახურებოდეს Wi-Fi და (ბ) გამოყოფს დანარჩენ მომხმარებლებს, როგორც თითქოსდა ავტონომიურად მომუშავეებს Li-Fi ქსელში. მონაცემების გადაცემის სიჩქარის მოთხოვნებსა და CSI-ის სტატისტიკურ ცოდნაზე დაყრდნობით, ამ ბუნდოვან ლოგიკაზე დაფუძნებულ მეთოდს შეუძლია მიაღწიოს თითქმის ოპტიმალურ მახასიათებლებს გამტარუნარიანობისა და მომხმარებლებისთვის სამართლიანობის თვალსაზრისით, ხოლო დამუშავეების დრო მნიშვნელოვნად შეამციროს.

### **3.7.2 დატვირთვის დაბალანსება მობილურობის გათვალისწინებით**

აღწერილი LB მეთოდები ეყრდნობა CSI-ის ცოდნას, რომელიც იცვლება მომხმარებლის გადაადგილებისა და გარემოს ცვლილების გამო. შესაბამისად, ამ მეთოდების გამოყენებით პერიოდულად უნდა იქნეს გამოთვლილი მათი შესაბამისი გადაწყვეტილებები. როდესაც ახალი გადაწყვეტილებები ცვლილებებს შეიტანენ მომხმარებელთა ასოციაციაში, მხედველობაში უნდა იქნეს მიღებული ჰენდოვერებით გამოწვეული ზემოქმედება. მაგალითად, სტაციონარული არხის LB მეთოდების გამოყენებისას, მომხმარებლები არაერთხელ გადადიან Li-Fi-სა და Wi-Fi-ს შორის, როდესაც მოძრაობენ Li-Fi AP-ების გასწვრივ, რასაც მიყვავართ ხშირ და არასაჭირო ჰენდოვერებამდე.

ზემოაღნიშნული საკითხის გადასაჭრელად მომხმარებლის მობილურობა უნდა განიხილებოდეს LB-თან ერთად, რასაც ეწოდება დატვირთვის დაბალანსება მობილურობის გათვალისწინებით. ლიტერატურაში შემოთავაზებულ იქნა კოლექში ჩაბარების მოდელზე დაფუძნებული მეთოდი. კერძოდ, მონაცემთა გადაცემის მისაღწევ სიჩქარეს და მომხმარებლის მოძრაობის მიმართულებას იყენებენ მომხმარებლის პრეფერენციის გასაზომად, ხოლო მონაცემების ჯამურ მაჩვენებელს იყენებენ AP-ების პრეფერენციის გამოსათვლელად. ეს ორი პრეფერენცია შემდეგ იტერაციულად გამოითვლება მდგრადი გადაწყვეტილების მისაღწევად. მაგრამ ეს მეთოდი მოითხოვს მომხმარებლის ტრეექტორიის ცოდნას, რომლის მიღებაც შეუძლებელია პრაქტიკაში. ასევე შემოთავაზებულ იქნა დინამიკური LB სქემა, რომელიც ასევე იყენებს იტერაციულ ალგო-

რითმს. თითოეული იტერაციის დროს AP-ის მინიჭება და რესურსების განაწილება თანმიმდევრულად ხორციელდება მონაცემთა გადაცემის ეფექტიანი სიჩქარის გასაუმჯობესებლად, რაც გამორიცხავს ჰენდოვერის ოვერჰედებს. განიხილეს სქემა, სადაც AP-ის მინიჭება და რესურსების განაწილება ერთობლივად ხორციელდება. ამით შესაძლებელია ქსელის გამტარუნარიანობის 50%-ით გაზრდა ცალკეულ რეალიზაციებთან შედარებით, მაგრამ გაცილებით მაღალი გამოთვლითი სირთულის ფასად. ასევე, გლობალურად ოპტიმიზებული LB მეთოდი რეალიზებულია CDT-ის გამოყენებით ჰენდოვერის ღირებულების გასაზომად. ეს მიდგომა არ ეყრდნობა CSI-ს და, შესაბამისად, შეეფერება სწრაფად ცვალებადი არხების შემთხვევას. ამიტომ ის უზრუნველყოფს ქსელის არაოპტიმალურ მახასიათებლებს. ასევე, შეისწავლეს სინათლის გზის ბლოკირება და ის შეიყვანეს CDT-ზე დაფუძნებული LB პრობლემის ფორმულირების პროცესში. ამ მოდიფიკაციას შეუძლია, ეფექტიანად შეამციროს უარყოფითი გავლენა, რომელიც გამოწვეულია სინათლის გზების წყვეტილი ბლოკირებებით.

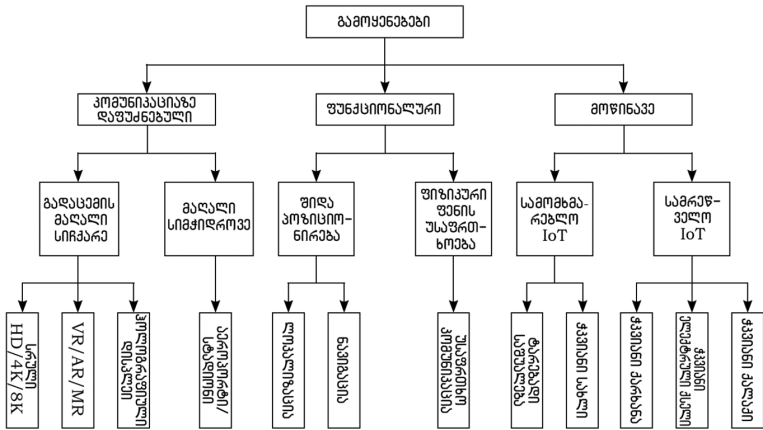
პრაქტიკული განხორციელებისთვის დაბალი გამოთვლითი სირთულის უზრუნველსაყოფად, შესაბამისი გადაწყვეტილების მიღების მეთოდებიც შესწავლილია დატვირთვის დაბალანსებისთვის მობილურობის გათვალისწინებით. მაგალითისთვის, შეიმუშავეს ბუნდოვანი ლოგიკური სისტემა Li-Fi-ისა და Wi-Fi-ის შორის ტრაფიკის დატვირთვის დასაბალანსებლად, მრავალი შემავალი პარამეტრით, რომელთა შორისაა SINR, მომხმარებლის გადაადგილების სიჩქარე და მონაცემთა გადაცემის სიჩქარის მოთხოვნები. სინათლის გზის ბლოკირების დამატებით (როგორც ექსტრა შემავალი პარამეტრი), კიდევ ერთი ბუნდოვან ლოგიკაზე დაფუძნებული LB მიდგომა იყო შემოთავაზებული დაბლოკვით გამოწვეული ტრაფიკის დაუბალანსებელი დატვირთვის სიტუაციის დასაძლევად. მიუხედავად იმისა, რომ ბუნდოვანი ლოგიკა შეიძლება ადვილად განხორციელდეს, ლოგიკის წესები წინასწარაა განსაზღვრული და ამიტომ მათ აკლია მოქნილობა. როგორც ახალი მიმართულება, შესაძლებელია გამოვიყენოთ მანქანური სწავლება ქსელის განთავსების, მომხმარებლების განაწილების, ტრაფიკთან დაკავშირებულ სიტუაციების და ა.შ. გაურკვევლობის დასაძლევად. ნაჩვენებია, რომ მანქანური სწავლების მეთოდს შეუძლია გააუმჯობესოს იტერაციული ალგორითმებით მიღებული მახასიათებლები უმეტეს სქემებში.

### **3.7.3 დატვირთვის დაბალანსების მეთოდების შემუშავების მომავალი გზები**

მომხმარებლის მობილურობით გამოწვეული არხის ცვალებადობა არ შეიძლება უგულებელყოფილი იყოს HLW ქსელებში LB საკითხის გადაწყვეტისას. ეს არსებითად უზრუნველყოფს კომპრომისს მონაცემთა გადაცემის მყისიერ სიჩქარესა და ჰენდოვერის სიჩქარეს შორის, როდესაც საშუალო გამტარუნარიანობა მაქსიმალურად იზრდება. ასევე გასათვალისწინებელია QoS-ის ისეთი სხვა მაჩვენებლები, როგორებიცაა პაკეტის დაკარგვის კოეფიციენტი, შეყოვნება და ჯიტერი, რაც აფორმირებს მრავალბიექტიანი ოპტიმიზაციის პრობლემას. LB პრობლემის გადასაჭრელად უნდა მოიძებნოს კომპრომისული ალგორითმები ოპტიმალურობისა და გამოთვლითი სირთულის თვალსაზრისით. მიუხედავად იმისა, რომ ოპტიმიზაციის მეთოდებს შეუძლიათ უზრუნველყონ ოპტიმალური გადაწყვეტილებები, მათ სჭირდება გამოთვლითი სირთულის ძალიან მაღალი მნიშვნელობები. ამის საპირისპიროდ, გადაწყვეტილების მიღების მეთოდებს შეუძლიათ, მნიშვნელოვნად შეამცირონ გამოთვლითი სირთულე, მაგრამ მათი გამოყენებისას იკარგება ოპტიმალურობა. ზოგადად, დაბალი სირთულის LB-ის რეალიზაცია შესაძლებელია ორი გზით. ერთ-ერთი მიდგომაა მომხმარებლებისა და AP-ების სტატუსის შესახებ ინფორმაციის (მაგალითად, მომხმარებლის სიჩქარე და AP-ის რიგის სიგრძე) ისეთი ინტელექტუალური მართვის მეთოდებით დამუშავება და გამოყენება, როგორებიცაა ბუნდოვანი ლოგიკა, თამაშთა თეორია და მანქანური სწავლება. არის სხვა გზაც – გადაწყვეტილების მიღების დიაგრამის შედგენა წინასწარ განსაზღვრული ზღურბლების მნიშვნელობებით. დღეისათვის, გადაწყვეტილების მიღების მრავალი მეთოდი შესწავლილია სხვადასხვა ტიპის კონკრეტული გარემოსთვის, მაშინ, როდესაც ქსელის განთავსების ცვალებადობასთან დაკავშირებული საკითხები კარგად არ არის გაანალიზებული თანამედროვე ლიტერატურაში. აქვე აღვნიშნავთ, რომ ძალიან მნიშვნელოვანია დაბალი სირთულის LB მეთოდების შემუშავება, რომლებიც ამავე დროს ადაპტიურია.

### **3.8 HLW ქსელების გამოყენება**

HLW ქსელებს შეუძლიათ მხარი დაუჭირონ გამოყენებათა და სერვისთა ფართო სპექტრს, რომელიც შეიძლება დაიყოს სამ ძირითად კატეგორიად: კომუნიკაციებზე დაფუძნებულად, ფუნქციონალურად დამოწინავედ. დეტალური ტექსონომია მოცემულია ნახ. 3.7-ზე. როგორც აღვნიშნეთ, HLW ქსელების დანერგვა – ეს არის პერსპექტიული მიდგომა მაღალსიჩქარე



**ნახ. 3.7.** გამოყენებათა ტექსონომია, რომლებიც სარგებლობენ HLW ქსელებით

ქარიანი უსადენო კომუნიკაციების მხარდასაჭერად, მაგალითად, 4K/8K ვიდეონაკადის, VR-ის, ჰოლოგრაფიული დისპლეისა და სხვ. ასევე, HLW ქსელებს შეუძლიათ შეამცირონ რესურსების დეფიციტი ისეთ მაღალი სიმჭიდროვის შემთხვევებში, როგორებიცაა აეროპორტები, სტადიონები და საკონფერენციო ადგილები. ტიპური ფუნქციური გამოყენებაა შიდა პროცესორების სისტემა (IPS) და ფიზიკური ფენის უსაფრთხოება (PLS). ეს ფუნქციები ემყარება მოწინავე გამოყენებას IoT-ში, დაწყებული სამომხმარებლო IoT-დან და დამთავრებული სამრეწველო IoT-ით. დღეისთვის დანერგილია შენობებს შიგნით ფუნქციონირებადი ჰიბრიდული VLC/RF IoT სისტემა მზის ენერჯის შეგროვებით. ამ პარაგრაფში ჩვენ ყურადღებას გავამახვილებთ IPS და PLS განხილვაზე და ხაზს გავუსვამთ HLW ქსელების სარგებელს ამ გამოყენებათათვის.

### 3.8.1 შიდა პროცესორების სისტემა

პროცესორები არის მნიშვნელოვანი ინსტრუმენტი ისეთი ადგილმდებარეობაზე დაფუძნებული სერვისების მიწოდებისთვის, როგორებიცაა ნავიგაცია, რუკების შექმნა, ობიექტების თვალყურის დევნება და სხვა. როგორც პროცესორების ძირითადი ტექნოლოგია, გლობალური პროცესორების სისტემა (GPS) არის თანამგზავრული რადიონავიგაციის სისტემა, რომელიც აწვდის გეოლოკაციის შესახებ ინფორმაციას GPS მიმღებს. L5 სიხშირული დიაპაზონის გამოყენებით და სიზუსტის განსაზღვრის უახლესი ტექნოლოგიების მეშვეობით GPS სიზუსტე შეიძლება

გაუმჯობესდეს 5 მ-დან 30 სმ-მდე. თუმცა GPS ხდება ნაკლებად ზუსტი შენობებსშიდა გამოყენებებში, რადგან გადაცემული სიგნალები სუსტდება და წყდება დაბრკოლებებით, განსაკუთრებით ქვრითა და კედლებით. ალტერნატიულად IPS შეიძლება შემუშავდეს მოკლე დისტანციებზე მოქმედი უსადენო საკომუნიკაციო ტექნოლოგიების გამოყენებით, როგორებიცაა, მაგალითად, Wi-Fi, Li-Fi, Bluetooth, რადიოსიხშირული იდენტიფიკატორი და ZigBee. დღეისთვის უამრავი ნაშრომი გამოქვეყნებული Li-Fi-ზე დაფუძნებული ჰოზიციონირების ტექნიკის აღსაწერად. ამ ქვეპარაგრაფში ჩვენ მოკლედ წარმოვადგენთ IPS მეთოდების კლასიფიკაციას და ყურადღებას გავამახვილებთ HLW ქსელებში შესაბამის შემუშავებათა განხილვაზე.

1) IPS მეთოდების კლასიფიკაცია: IPS მეთოდები შეიძლება კლასიფიცირდეს ორი თვალსაზრისით: მათემატიკური ალგორითმი და გამოყენებული ინფორმაცია. IPS-სთვის გამოყენებული ძირითადი ალგორითმებია ტრიანგულაცია, სიახლოვე და თითის ანაბეჭდი. ტრიანგულაციის მეთოდი იყენებს სამკუთხედების გეომეტრიულ თვისებებს, მოწყობილობასა და მრავალ ფიქსირებულ წერტილს (ანუ შუქურებს) შორის მანძილის ან კუთხის გაზომვით. ეს მეთოდი გვთავაზობს მაღალ სიზუსტეს დაზვეწილი სისტემური სტრუქტურის მეშვეობით. ერთი მიმდების შემთხვევაში სამკუთხედის მეთოდს სჭირდება, მინიმუმ, სამი შუქურა 2-D ჰოზიციონირებისთვის და ოთხი შუქურა 3-D-სთვის. Li-Fi შუქურა შეიძლება იყოს LED-ზე დაფუძნებული AP ან მოდულირებული რეტრორეფლექტორი (MRR), რომელიც თავიდან აიცილებს სინათლის პროაქტიურ გამოსხივებას. სიახლოვე – ეს არის უმარტივესი ალგორითმი, რომელიც აკავშირებს მოწყობილობის ადგილმდებარეობას AP-ს დაფარვის არეალთან. კერძოდ, როდესაც მოწყობილობა ამოცნობილია მრავალი AP-ს მიერ, ის დაახლოებით მდებარეობს ამ AP-ების დაფარვების გადაფარვის არეალში. მჭიდრო განლაგების გამო, Li-Fi ბუნებრივად შესაფერისია ამ ალგორითმის გამოსაყენებლად. თითის ანაბეჭდი იყენებს ადგილმდებარეობაზე დამოკიდებულ ინფორმაციას, როგორიცაა RSS, და მოითხოვს ავტონომიურ რადიორუკებს. ოპტიმალურ მდებარეობას აღწევნ რადიორუკასა და დროის რეალურ მასშტაბში გაზომვას შორის ეკვილიბრული მანძილის მინიმუმაციით. შედეგად, თითის ანაბეჭდის ჰოზიციონირების სიზუსტე დამოკიდებულია რადიორუკის სიზუსტეზე.

გამოყენებული ინფორმაციის მიხედვით, IPS მეთოდები იყოფა ოთხ კატეგორიად: RSS-ად, ჩამოსვლის დროდ (TOA), ჩამოსვლის დროის სხვაობად (TDOA) და ჩამოსვლის კუთხედ (AOA). RSS-ზე დაფუძნებული მე-

თოდები იყენებენ არხში მიღევას მოწყობილობასა და შუქურას შორის მანძილის შესაფასებლად. სიგნალის ყველა მახასიათებელს შორის, RSS შეიძლება ადვილად მოსაპოვებელი იყოს. ასეთი მეთოდის სიზუსტე დამოკიდებულია გზაში დანაკარგების აღმწერ საიმედო მოდელზე და, შესაძლოა, გაუარესდეს უკონტროლო შეცდომების გამო, რომლებიც გამოწვეულია სიგნალის მრავალგზიანი გავრცელებით. TOA-ზე დაფუძნებული მეთოდები ასევე ითვლიან მანძილს, მაგრამ იყენებენ სიგნალის გავრცელების დროს. ამ ტიპის მეთოდს სჭირდება დროის მიხედვით მკაცრი სინქრონიზაცია მოწყობილობასა და შუქურას შორის. ამ მოთხოვნის გვერდის ავლის მიზნით, მიღებულ სიგნალებს შორის დროის სხვაობის განსასაზღვრად, TDOA-ზე დაფუძნებული მეთოდები იყენებენ მრავალ გადაცემს ან მიმღებს. თუმცა დროის მიხედვით სინქრონიზაცია კვლავ საჭიროა შუქურებს შორის. AOA-ზე დაფუძნებული მეთოდები ზომავენ კუთხეს გადაცემულ სიგნალსა და შუქურას ნორმალურ კუთხეს შორის. RF-ში AOA-ს ჩვეულებრივ იღებენ ანტენებს შორის ფაზის სხვაობის დეტექტირებით. ამასთან, უშუალოდ Li-Fi-ში AOA არ შეიძლება გაიზომოს ინტენსივობის მოდულაციის/პირდაპირი დეტექტირების (IM/DD) ფაზური ინფორმაციის არარსებობის გამო. სამაგიეროდ, AOA-ს მიღება შესაძლებელია ორი მიდგომის საშუალებით. ერთ მიდგომას ეწოდება გამოსახულების ტრანსფორმაცია, რომელიც ანგარიშობს AOA-ს ტრიგონომეტრიულ ურთიერთობას სინათლის შუქურების კოორდინატებსა და მათ ფოტოზე გამოსახვის ადგილებს შორის. მეორე არის მოდელირება, რომელიც იყენებს RSS-ის კუთხოვან ნიმუშს ფოტოლიოდში.

2) IPS-ის გამოყენება HLW ქსელებში: პოზიციონირების მთავარი მაჩვენებელია სიზუსტე. Li-Fi-ის უფრო მცირე დაფარვის დიაპაზონი იწვევს პოზიციონირების უფრო მცირე შეცდომას (0.1 – 0.35 მ) Wi-Fi-ს შემთხვევასთან (1 – 7 მ) შედარებით. ასევე, Li-Fi-ს შეუძლია უზრუნველყოს შუქურების Wi-Fi-სთან შედარებით უფრო მჭიდრო განლაგება. არსებული და ყოვლისმომცველი განათების ინფრასტრუქტურის გამო სამონტაჟო ღირებულება და ენერჯის მოხმარება შედარებით დაბალი იქნება Li-Fi შუქურებისთვის. გარდა ამისა, Li-Fi-ზე დაფუძნებულ IPS-ს შეუძლია, ადვილად აღმოაჩინოს მოწყობილობის ორიენტაცია ADR-ების საშუალებით, რის მიღწევაც რთულია Wi-Fi-ზე დაფუძნებული IPS-ის გამოყენებისას. Li-Fi-ზე დაფუძნებული IPS და Wi-Fi-ზე დაფუძნებული IPS საკმაოდ განსხვავებულ გამოწვევებს აწყდება. Wi-Fi სიგნალებმა შეიძლება განიცადოს ძლიერი მიყუჩება მრავალგზიანი გავრცელების გამო, განსაკუთრებით ისეთ გარემოში, როგორებიცაა ქარხნები, მიწისქვეშა შახტები და გვირა-

ბები. რაც შეეხება Li-Fi-ს, აქ სიგნალები შესაძლოა დაექვემდებაროს სინათლის გზის დაბლოკვას, რაც გამოიწვევს კავშირის სრულ დაკარგვას.

ჰიბრიდული IPS, რომელიც იყენებს როგორც Li-Fi-ს, ასევე Wi-Fi-ს (ან სხვა RF ტექნოლოგიებს), გათვალისწინებულია შენობებსშიდა პოზიციონირების სიზუსტის გასაუმჯობესებლად. ლიტერატურაში სიანლოვის პოზიციონირების კონცეფცია გამოიყენეს Li-Fi-ს და Zigbee-ს ჰიბრიდულ გარემოში. ამ მეთოდს აქვს შედარებით დაბალი სიზუსტე ( $\approx 130$  სმ). ასევე, შემოთავაზებული იყო ორეტაპიანი პოზიციონირების სისტემა. ის ჯერ განსაზღვრავს შესაძლო არეალს Li-Fi-ზე დაფუძნებული სიანლოვის მეთოდით და შემდეგ ადგენს კონკრეტულ პოზიციას ამ არეალში RF სიგნალების RSS-ის გამოყენებით. ასეთ სისტემას შეუძლია შეინარჩუნოს პოზიციონირების შეცდომა 20 სმ-ის ფარგლებში. კიდევ ერთი შემუშავებული ორეტაპიანი პოზიციონირების სისტემა პირველ ეტაპზე RF-ს იყენებს იმის დასადგენად, თუ ამჟამად რომელ ოთახში მდებარეობს მოწყობილობა, ხოლო მეორე ეტაპზე Li-Fi-ს იყენებენ მოწყობილობის კონკრეტული პოზიციის დასადგენად. ამ სისტემისთვის შეფასების შეცდომა იყო მხოლოდ 5.8 სმ.

### 3.8.2 ფიზიკური ფენის უსაფრთხოება

უსადენო საკომუნიკაციო სისტემებში სიგნალები ღია ეთერით გადაიცემა და მათი მიღება შესაძლებელია როგორც მომხმარებლის, ასევე მომსმენებისთვის, სახელად ბობი და ევა (ეს კრიპტოგრაფიულ სისტემებში გამოყენებული სახელებია). უსადენო კომუნიკაციების უსაფრთხოების გასაზრდელად PLS-მა მრავალი მკვლევრის ყურადღება მიიპყრო. არსებობს ორი ძირითადი კატეგორია: უსაფრთხო გასაღების გენერირება და მონაცემთა უსაფრთხო გადაცემა. პირველი მათგანი იყენებს უსადენო არხების თანდაყოლილ შემთხვევითობას, მაგალითად, RSS-ს და ფაზის შესახებ ინფორმაციას, რათა უზრუნველყოს გასაღებების უსაფრთხოება. რაც შეეხება მონაცემთა უსაფრთხო გადაცემას, აქ მიზანია, გაზარდოს SINR სხვაობა ბობისა და ევას ლინკებს შორის. ზოგადად, ევას SINR მახასიათებელი შეიძლება შესუსტდეს ორი გზით: (ა) RSS-ის შემცირებით და (ბ) ხმაურის ან ინტერფერენციების გაზრდით. პირველი გზა ორიენტირებულია ბობისთვის გადაცემის სქემის ოპტიმიზაციაზე ისეთი ტექნიკით, როგორიცაა სხივების ფორმირება, რესურსების განაწილება, ინტერფერენციების აღმოფხვრა და სხვა. გადაცემის სიმძლავრე მცირდება როგორც ბობისთვის, ასევე ევასთვის. მეორე გზა არის ხელოვნური ხმაურის შეყვანა, რომელიც შეიძლება წარმოიშვას ბობის არხის ნულოვან ქვესი-

ვრცეში ისე, რომ ხმაურით მხოლოდ ევას SINR-ის მნიშვნელობა შემცირდეს. გარდა ამისა, როდესაც ევას არხი საშუალოდ ბოხის არხზე უარესია, არხის ხელშემშლამდგრადი კოდირება, როგორცაა მაგალითად LDPC კოდების გამოყენება, ეფექტიანად გაზრდის კონფიდენციალურობას.

Wi-Fi-სთან შედარებით, Li-Fi-ს აქვს რიგი მნიშვნელოვანი უპირატესობებისა უსაფრთხოების თვალსაზრისით. პირველი, ვინაიდან სინათლე არ აღწევს გაუმჭირვალე ობიექტებში, Li-Fi შეიძლება უსაფრთხოდ იქნეს გამოყენებული ისეთ ჩაკეტილ სივრცეში, როგორცაა საკონფერენციო დარბაზი. მეორე, Li-Fi ფარავს Wi-Fi-ზე უფრო მცირე ტერიტორიას ერთი AP-თი. ამრიგად, ევა უნდა მიუახლოვდეს სიგნალებს, იმისათვის, რომ ხელში ჩაიგდოს ისინი. მესამე, LoS-ის გზაზე ჩვეულებრივ მოდის მიღებული სიგნალის სიმძლავრის 80%-ზე მეტი. შედეგად, ინფორმაციის გაქონვა ევას მიმართულებით გაფანტული ოპტიკური სიგნალებიდან ძალიან შეზღუდული იქნება. ჩატარდა უამრავი კვლევა Li-Fi-ის კონფიდენციალურობის მახასიათებლების გასაანალიზებლად. ნაჩვენებია, რომ ექვსკუთხა განლაგება უზრუნველყოფს კონფიდენციალურობის უმაღლეს შესაძლებლობებს, მაშინ, როდესაც მატრიცული განლაგება უმნიშვნელოდ აუარესებს მახასიათებლებს. ასევე შეისწავლეს Li-Fi-ის კონფიდენციალურობის გამტარუნარიანობა LED-ების ამპლიტუდის შეზღუდვისას, სადაც სხივების ფორმირების გამოყენებით ხორციელდებოდა განსაზღვრულ ადგილებში მოსმენებისთვის ხელის შეშლა. გარდა ამისა, გასაღებების კვანტური განაწილება (QKD) არის სპეციალურად შემუშავებული მიდგომა OWC-ს დახმარებით შემუშავებული PLS-სთვის. ფოტონი ადვილად კოდირდება როგორც ნული/ერთი მდგომარეობა, მაგალითად, ჰორიზონტალური და ვერტიკალური პოლარიზაციების გამოყენებით. კვანტური მექანიკის საფუძველზე, როგორცაა კვანტური არაკლონირების პრინციპი, QKD-ს შეუძლია წარმოქმნას და გაავრცელოს კვანტური შემთხვევითი გასაღები ორ მხარეს შორის. დემონსტრირებულ იქნა პორტატიული QKD სისტემა, რომელსაც შეუძლია მიაღწიოს 30 კბიტ/წმ-ზე მეტ კონფიდენციალურობის გასაღების სიჩქარეს თავისუფალი სივრცის ლინკში 0.5 მ მანძილზე.

PLS-ის HLWN ქსელებში გამოყენების თემაზე ჩატარდა სხვადასხვა სახის კვლევები. მაგალითად, RF UL-ის კონფიდენციალურობის გათიშვის მახასიათებელი გაანალიზდა შუის ენერჯის შეგროვებით Li-Fi-ის DL-ში. ასევე, HLW ქსელების ენერჯის მოხმარება მინიმუმამდე დაიყვანეს კონფიდენციალურობის შეზღუდვის პირობებში. ნაჩვენებია, რომ ერთი და იმავე კონფიდენციალურობის მისაღწევად, HLW ქსელები მოიხმარენ 10



დბ-ით უფრო ნაკლებ სიმძლავრის დონეს, ვიდრე ავტონომიურად ფუნქციონირებადი ქსელები. შესწავლილია HLW ქსელებზე დაფუძნებული უსაფრთხოების პროტოკოლი მანქანების ოცეულებს შორის კომუნიკაციებისთვის, სადაც Li-Fi უზრუნველყოფს თავდასხმებისადმი მდგრადობას უსაფრთხოების თვალსაზრისით, ხოლო Wi-Fi-ს შემოაქვს სიჭარბე კავშირის საიმედოობისთვის. გააანალიზეს აგრეთვე ორნახტომიანი HLW ქსელების კონფიდენციალურობის მახასიათებლები, სადაც Li-Fi სიგნალებიდან შეგროვებულ ენერჯიას იყენებენ RF-ით მონაცემების გადასაცემად. ასევე, იპოვეს ის მინიმალური გადაცემის სიმძლავრე, რომლითაც შესაძლებელია, მიღწეულ იქნეს კონფიდენციალურობის გარკვეული ხარისხი.

### **3.8.3 მიღებული შედეგების შეჯამება და ღია საკითხები**

Li-Fi-სა და Wi-Fi-ს შორის ურთიერთშევისების გამო, HLW ქსელებს შეუძლიათ არა მხოლოდ გაზარდონ ქსელის გამტარუნარიანობა, არამედ ისარგებლონ გამოყენებათა ისეთი მომსახურებით, როგორებიცაა IPS და PLS. რაც შეეხება IPS-ს, Li-Fi-ის ბუნება მას საშუალებას აძლევს შემოგვთავაზოს გაცილებით მაღალი სიზუსტე, ვიდრე Wi-Fi-ს ნელა მოძრავი მომხმარებლებისთვის. ტიპური გამოყენების შემთხვევაა ნავიგაცია ავტომატიზებული მართვადი ავტომობილის მიხედვით (რომლის სიჩქარე ჩვეულებრივ შემოიფარგლება 0.5 მ/წმ-ით) ქარხანაში, სადაც RF-ზე დაფუძნებული IPS საგრძობლად არაზუსტია მკაცრი მრავალგზიანი ინტერფერენციების გამო. რაც შეეხება სწრაფად მოძრავ მომხმარებლებს, მოძველებულმა ინფორმაციამ შეიძლება დააქვეითოს Li-Fi-ზე დაფუძნებული IPS-ის სიზუსტე, როდესაც Li-Fi არხი სწრაფად ცვალებადია. როგორ გამოვიყენოთ HLW ქსელები ამ შემთხვევაში პოზიციონირების სიზუსტის გასაუმჯობესებლად, ჯერ კიდევ ღია საკითხია. რაც შეეხება PLS-ს, სინათლის შეუღწევლობას ორი მხარე აქვს. ერთი მხრივ, ის Li-Fi-ს სთავაზობს უსაფრთხოების კარგ მახასიათებლებს ფიზიკურ ფენაში, რაც ართულებს მოსმენას. მეორე მხრივ, გადამცემი ლინკი მგრძობიარეა კავშირის დაკარგვის მიზნით წინასწარგანზრახული ან უნებლიე მოქმედებათა გამო. აქედან გამომდინარე, მნიშვნელოვანია HLW ქსელების გამოყენება უსაფრთხო და საიმედო საკომუნიკაციო კავშირების უზრუნველსაყოფად. მაგალითად, QKD-ს შეუძლია უზრუნველყოს გასაღებების გაგზავნის აბსოლუტური უსაფრთხოება მონაცემთა გადაცემის დაბალი სიჩქარით, ხოლო დამიფრული მონაცემები შეიძლება გადაიცეს Wi-Fi-ს გამოყენებით მონაცემთა გადაცემის მაღალსიჩქარიანი ლინკის საშუა-

ლებით. ვფიქრობთ, ჯერ კიდევ საჭიროა შემდგომი კვლევების ჩატარება ამ მიმართულებით HLW ქსელების შესაძლებლობების დასადგენად.

### 3.9 მესამე თავის დასკვნები

RF-ში მოახლოებულ სპექტრის კრიზისთან ერთად, Li-Fi ბოლო წლებში გამოჩნდა, როგორც შიდა უსადენო კომუნიკაციების პერსპექტიული ტექნოლოგია. იმავდროულად, Wi-Fi აგრძელებს ფართო გამოყენებას ყოველდღიურ ცხოვრებაში. კომერციული პროდუქტების გამოშვებით Li-Fi-ს და Wi-Fi-ს თანაარსებობას იმპულსს სძენს Li-Fi-ის ისეთი კომპანიები, როგორებიცაა pureLi-Fi და Signify. Li-Fi და Wi-Fi მდებარეობენ ერთსა და იმავე არეალში და მათი მართვა ადვილად შეიძლება ცენტრალური მმართველი ბლოკის მეშვეობით, რაც ქმნის HLW ქსელების სტრუქტურას. Li-Fi-ის მონაცემთა გადაცემის მაღალი სიჩქარისა და Wi-Fi-ის ყოვლისმომცველი დაფარვის კომბინაციით HLW ქსელებს შეუძლიათ უზრუნველყონ ქსელის გაცილებით უფრო უკეთესი მახასიათებლები, ვიდრე ერთ ცალკე ადებულ უსადენო ტექნოლოგიას. დღეისათვის მიმდინარეობს აქტიური კვლევები HLW ქსელების რეალურ გარემოში დანერგვისა და ქსელის მახასიათებლების ოპტიმიზაციის თვალსაზრისით.

ამ თავში განხილულია HLW ქსელებისთვის სისტემური პროექტირების სტრუქტურა, რასაც მოსდევს ზოგადი მიმოხილვა მუშაობის ძირითადი მაჩვენებლებისა და ბოლოდროინდელი მიღწევების შესახებ, რაც ადასტურებს HLW ქსელების უპირატესობას ავტონომიური ქსელების მიმართ. მომხმარებლის ქცევასთან დაკავშირებული სამოდელო სამუშაოები განზოგადებულია მომხმარებლის მოძრაობის, მოწყობილობის ორიენტაციისა და სინათლის გზის ბლოკირების თვალსაზრისით, რაც ხაზს უსვამს Li-Fi-ისა და HLW ქსელებისთვის მომხმარებლის ქცევის პრაქტიკული მოდელების მნიშვნელობას. ამის შემდეგ, არსებული კვლევები კლასიფიცირდება და გაანალიზებულია სამი ძირითადი ტექნიკური თემის მიხედვით: ინტერფერენციების მართვით, ჰენდოვერითა და დატვირთვის დაბალანსებით. გარდა ამისა, ჩვენ განვიხილეთ HLW ქსელების სარგებელი გამოყენებითი სერვისებისთვის და მაგალითების სახით წარმოვადგინეთ შენობებს შიგნით ჰოზიციონირება და ფიზიკური ფენის უსაფრთხოება. ვიმედოვნებთ, რომ ეს მიმოხილვითი მესამე თავი ხელს შეუწყობს ჩვენი სპეციალისტების თეორიულ და ექსპერიმენტულ კვლევებს HLW ქსელების მომავალი წარმატების გზაზე.

## ბოლოთქმა

ყოველდღიურად მილიარდობით ადამიანი იყენებს Wi-Fi-ს, რომელიც ახორციელებს მონაცემთა გლობალური ტრაფიკის გადაცემას გამოყენებათა ყოველდღიურად მზარდი მრავალფეროვნებით. ცოტა ხნის წინ, IEEE 802.11ax, რომელიც წარმოადგენს WLAN-ების ფუნდამენტურ გაუმჯობესებას, დამტკიცდა როგორც შემდეგი თაობის Wi-Fi 6 ტექნოლოგია. მომხმარებლის უზარმაზარი მოთხოვნების დაკმაყოფილების მიზნით IEEE 802.11ax ხელს შეუწყობს მომავალში ინტელექტუალურ საინფორმაციო ინფრასტრუქტურის შექმნას, რომელიც მოემსახურება დიდი მონაცემების ტრანსპორტირებას და სხვადასხვა „ჭკვიან“ გამოყენებათა სტრუქტურებს. Wi-Fi-ის პოპულარობისა და შესაძლებლობების ზრდასთან ერთად კიდევ უფრო იზრდება მოთხოვნა უსადენო სერვისებზე. შემდგომი თაობის Wi-Fi უზრუნველყოფს წვდომას გიგაბიტიანი, საიმედო და ულტრადბალი შეყოვნების კომუნიკაციებზე, შექმნის და წარმოებაში დანერგავს ახალ მიდგომებს და სოციალურ ურთიერთქმედებას თანამედროვე ციფრული სატელეკომუნიკაციო ტექნოლოგიების გამოყენების გზით. IEEE 802.11be შემდეგი მნიშვნელოვანი ნაბიჯია Wi-Fi-ის გრძელვადიანი წარმატების ისტორიაში. მისი ძირითადი მახასიათებლები უკავშირდება განსაკუთრებით მაღალი გამტარუნარიანობის უზრუნველყოფას. მიუხედავად იმისა, რომ IEEE 802.11be სტანდარტის შემუშავების პროცესი საწყის ეტაპზეა, ჩვენ უკვე შეგვიძლია ავწეროთ მომავალი ტექნოლოგია და შევაფასოთ მისი უპირატესობები და შეზღუდვები დიასკოტხებთან ერთად, რაც მოითხოვს დამატებით ძალისხმევას საზოგადოებისგან. წინამდებარე წიგნში, რომელიც მიმოხილვითი ხასიათისაა, ჩვენ დეტალურად წარმოვადგინეთ, როგორც ახლახან მიღებული სტანდარტი IEEE 802.11ax, ასევე IEEE 802.11be-ს მიერ Wi-Fi 7-სკენ გადადგმული ნაბიჯები, ძირითადი ტექნიკური მაჩვენებლები და ამ სტანდარტებთან დაკავშირებული ახალი ფუნქციები და ტექნოლოგიები.

Wi-Fi-სა და Li-Fi-ს შორის თანაარსებობა ახალი პერსპექტიული კვლევის სფეროს წარმოადგენს. ჩვენ განვიხილეთ ორივე ტექნოლოგიის ძირითადი მახასიათებლები და მათი თანაარსებობის შესაძლებლობა. ჩვენ ვაჩვენეთ, რომ ორივე ტექნოლოგიის მჭიდრო ინტეგრაცია შესაძ-

ლებელს ხდის, განტვირთოს Wi-Fi ქსელი და გაათავისუფლოს რესურსები უფრო მობილური მომხმარებლებისთვის, რადგან მიზანშეწონილია, სტაციონარულ მომხმარებლებს მოემსახუროს Li-Fi. ამ გზით, Li-Fi-ს და Wi-Fi-ს შეუძლიათ ეფექტიანად ითანამშრომლონ.

წინამდებარე წიგნში მოცემული მიმოხილვა გაკეთებულია უახლეს პუბლიკაციებზე და სამეცნიერო მიღწევებზე დაყრდნობით. დადასტურებულია, რომ Wi-Fi-ის თანამედროვე სტანდარტების გამოყენება და Wi-Fi-ისა და Li-Fi-ის შერწყმა მნიშვნელოვნად გააუმჯობესებს უსადენო ლოკალური საკომუნიკაციო ქსელების მუშაობას. ამასთან ერთად, გვინდა აღვნიშნოთ, რომ გამოყენების უამრავი შესაძლებლობის მიუხედავად, დღეისთვის არსებობს კიდევ მრავალი გამოწვევა, რომლებიც დაკავშირებულია მაღალი და დაბალი სიხშირული დიაპაზონების ინტეგრაცია-სთან, მანქანურ სწავლებებზე დაფუძნებით გარანტირებულ მომსახურების ხარისხის უზრუნველყოფასთან, ენერჯის მართვასთან, სხივების ჰიბრიდულ ფორმირებასთან, ელექტრონულ კომპონენტებთან, გამოყენებულ მასალებთან და ახალი არქიტექტურის დიზაინთან. მიგვაჩნია, რომ ამ პრობლემების გადასაჭრელად აუცილებელია, როგორც აკადემიური მკვლევრების, ასევე ინდუსტრიული საზოგადოების აქტიური საერთაშორისო თანამშრომლობა.

ჩვენ არაფერს ვიტყვით წიგნის შესაძლო ღირსებებზე, ეს არცაა ჩვენი გასაკეთებელი; აქ მხოლოდ მის ნაკლს აღვნიშნავთ, რასაც გვერდი ვერ ავუარეთ – ეს იყო უამრავი გადაუჭრელი ტერმინოლოგიური პრობლემა, რის დაძლევაც ჩვენს ძალებს აღემატებოდა და ამასთან დაკავშირებით მკითხველს დიდი ბოდიში გვინდა მოვუხადოთ.

შეუძლებელია უდიდესი მადლიერების გრძნობით არ მოვიხსენიოთ ბატონი მერაბ ქათამაძე, რომელიც იყო ამ წიგნის დაწერის ინიციატორი და თავიდან ბოლომდე კურირებდა წიგნის მომზადებისა და გამოცემის პროცესს. გვინდა ასევე მადლობა ვუთხრათ აკადემიურ დოქტორს მამუკა ჩხაიძეს, წიგნის მომზადებისას გაწეული დახმარებისთვის.

*სერგო შავგულიძე, ნოდარ უღრელიძე*  
თბილისი, სექტემბერი, 2021 წელი

## ლიტერატურა

### წინასიტყვაობაში გამოყენებული ლიტერატურა

A. Garcia-Rodriguez, D. López-Pérez, L. Galati-Giordano, and G. Geraci, "IEEE 802.11be: Wi-Fi 7 Strikes Back," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 59, no. 4, pp. 102–108, Apr. 2021.

A. H. Maslow, "A Theory of Human Motivation," *Psychological Review*, vol. 50, no. 4, pp. 370–96. 1943.

### პირველ თავში გამოყენებული ლიტერატურა

N. Abramson, "The ALOHA System – Another alternative for computer communications," in *Proc. Fall Joint Comput. Conf. AFIPS*, vol. 37, pp. 281–285, 1970.

M. S. Afaqui, E. Garcia-Villegas, and E. Lopez-Aguilera, "Dynamic sensitivity control algorithm leveraging adaptive RTS/CTS for IEEE 802.11ax," in *Proc. IEEE Wireless Commun. Netw. Conf.*, Doha, Qatar, 2016, pp. 1–6.

W. Ahn, Y. Y. Kim, and R. Y. Kim, "An energy efficient multiuser uplink transmission scheme in the next generation WLAN for Internet of Things," *Int. J. Distrib. Sensor Netw.*, vol. 12, no. 7, pp. 1–10, Jul. 2016.

D. Bankov, A. Didenko, E. Khorov, and A. Lyakhov, "IEEE 802.11ax uplink scheduler to minimize delay: A classic problem with new constraints," in *Proc. IEEE Int. Symp. Pers. Indoor Mobile Radio Commun. (IEEE PIMRC)*, Montreal, QC, Canada, 2017, pp. 1–5.

F. Cao et al., "User association for load balancing with uneven user distribution in IEEE 802.11ax networks," in *Proc. 13th IEEE Annu. Consum. Commun. Netw. Conf. (CCNC)*, Las Vegas, NV, USA, 2016, pp. 487–490.

B. Bellalta, L. Bononi, R. Bruno, and A. Kessler, "Next generation IEEE 802.11 wireless local area networks: Current status, future directions and open challenges," *Comput. Commun.*, vol. 75, pp. 1–25, Feb. 2016.

B. Bellalta, "IEEE 802.11ax: High-efficiency WLANs," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 23, no. 1, pp. 38–46, Feb. 2016.

G. Bianchi, "Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 18, no. 3, pp. 535–547, Mar. 2000.

D.-J. Deng et al., "IEEE 802.11ax: Highly Efficient WLANs for Intelligent Information Infrastructure," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 12, pp. 52–59, Dec. 2017.

R. K. Jain, D.-M. W. Chiu, and W. R. Hawe, "A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer systems," *Eastern Research Laboratory, Digital Equipment Corporation, Hudson, MA, Sep. 1984*, 37 p.

M. Kamel, W. Hamouda, and A. Youssef, "Ultra-dense networks: A survey," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 18, no. 4, pp. 2522–2545, 4th Quart., 2016.

R. Karmakar, S. Chattopadhyay, and S. Chakraborty, "Impact of IEEE 802.11n/ac PHY/MAC high throughput enhancements on transport and application protocols—A survey," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 19, no. 4, pp. 2050–2091, 4th Quart., 2017.

E. Khorov, A. Kiryanov, A. Lyakhov, and G. Bianchi, "A Tutorial on IEEE 802.11ax High Efficiency WLANs," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 21, no. 1, pp. 197–216, 1st Quart., 2019.

E. Khorov, V. Loginov, and A. Lyakhov, "Several EDCA parameter sets for improving channel access in IEEE 802.11ax networks," in *Proc. Int. Symp. Wireless Commun. Syst. (ISWCS)*, Poznan, Poland, 2016, pp. 419–423.

A. Lyakhov, E. Khorov, A. Krotov, and A. Guschin, "A survey on IEEE 802.11ah: An enabling networking technology for smart cities," *Comput. Commun.*, vol. 58, pp. 53–69, Mar. 2015.

H. A. Omar et al., "A survey on high efficiency wireless local area networks: Next generation Wi-Fi," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 18, no. 4, pp. 2315–2344, 4th Quart., 2016.

E. Perahia and R. Stacey, *Next Generation Wireless LANs: 802.11n and 802.11ac*. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2013.

Q. Qu, B. Li, M. Yang, and Z. Yan, "An OFDMA based concurrent multiuser MAC for upcoming IEEE 802.11ax," in *Proc. Wireless Commun. Netw. Conf. Workshops (WCNCW)*, New Orleans, LA, USA, 2015, pp. 136–141.

J.-H. Rhee, J. M. Holtzman, and D. K. Kim, "Performance analysis of the adaptive EXP/PF channel scheduler in an AMC/TDM system," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 8, no. 8, pp. 497–499, Aug. 2004.

P. Serrano, P. Salvador, V. Mancuso, and Y. Grunenberger, "Experimenting with commodity 802.11 hardware: Overview and future directions," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 17, no. 2, pp. 671–699, 2nd Quart., 2015.

O. Sharon and Y. Alpert, "Single user MAC level throughput comparison: IEEE 802.11ax vs. IEEE 802.11ac," *Wireless Sensor Netw.*, vol. 9, no. 5, pp. 166–177, 2017.

I. Tinnirello and G. Bianchi, "Rethinking the IEEE 802.11e EDCA performance modeling methodology," *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 18, no. 2, pp. 540–553, Apr. 2010.

C. Thorpe and L. Murphy, "A survey of adaptive carrier sensing mechanisms for IEEE 802.11 wireless networks," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 16, no. 3, pp. 1266–1293, 3rd Quart., 2014.

D. Xia, J. Hart, and Q. Fu, "Evaluation of the Minstrel rate adaptation algorithm in IEEE 802.11g WLANs," in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. (ICC)*, Budapest, Hungary, 2013, pp. 2223–2228.

## **მეორე თავში გამოყენებული ლიტერატურა**

S. Bassoy, H. Farooq, M. A. Imran, and A. Imran, "Coordinated multipoint clustering schemes: A survey," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 19, no. 2, pp. 743–764, 2nd Quart., 2017.

A. Checko et al., "Cloud RAN for mobile networks — A technology overview," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 17, no. 1, pp. 405–426, 1st Quart., 2015.

C. Deng et al., "IEEE 802.11be Wi-Fi 7: New Challenges and Opportunities," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 20, no. 4, pp. 2136–2166, 4th Quart., 2020.

M. E. Eltayeb, T. Y. Al-Naffouri, and H. R. Bahrami, "Compressive sensing for feedback reduction in MIMO broadcast channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 62, no. 9, pp. 3209–3222, Sep. 2014.

J. Flordelis, F. Rusek, F. Tufvesson, E. G. Larsson, and O. Edfors, "Massive MIMO Performance — TDD Versus FDD: What Do Measurements Say?" *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 17, no. 4, pp. 2247–2261, Apr. 2018.

E. Hamed, H. Rahul, M. A. Abdelghany, and D. Katabi, "Real-time distributed MIMO systems," in *Proc. ACM SIGCOMM Conf.*, 2016, pp. 412–425.

A. S. Hamza, S. S. Khalifa, H. S. Hamza, and K. Elsayed, "A survey on inter-cell interference coordination techniques in OFDMA based cellular networks," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 15, no. 4, pp. 1642–1670, 4th Quart., 2013.

E. Khorov, I. Levitsky, I. F. Akyildiz, "Current Status and Directions of IEEE 802.11be, the Future Wi-Fi 7," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 88664–88688, 2020.

D. López-Pérez, A. Garcia-Rodriguez, L. Galati-Giordano, M. Kasslin, and K. Doppler, "IEEE 802.11be extremely high throughput: The next generation of Wi-Fi technology beyond 802.11ax," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 57, no. 9, pp. 113–119, Sep. 2019.

Q. Mao, F. Hu, and Q. Hao, "Deep learning for intelligent wireless networks: A comprehensive survey," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 20, no. 4, pp. 2595–2621, 4th Quart., 2018.

R. Mennes, M. Claeys, F. A. P. De Figueiredo, I. Jabandžić, I. Moerman and S. Latré, "Deep learning-based spectrum prediction collision avoidance for hybrid wireless environments," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 45818–45830, 2019.

G. Mountaser, M. L. Rosas, T. Mahmoodi, and M. Dohler, "On the feasibility of MAC and PHY split in cloud RAN," in *Proc. IEEE Wireless Commun. Netw. Conf. (WCNC)*, San Francisco, CA, USA, 2017, pp. 1–6.

A. S. Mubarak, H. Esmail, and E. M. Mohamed, "LTE/Wi-Fi/mmWave RAN-level interworking using 2C/U plane splitting for future 5G networks," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 53473–53488, 2018.

B. A. A. Nunes, M. Mendonca, X. Nguyen, K. Obraczka, and T. Turletti, "A survey of software-defined networking: Past, present, and future of programmable networks," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 16, no. 3, pp. 1617–1634, 3rd Quart., 2014.

R. Porat, E. Ojard, N. Jindal, M. Fischer, and V. Erceg, "Improved MU-MIMO performance for future 802.11 systems using differential feedback," in *Proc. Inf. Theory Appl. Workshop (ITA)*, San Diego, CA, USA, 2013, pp. 1–5.

X. Rao and V. K. N. Lau, "Distributed compressive CSIT estimation and feedback for FDD multi-user massive MIMO systems," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 62, no. 12, pp. 3261–3271, Jun. 2014.

W. K. Soo, T.-C. Ling, A. H. Maw, and S. T. Win, "Survey on loadbalancing methods in 802.11 infrastructure mode wireless networks for improving quality of service," *ACM Comput. Surveys*, vol. 51, no. 2, p. 34, 2018.

P. Sun, R. Hou, X. Ma, and H. Li, "FFR based interference coordination scheme in the next generation WLAN," in Proc. IEEE 87th Veh. Technol. Conf. (VTC Spring), Porto, Portugal, 2018, pp. 1–5.

J. Vieira, F. Rusek, O. Edfors, S. Malkowsky, L. Liu, and F. Tufvesson, "Reciprocity calibration for massive MIMO: Proposal, modeling, and validation," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 16, no. 5, pp. 3042–3056, May 2017.

T. Wang, Q. Yang, K. Tan, J. Zhang, S.C. Liew, and S. Zhang, "DCAP: Improving the capacity of WiFi networks with distributed cooperative access points," IEEE Trans. Mobile Comput., vol. 17, no. 2, pp. 320–333, Feb. 2018.

Wi-Fi Alliance 2018 Wi-Fi Predictions (2018). [Online]. Available: <https://www.wi-fi.org/news-events/newsroom/wi-fi-alliance-publishes-2018-wi-fi-predictions>.

K. Yano, N. Egashira, S. Tsukamoto, J. Webber, and T. Kumagai, "Channel access balancing for multiband wireless LAN by using alternative primary channel," in Proc. IEEE Wireless Commun. Netw. Conf. (WCNC), San Francisco, CA, USA, 2017, pp. 1–6.

K. Yano, N. Egashira, J. Webber, M. Usui, and Y. Suzuki, "Achievable throughput of multiband wireless LAN using simultaneous transmission over multiple primary channels assisted by idle length prediction based on PNN," in Proc. Int. Conf. Artif. Intell. Inf. Commun. (ICAIIIC), Okinawa, Japan, 2019, pp. 022–027.

J. Yao et al., "Comprehensive study on MIMO-related interference management in WLANs," IEEE Commun. Surveys Tuts., vol. 21, no. 3, pp. 2087–2110, 3rd Quart., 2019.

P. Zhou, X. Fang, X. Wang, and L. Yan, "Multi-beam transmission and dual-band cooperation for control/data plane decoupled WLANs," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 68, no. 10, pp. 9806–9819, Oct. 2019.

## **მესამე თავში გამოყენებული ლიტერატურა**

A. M. Abdelhady, O. Amin, A. Chaaban, B. Shihada, and M.-S. Alouini, "Downlink resource allocation for dynamic TDMA-based VLC systems," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 18, no. 1, pp. 108–120, Jan. 2019.

R. Ahmad, M. D. Soltani, M. Safari, A. Srivastava, and A. Das, "Reinforcement learning based load balancing for hybrid Li-Fi Wi-Fi networks," IEEE Access, vol. 8, pp. 132273–132284, 2020.

A. Ahmed, L. M. Boulahia, and D. Gaiti, "Enabling vertical handover decisions in heterogeneous wireless networks: A state-of-the-art and a classification," IEEE Commun. Surveys Tuts., vol. 16, no. 2, pp. 776–811, 2nd Quart., 2014.

M. Ayyash et al., "Coexistence of Wi-Fi and Li-Fi toward 5G: Concepts, opportunities, and challenges," IEEE Commun. Mag., vol. 54, no. 2, pp. 64–71, Feb. 2016.

C. Chen, D. A. Basnayaka, and H. Haas, "Downlink performance of optical attocell networks," J. Lightw. Technol., vol. 34, no. 1, pp. 137–156, Jan. 1, 2016.



C. Chen, W.-D. Zhong, H. Yang, S. Zhang, and P. Du, "Reduction of SINR fluctuation in indoor multi-cell VLC systems using optimized angle diversity receiver," *J. Lightw. Technol.*, vol. 36, no. 17, pp. 3603–3610, Sep. 1, 2018.

"Cisco visual networking index: Forecast and trends, 2017-2022," Cisco, San Jose, CA, USA, Rep., Nov. 2018.

E. Demarchou, C. Psomas, and I. Krikidis, "Mobility management in ultra-dense networks: Handover skipping techniques," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 11921–11930, 2018.

H. Haas, L. Yin, Y. Wang, and C. Chen, "What is Li-Fi?" *J. Lightw. Technol.*, vol. 34, no. 6, pp. 1533–1544, Mar. 15, 2016.

J. M. Hamamreh, H. M. Furqan, and H. Arslan, "Classifications and applications of physical layer security techniques for confidentiality: A comprehensive survey," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 21, no. 2, pp. 1773–1828, 2nd Quart., 2019.

H. Kazemi, M. Safari, and H. Haas, "A wireless optical backhaul solution for optical attocell networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 18, no. 2, pp. 807–823, Feb. 2019.

T. Komine and M. Nakagawa, "Integrated system of white LED visible light communication and power-line communication," *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 49, no. 1, pp. 71–79, Feb. 2003.

S. Liang, Y. Zhang, B. Fan, and H. Tian, "Multi-attribute vertical handover decision-making algorithm in a hybrid VLC-femto system," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 21, no. 7, pp. 1521–1524, Jul. 2017.

Z. Liao, L. Yang, J. Chen, H.-C. Yang, and M.-S. Alouini, "Physical layer security for dual-hop VLC/RF communication systems," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 22, no. 12, pp. 2603–2606, Dec. 2018.

H. Liu, X. Pu, Y. Chen, J. Yang, and J. Chen, "User-centric access scheme based on interference management for indoor VLC-Wi-Fi heterogeneous networks," *IEEE Photon. J.*, vol. 12, no. 4, pp. 1–12, Aug. 2020

J. Luo, L. Fan, and H. Li, "Indoor positioning systems based on visible light communication: State of the art," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 19, no. 4, pp. 2871–2893, 4th Quart., 2017.

Y. U. Lee and M. Kavehrad, "Two hybrid positioning system design techniques with lighting LEDs and ad-hoc wireless network," *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 58, no. 4, pp. 1176–1184, Nov. 2012.

W. Ma and L. Zhang, "QoE-driven optimized load balancing design for hybrid Li-Fi and Wi-Fi networks," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 22, no. 11, pp. 2354–2357, Nov. 2018.

M.-G. Moon, S.-I. Choi, J. Park, and J. Y. Kim, "Indoor positioning system using LED lights and a dual image sensor," *J. Opt. Soc. Korea*, vol. 19, no. 6, pp. 586–591, Dec. 2015.

G. Pan, J. Ye, and Z. Ding, "Secure hybrid VLC-RF systems with light energy harvesting," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 65, no. 10, pp. 4348–4359, Oct. 2017.

Z.-G. Sun, H.-Y. Yu, W.-C. Li, Z.-J. Tian, and Y.-J. Zhu, "Power efficient linear precoding for MU-MISO VLC systems with channel uncertainty," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 30, no. 7, pp. 626–629, Apr. 1, 2018.

Y. Wang, D. A. Basnayaka, X. Wu, and H. Haas, "Optimization of load balancing in hybrid Li-Fi/RF networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 65, no. 4, pp. 1708–1720, Apr. 2017.

Y. Wang and H. Haas, "Dynamic load balancing with handover in hybrid Li-Fi and Wi-Fi networks," *J. Lightw. Technol.*, vol. 33, no. 22, pp. 4671–4682, Nov. 15, 2015.

Q. Wang, Z. Wang, and L. Dai, "Multiuser MIMO-OFDM for visible light communications," *IEEE Photon. J.*, vol. 7, no. 6, pp. 1–11, Dec. 2015.

X. Wu and D. C. O'Brien, "A novel machine learning-based handover scheme for hybrid Li-Fi and Wi-Fi networks," in *Proc. IEEE Global Commun. Conf. Workshop (GC Wkshps)*, Taipei, Taiwan, 2020, pp. 1–5.

L. Wu, Z. Zhang, J. Dang, and H. Liu, "Blind interference alignment for multiuser MISO indoor visible light communications," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 21, no. 5, pp. 1039–1042, May 2017.

X. Wu, M. D. Soltani, L. Zhou, M. Safari, and H. Haas, "Hybrid Li-Fi and Wi-Fi Networks," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 1392–1420, 2nd Quart., 2021.

X. Wu and H. Haas, "Handover skipping for Li-Fi," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 38369–38378, 2019.

W. Xu, J. Wang, H. Shen, H. Zhang, and X. You, "Indoor positioning for multiphotodiode device using visible-light communications," *IEEE Photon. J.*, vol. 8, no. 1, pp. 1–11, Feb. 2016.

Y.-Y. Zhang, H.-Y. Yu, and J.-K. Zhang, "Block precoding for peaklimited MISO broadcast VLC: Constellation-optimal structure and addition-unique designs," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 36, no. 1, pp. 78–90, Jan. 2018.

Y. Zhuang et al., "A survey of positioning systems using visible LED lights," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 20, no. 3, pp. 1963–1988, 3rd Quart., 2018.

## აკრონიმები და აბრევიატურები

AC – Access Controller – წვდომის მმართველი

Ack – Acknowledgement – დადასტურება

ACO-OFDM – Asymmetrically Clipped Optical OFDM – ასიმეტრიულად მოჭრილი ოპტიკური OFDM

ADR – Angle Diversity Receiver – მიმღები კუთხური მიმორიგებით

AIFSN – Arbitration Interframe Space Number – ფრეიმთაშორისი სივრცის საარბიტრაჟო ნომერი

A-MPDU – Aggregated MAC Protocol Data Unit – MAC პროტოკოლის მონაცემთა აგრეგირებული ბლოკი

A-MSDU – Aggregated MAC Service Data Unit – MAC სერვისის მონაცემთა აგრეგირებული ბლოკი

AOA – Angle of Arrival – ჩამოსვლის კუთხე

AP – Access Point – წვდომის წერტილი

AR – Augmented Reality – მომატებული რეალობა

ARQ – Automatic Repeat Request – ავტომატური განმეორებითი მოთხოვნა

ASE – Area Spectral Efficiency – არეალის მიხედვით სპექტრული ეფექტიანობა  
AVG – Average – საშუალო  
BA – Block Ack – ბლოკური Ack  
BAR – Block Ack Request – ბლოკური Ack-ს მოთხოვნა  
BIA – Blind Interference Alignment – ინტერფერენციების ბრმა გასწორება  
BPSK – Binary Phase-Shift Keying – ორობითი ფაზური მოდულაცია  
BSR – Buffer Status Report – ბუფერის სტატუსის შესახებ ანგარიში  
BSS – Basic Service Set – ძირითადი მომსახურების კომპლექტი  
BSSID – BSS Identifier – BSS იდენტიფიკატორი  
CBF – Coordinated Beamforming – სხივის კოორდინირებული ფორმირება  
CC – Chase Combining – ჩეიზის კომბინირება  
CCA – Clear Channel Assessment – სუფთა არხის შეფასება  
CDT – Cell Dwell Time – ფიჭამი ყოფნის ხანგრძლივობა  
CFO – Carrier Frequency Offset – გადამტანი სიხშირის წანაცვლება  
C-OFDMA – Coordinated OFDMA – კოორდინირებული OFDMA  
CoMP – Coordinated Multipoint – კოორდინირებული მრავალი წერტილი  
CRC – Cyclic Redundancy Check – სიჭარბის ციკლური შემოწმება  
CSI – Channel State Information – არხის მდგომარეობის შესახებ ინფორმაცია  
CSIT – Transmitter Channel State Information – არხის მდგომარეობის შესახებ ინფორმაცია

გადამცემში

CSK – Color Shift Keying – ფერადი მანიპულაცია  
CSMA/CA – Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance – მრავალჯერადი წვდომა  
გადამტანის ზონდირებით და კონფლიქტების თავიდან აცილებით  
CSR – Coordinated Spatial Reuse – სივრცის კოორდინირებული განმეორებითი გამოყე-

ნება

CTS – Clear To Send – მზადყოფნა გაგზავნაზე  
CW – Contention Window – კონკურენციის ფანჯარა (თავი 1)  
CW – Codeword – კოდური სიტყვა (თავი 2)  
DC – Direct Current – მუდმივი დენი  
DCM – Dual Carrier Modulation – მოდულაცია დუალური გადამტანით  
DCO-OFDM – Direct Current Optical OFDM – მუდმივი დენის ოპტიკური OFDM  
DEC – Decimal – ათობითი  
DL – Downlink – დაუნლინკი  
DSC – Dynamic Sensitivity Control – მგრძობელობის დინამიკური მართვა  
EDCA – Enhanced Distributed Channel Access – გაფართოებული წვდომა განაწილებულ

არხზე

EHT – Extremely High Throughput – განსაკუთრებით მაღალი გამტარუნარიანობა  
EOSP – End of Service Period – მომსახურების დასრულების პერიოდი

ER – Extended Range – გაფართოებული დიაპაზონი

FEC – Forward Error Correction – შეცდომების პირდაპირი გასწორება

FFR – Fractional Frequency Reuse – სიხშირის ფრაქციული განმეორებითი გამოყენება

FoV – Field of View – მხედველობის არე

FR – Frequency Reuse – სიხშირის განმეორებითი გამოყენება

FSO – Free-Space Optical Communication – თავისუფალ სივრცეში ოპტიკური კომუნიკაცია

FST – Fast Session Transfer – სესიის სწრაფი გადაცემა

GCR – Groupcast with Retries – ტრანსლაცია განმეორებითი მცდელობებით

GI – Guard Interval – დამცავი ინტერვალი

GPS – Global Positioning System – გლობალური პოზიციონირების სისტემა

HARQ – Hybrid ARQ – ჰიბრიდული ARQ

HCCA – Hybrid Controlled Channel Access – ჰიბრიდული მართვადი წვდომა არხზე

HE – High Efficiency – მაღალი ეფექტიანობა

HEW – High Efficiency Wireless – მაღალი ეფექტიანობის უსადენო

HHO – Horizontal Handover – ჰორიზონტალური ჰენდოვერი

HLW – Hybrid Wi-Fi/Li-Fi – ჰიბრიდული Wi-Fi/Li-Fi

HS – Handover Skipping – ჰენდოვერის გამოტოვება

ICI – Inter-Cell Interference – ფიჭებს შორის ინტერფერენცია

ID – Identifier – იდენტიფიკატორი

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers – ელექტრო და ელექტრონიკის ინჟინრების ინსტიტუტი

IM/DD – Intensity Modulation/Direct Detection – ინტენსივობის მოდულაცია/პირდაპირი დეტექტირება

IoT – Internet of Things – საგანთა ინტერნეტი

IPS – Indoor Positioning System – შიდა პოზიციონირების სისტემა

IR – Incremental Redundancy – ზრდადი სიჭარბე

ISO – International Standardization Organization – სტანდარტიზაციის საერთაშორისო ორგანიზაცია

JTX – Joint Transmission – ერთობლივი გადაცემა

JTXA – JTX Announcement – JTX განცხადება

L – Legacy – მემკვიდრეობითი

LB – Load Balancing – დატვირთვის დაბალანსება

LDPC – Low-Density Parity-Check – დაბალი სიმკვრივის ლუწობის შემმოწმებელი

LED – Light-Emitting Diode – სინათლის გამომსხივებელი დიოდი

LLR – Log-Likelihood Ratio – დამაჯერებლობის ლოგარითმული ფარდობა

LoS – Line of Sight – პირდაპირი ხედვა

LTE – Long-term Evolution – გრძელვადიანი ევოლუცია

LTF – Long Training Field – ტრენინგის გრძელი ველი

MAC – Medium Access Control – გარემოსთან წვდომის მართვა

MAP – Multi-AP – მულტი-AP

M-AP – Master AP – მთავარი AP

MCS – Modulation-Coding Scheme – მოდულაცია-კოდირების სქემა

MIMO – Multiple Input Multiple Output – მრავალშესასვლელიანი მრავალგამოსასვლელიანი

MLME – MAC Sublayer Management Entity – MAC ქვეფენის მმართველი ერთეული

MPDU – MAC Protocol Data Unit – MAC პროტოკოლის მონაცემთა ბლოკი

MRG – Margin – ზღვარი

MRR – Modulated Retro-Reflector – მოდულირებული რეტრორეფლექტორი

MSDU – MAC Service Data Unit – MAC სერვისის მონაცემთა ბლოკი

MUD – Multiuser Detection – მრავალმომხმარებლიანი დეტექტირება

MU-MIMO – Multiuser MIMO – მრავალმომხმარებლიანი MIMO

NAck – Negative Ack – ნეგატიური Ack

NAV – Network Allocation Vector – ქსელის განაწილების ვექტორი

NDP – Null Data Packet – ნულოვანი მონაცემთა პაკეტი

NDPA – NDP Announcement – ნულოვან მონაცემთა პაკეტის განცხადება

NFV – Network Function Virtualization – ქსელის ფუნქციის ვირტუალიზაცია

NOMA – Non-Orthogonal Multiple Access – არაორთოგონალური მრავალჯერადი წვდომა

OBO – OFDMA Back-off – OFDMA-ს ბექოფი

OBSS – Overlapping BSS – გადაფარული BSS

OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing – მულტიპლექსირება ორთოგონალური სიხშირული დაყოფით

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

O-OFDM – Optical OFDM – ოპტიკური OFDM

OOK – On-Off Keying – ორპოზიციური მანიპულაცია

OWC – Optical Wireless Communication – ოპტიკური უსადენო კომუნიკაცია

PAR – Project Authorization Request – პროექტის ავტორიზაციის მოთხოვნა

PCC – Punctured CC – პერფორირებული CC

PCF – Point Coordination Function – წერტილების კოორდინაციის ფუნქცია

PD – Preamble Detection – პრეამბულის დეტექტირება

PER – Packet Error Ratio – პაკეტზე შეცდომის კოეფიციენტი

PHY – Physical – ფიზიკური

PIC – Parallel Interference Cancellation – ინტერფერენციების პარალელური ჩახშობა

PLC – Power-Line Communication – ელექტროგადამცემი ხაზით კომუნიკაცია

PLME – Physical-Layer Management Entity – ფიზიკური ფენის მმართველი ერთეული

PLS – Physical Layer Security – ფიზიკური ფენის უსაფრთხოება

PoE – Power over Ethernet – ენერჯის გადაცემა ეზერნეტით

POF – Plastic Optical Fiber – პლასტიკური ოპტიკური ბოჭკო

PPDU – PHY Protocol Data Unit – ფიზიკური ფენის პროტოკოლის მონაცემთა ბლოკი

PPP – Poisson Point Process – პუასონის წერტილოვანი პროცესი

PS – Power Saving – ენერჯის დამზოგავი

PU – Processing Unit – დამუშავების ბლოკი

PWR – Power – სიმძლავრე

QAM – Quadrature Amplitude Modulation – კვადრატული ამპლიტუდური მოდულაცია

QKD – Quantum Key distribution – გასაღებების კვანტური განაწილება

QoS – Quality of Service – მომსახურების ხარისხი

QTP – Quiet Time Period – დროის წყნარი პერიოდი

RAW – Restricted Access Window – შეზღუდული წვდომის ფანჯარა

RF – Radiofrequencies – რადიოსიხშირეები

RIFS – Reduced InterFrame Space – ფრეიმებს შორის შემცირებული სივრცე

RLAN – Radio Local Area Network – ლოკალური რადიოქსელი

RL-SIG – Repetition L-SIG – L სიგნალის გამეორება

RSNA – Robust Security Network Association – რობასტული უსაფრთხოების ქსელების ასოციაცია

RSS – Received Signal Strength – მიღებული სიგნალის სიმძლავრე

RSSI – Received Signal Strength Indicator – მიღებული სიგნალის სიმძლავრის ინდიკატორი

RTS – Request To Send – მოთხოვნა გაგზავნაზე

RU – Resource Unit – რესურსბლოკი

RWP – Random Waypoint – შემთხვევითი საგზაო წერტილი

SAP – Service Access Point – სერვისის წვდომის წერტილი

S-AP – Slave AP – დაქვემდებარებული AP

SDC – Software Defined Coefficient – პროგრამულად განსაზღვრული კოეფიციენტი

SDMA – Space Division Multiple Access – მრავალჯერადი წვდომა სივრცითი დაყოფით

SDN – Software Defined Network – პროგრამულად განსაზღვრული ქსელი

SFR – Soft Frequency Reuse – სიხშირის „რბილი“ განმეორებითი გამოყენება

SIC – Successive Interference Cancellation – ინტერფერენციების მიმდევრობითი ჩახშობა

SIFS – Short InterFrame Space – ფრეიმებს შორის მოკლე სივრცე

SIG – Signal – სიგნალი

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

SME – Station Management Entity – სადგურის მართვის ერთეული

SNR – Signal-to-Noise Ratio – სიგნალის ხმაურთან თანაფარდობა

STA – Station – სადგური

STF – Short Training Field – ტრენინგის მოკლე ველი

SU – Single User – ერთმომხმარებელიანი  
TDMA – Time-Division Multiple Access – მრავალჯერადი წვდომა დროითი დაყოფით  
TDOA – Time Difference of Arrival – ჩამოსვლის დროის სხვაობა  
TG – Task Group – სამუშაო ჯგუფი  
TID – Traffic Identification – ტრაფიკის იდენტიფიკაცია  
TIM – Traffic Indication Map – ტრაფიკის ინდიკაციის რუკა  
TOA – Time of Arrival – ჩამოსვლის დრო  
T-PCH – Temporary Primary Channel – დროებითი ძირითადი არხი  
TTI – Transmission Time Interval – გადაცემის დროის ინტერვალი  
TWT – Target Wakeup Time – გაღვიძების სამიზნე დრო  
TWT SP – TWT Service Period – TWT-ს მომსახურების პერიოდი  
TX – Transmission – გადაცემა  
TXOP – Transmission Opportunity – გადაცემის შესაძლებლობა  
U – Universal – უნივერსალური  
UL – Uplink – აპლინკი  
VAP – Virtual AP – ვირტუალური AP  
VHO – Vertical Handover – ვერტიკალური ჰენდოვერი  
VLC – Visible Light Communication – ხილული სინათლით კომუნიკაცია  
VPMM – Variable Pulse-Position Modulation – ცვლადი იმპულსურ-პოზიციური მოდულაცია  
VR – Virtual Reality – ვირტუალური რეალობა  
WAS – Wireless Access System – უსადენო წვდომის სისტემა  
WLAN – Wireless Local Area Network – უსადენო ლოკალური ქსელი

