

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

მამუკა ჯორბენაძე

მობილურ ქსელებში პაკეტის დაყოვნების შემცირების მეთოდის
კვლევა

წარდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

სადოქტორო პროგრამა: ტელეკომუნიკაცია

შიფრი: 0402

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

თბილისი, 0175, საქართველო

ივლისი, 2019 წ

საავტორო უფლება © 2019 წელი, მამუკა ჯორბენაძე

თბილისი

2019

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი
ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერი ვადასტურებთ, რომ გავცანით მამუკა ჯორბენაძის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: „მობილურ ქსელებში პაკეტის დაყოვნების შემცირების მეთოდის კვლევა“ და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

ივლისი, 2019 წელი

ხელმძღვანელი: ----- პროფესორი თ. კუპატაძე

რეცენზენტი: -----

რეცენზენტი: -----

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2019 წ.

ავტორი: მამუკა ჯორბენაძე

თემის დასახელება: „მობილურ ქსელებში პაკეტის დაყოვნების შემცირების მეთოდის კვლევა“

ფაკულტეტი: ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის

სადოქტორო პროგრამა: ტელეკომუნიკაცია

ხარისხი: აკადემიური დოქტორი

სხდომა ჩატარდა: _____, 2019 წ.

ინდივიდუალური პროცენტების ან ინსტიტუტების მიერ შემომოყვანილი დასახელების დისერტაციის გაცნობის მიზნით მოთხოვნის შემთხვევაში მისი არაკომერციული მიზნებით კოპირებისა და გავრცელების უფლება მინიჭებული აქვს საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტს.

ავტორის ხელმოწერა

ავტორი ინარჩუნებს დანარჩენ საგამომცემლო უფლებებს და არც მთლიანი ნაშრომის და არც მისი ცალკეული კომპონენტების გადაბეჭდვა და სხვა რაიმე მეთოდით რეპროდუქცია დაუშვებელია ავტორის წერილობითი ნებართვის გარეშე.

ავტორი ირწმუნება, რომ ნაშრომში გამოყენებული საავტორო უფლებებით დაცული მასალებზე მიღებულია შესაბამისი ნებართვა (გარდა ის მცირე ზომის ციტატებისა, რომლებიც მოითხოვენ მხოლოდ სპეციფიურ მიმართებას ლიტერატურის ციტირებაში, როგორც ეს მიღებულია სამეცნიერო ნაშრომების შესრულებისას) და ყველა მათგანზე იღებს პასუხისმგებლობას.

რეზიუმე

ინდუსტრიული პროცესების სრული ავტომატიზაცია, დისტანციური ქირურგია და ავტომობილების გადაადგილება ავტოპილოტის მეშვეობით არის *გამოყენების ვარიანტების* (Use Cases) მაგალითები, რომლებიც შესაძლებელი იქნება მომავალ 5G სისტემებში. მათ ეწოდებათ *კრიტიკული მისიის (დავალების)* მანქანური ტიპის კომუნიკაციის *გამოყენების ვარიანტები* და ისინი მოითხოვენ კავშირს ძალიან მაღალი საიმედოობითა და ხელმისაწვდომობით, ისევე როგორც ძალიან დაბალ დაყოვნებას დამაბოლოებელ მოწყობილობებს (End-to-End – E2E) შორის. ჩვენ შეგვიძლია ვაჩვენოთ რომ განხორციელებადია ისეთი 5G რადიო ინტერფეისის აგება რომელსაც შეუძლია ამ ყველაფრის უზრუნველყოფა.

სამომავლოდ მანქანათაშორისი (Machine-to-Machine – M2M) კომუნიკაცია შეადგენს ახალი ტიპის სერვისებსა და გამოყენების ვარიანტების დიდ ნაწილს რომლებსაც 5G სისტემები უზრუნველყოფენ. კომუნიკაციების ტექნოლოგიების პერსპექტივიდან M2M კომუნიკაცია შეიძლება გაიყოს ორ ძირითად კატეგორიად: პირველი ეს არის მასიური მანქანური ტიპის კომუნიკაცია (Machine-Type Communication – MTC), რომელიც უკავშირდება დიდი რაოდენობის დაბალბიუჯეტთან (low-cost) და დაბალი ენერგომომხმარების (low-energy) მოწყობილობების შეერთებებს საგნების ინტერნეტის (Internet of Things – IoT) კონტექსტში; ხოლო მეორე კრიტიკული MTC რომელიც იმით არის შთაგონებული რომ შესაძლებელი გახდეს დინამიური პროცესების რეალურ დროში კონტროლი და ავტომატიზაცია სხვადასხვა სფეროში, მაგალითად როგორცაა ინდუსტრიული პროცესების ავტომატიზაცია და წარმოება, ენერგო რესურსების დისტრიბუცია, ჭკვიანი სატრანსპორტო სისტემები და მოითხოვს ძალიან მაღალ საიმედოობას და ხელმისაწვდომობას ისევე როგორც ძალიან დაბალ E2E დაყოვნებას რომელიც ჩამოდის მილიწამის დონეზე.

მასიური MTC-სთვის უკვე არსებობს სტანდარტები ორივე 3GPP და IEEE ტექნოლოგიებში. თუმცა კრიტიკული MTC ჯერ კიდევ განვითარების სტადიაზეა და არსებობს უამრავი გამოწვევა, რომლებიც გამოკვლეული უნდა იქნეს მათ გადასაჭრელად. ჩვენ მივიღეთ ეს გამოწვევა, შევისწავლეთ განხორციელებადობის მოთხოვნები და შემოგთავაზეთ გადაჭრის გზები კრიტიკულად მნიშვნელოვანი MTC-სთვის 5G ქსელის ყველა ტექნოლოგიური კომპონენტებისა და არქიტექტურის შესაბამისად.

დისერტაციის მთავარი კვლევის საგანია პაკეტის დაყოვნების შემცირების მეთოდების კვლევა მომავალი თაობის მობილური კავშირის ქსელებში. განხილულია დაყოვნების შემცირებასთან დაკავშირებული საკვანძო საკითხები - თუ რატომ არის აქტუალური დღეს და არ იყო აქამდე. შესრულებულია მობილური კავშირის ქსელების რადიოარხების მოდელირება პაკეტების დაყოვნების შესაფასებლად.

დისერტაციაში წარმოდგენილი მთავარი სიახლეა უსადენო ქსელში დაყოვნების შემცირების ჰიბრიდულ ადაპტური ალგორითმი. განხილულია დაკარგული პაკეტის ჰიბრიდული ავტომატური განმეორების მოთხოვნის (Hybrid Automatic Repeat Request - HARQ) პროტოკოლი, პაკეტის გადაცემის დროის ინტერვალი (Transmission Time Interval – TTI) და ზომა - ბაიტებში. ჩატარებულია ექსპერიმენტული კვლევა რეალურ უსადენო მაღალსიჩქარიან - WLAN ქსელზე. დაკვირვებით ნაჩვენებია პაკეტის გადაცემის დროის ინტერვალისა და ზომის პრაქტიკული მნიშვნელობა მისი დაყოვნების შესამცირებლად.

ექსპერიმენტის შედეგებიდან ნაჩვენებია ასევე ვირტუალიზაციის გავლენა პაკეტის დაყოვნებაზე. განხილულია პროგრამულად განსაზღვრული ქსელების გამოყენების შესაძლებლობები, აგრეთვე წარმოდგენილია ქსელის არქიტექტურული გადაწყვეტა პაკეტის დაყოვნების შესამცირებლად მეხუთე თაობის მობილური კავშირის ფიჭური ქსელისთვის. შემუშავებულია პაკეტის დაყოვნების გაზომვის მეთოდი მობილური კავშირის ქსელის საბოლოო მომხმარებლების მოწყობილობებს შორის - დაყოვნება ბოლოდან-ბოლომდე (End-to-End).

შესწავლილია მომსახურების სახეები რომელთა რეალიზაცია მოითხოვს დაყოვნებას 1 მილიწამამდე. მოყვანილია მაგალითები და ერთი კონკრეტული მომსახურებისთვის - ავტოპილოტი/დაკავშირებული ავტომობილები, გაანალიზებულია თუ კონკრეტულად რატომ უნდა იყოს დაყოვნება 1 მილიწამზე ნაკლები. აღწერილი და გამოკვლეულია მეხუთე თაობის მობილური კავშირის ფიჭურ ქსელებში დაყოვნების შემცირების არსებული და კომერციულ ქსელებში უკვე დანერგილი მექანიზმები.

გაანალიზებულია მობილური რადიოკავშირის არხები მრავალსიხვიანი გავრცელებით. პაკეტების დაყოვნების შესაფასებლად მოდელირებულია მობილური ქსელების არხები. ექსპერიმენტის შედეგებზე დაყრდნობით შედარებულია დაყოვნებების მნიშვნელობები სხვადასხვა გამოთვლითი სიმძლავრეების მქონე ტერმინალური მოწყობილობებისთვის.

შექმნილია ტერმინალების დაკავშირების ისეთი დიზაინი რაც საშუალებას მოგვცემს გავზომოთ დაყოვნება მომხმარებლის მოწყობილობებს შორის - დაყოვნება ბოლოდან-ბოლომდე (E2E). ჩატარებულია შესაბამისი ექსპერიმენტი და მიღებულია შედეგები. შემუშავებულია მსგავსი ექსპერიმენტის ჩატარების სცენარები, რომელიც მოგვცემს უფრო მეტი მოცულობის ინფორმაციას დაყოვნების სიდიდის განსაზღვრისათვის არსებულ და მომავლის ქსელებში.

მიღებული შედეგების საფუძველზე გაკეთებულია დასკვნები და შემუშავებულია რეკომენდაციები. ასევე შესაძლებელია კვლევის შედეგად მიღებული ცოდნისა და გამოცდილების გამოყენება უნივერსიტეტის სასწავლო მასალებში, კერძოდ ლაბორატორიულ სამუშაოებში.

Abstract

Full automation of industrial processes, distance surveillance and movement of vehicles using autopilot are examples of use cases that can be made in future 5G systems. They are called as use cases of the mission-critical Machine Type communication and they require connection with very high reliability and availability, as well as very low latency between end-to-end E2E. We can show that it is possible to build a 5G radio interface that can provide all this.

In the future, the Machine-to-Machine - M2M communications are a new type of services and a large part of the applications that will be provided by 5G systems. M2M communication from the perspective of communications technologies can be divided into two main categories: the first is the Massive Machine-Type Communication MTC, which connects a large number of low-cost and low-energy devices in the context of the Internet of Things - IoT; And another is Critical MTC which is inspired to enable real-time control and automation of dynamic processes in various fields such as automation and production of industrial processes, distribution of energy resources, smart transport systems and requires high reliability and availability as well as Low E2E Latency becomes smaller than milliseconds.

Massive MTC already has standards for both 3GPP and IEEE technologies. However, the critical MTC is still under development and there are many challenges that need to be investigated. We took this challenge to studied the requirements of implementation and offered solutions for critical MTC in pursuance of all technological components and architecture of the 5G network.

The main research of the thesis is to investigate the methods of reduction of packet latency of the next generation mobile networks. Key issues related to reduction of delay are discussed - why it is urgent today and was not until now. Designed the modeling of the air interfaces of mobile networks to evaluate the latency of packets.

The main novelty in the dissertation is the hybrid adaptive algorithm in the wireless network for reduction of latency. Discussed influence on the packet latency of the Transmission Time Interval - TTI and size of the packet. Reviewed Hybrid Automatic Repeat Request - HARQ Protocol. Experimental research on real wireless high-speed WLAN network has been executed. The observation shows an practical importance of the Transmission Time Interval and size of the package for reducing of the latency.

The results of the experiment also shows the impact of virtualization on the packet latency. The possibilities for the use of Software Defined Networks are discussed, as well as the network architectural solution for decreasing packet latency for the fifth generation mobile network. The method for measurement of the packet delay has been developed between end user equipments of the mobile network - End-to-End Latency.

Cellular communication radio channels are analyzed by multi beam distribution. Cells of mobile networks are modeled to evaluate latency of data transmission.

Conclusions are made based on the results and recommendations have been developed. It is also possible to use knowledge and experience as a result of research in the university study materials, namely laboratory work.

სარჩევი

შესავალი	16
თავი 1. მობილური კავშირის ქსელების ზოგადი მიმოხილვა	21
1.1. ხმის გადაცემაზე ორიენტირებული - პირველი და მეორე თაობის ტექნოლოგიები	22
1.2. 3G და 4G - მობილური ფართოზოლოვანი შეღწევა.....	23
1.3. 5G - მობილური ფართოზოლოვანი შეღწევის მიღმა - ქსელური საზოგადოება (<i>Networked Society</i>).....	26
1.4. 5G ქსელის ზოგიერთი თავისებურება	29
თავი 2. პაკეტის დაყოვნების სიდიდე მომავალი თაობის ულტრასაიმედო კომუნიკაციებისთვის	30
2.1. მომსახურების ახალი სახეები რომლებიც უნდა დააკმაყოფილოს მომავალი თაობის მობილურმა ქსელებმა.....	30
2.1.1. ავტონომიური მართვა (ავტოპილოტი)/დაკავშირებული ავტომობილები	32
2.1.2. ჯანდაცვა	32
2.1.3. მრეწველობა	33
2.2. კრიტიკული მანქანათმშორისი კავშირის მთავარი საზომი პარამეტრები.....	34
2.3. რატომ უნდა იყოს დაყოვნების სიდიდე 1 მწმ ან ნაკლები	37
თავი 3. მობილური კავშირის ქსელების რადიოარხების მოდელირება პაკეტების დაყოვნების შესაფასებლად	41
3.1. მობილური კავშირის ქსელების რადიოარხების მოდელირება	41
3.2. რადიოკავშირის არხები მრავალსიხვიანი გავრცელებით.....	46
3.3. უსადენო კავშირის არხის სტატისტიკური აღწერა.....	48
3.4. მიმღების მიერ მიღებული სიგნალის ასლების სიმძლავრეების განაწილება	50
3.5. მობილური კავშირის MIMO-სისტემების რადიოარხების მათემატიკური მოდელი	53

3.6. მობილური კავშირის რადიოარხების მოდელირებით მიღებული ძირითადი შედეგები	58
თავი 4. პაკეტის დაყოვნების შემცირების არსებული მექანიზმები	59
4.1. საარხო დონის აგებულების გამარტივება	60
4.1.1. გადაცემის დროის ინტერვალი	60
4.1.2. ჰიბრიდული ავტომატური განმეორების მოთხოვნის პროტოკოლი - HARQ.....	66
4.1.3. ქსელის ფუნქციების ვირტუალიზაცია	67
თავი 5. უსადენო ქსელში დაყოვნების შემცირების ჰიბრიდულ-ადაპტური ალგორითმი.....	69
თავი 6. დაყოვნების გაზომვის მეთოდი ბოლოდან-ბოლომდე (End-to-End) მომხმარებლებს შორის.....	78
6.1. ექსპერიმენტის მიზანი და ამოცანა.....	78
6.2. ექსპერიმენტისთვის არჩეული კავშირის სქემა	81
6.3. ფაქტორები რომლებიც გავლენას ახდენენ დაკვირვების შედეგებზე	84
6.4. ექსპერიმენტის დაგეგმვა და მიღებული შედეგები.....	86
სამომავლო კვლევითი მიმართულება	91
დასკვნა	92
გამოყენებული ლიტერატურის ნუსხა	94
დანართები.....	96

ცხრილების ნუსხა

ცხრილი 1. მცირე მასშტაბის მიყუჩებების წარმოქმნის მექანიზმების, კატეგორიების და მიყუჩებების შედეგების კლასიფიკაცია.....	45
ცხრილი 2. დოპლერის ძვრის სიხშირეების მნიშვნელობები 900 და 2025 მგჰც-სიხშირეებზე მიმღების გადაადგილების სხვადასხვა V-სიჩქარეებისათვის	47
ცხრილი 3.წარმატებით დაბრუნებული და დაკარგული პაკეტები 3 წმ გადაცემის სიხშირისა და 2 წმ პასუხზე ლოდინის შემთხვევაში.....	63
ცხრილი 4.წარმატებით დაბრუნებული და დაკარგული პაკეტები 1 წმ გადაცემის სიხშირისა და 1 მილიწამი პასუხზე ლოდინის შემთხვევაში.....	63
ცხრილი 5. წარმატებით დაბრუნებული და დაკარგული პაკეტები 1 წმ გადაცემის სიხშირის, 1 მლწმ პასუხზე ლოდინისა და 12 ბაიტი ზომის პაკეტების გადაცემის შემთხვევაში.....	64
ცხრილი 6. speedtest.net-დან ჩამოტვირთული გაზომვის შედეგები	80
ცხრილი 7. ექსპერიმენტის ჩასატარებლად მოთხოვნილი რესურსები	90

ნახაზების ნუსხა

ნახ. 1. ფიჭური კავშირის თაობები.....	21
ნახ. 2. უსადენო ტექნოლოგიების თავმოყრა (კონვერგენცია).....	25
ნახ. 3. 5G შედგება LTE-ს ევოლუციისა და ახალი რადიო შედგენილებისგან	28
ნახ. 4. მომსახურებების მრავალფეროვნება, გამოყენების ვარიანტები და მოთხოვნები	31
ნახ. 5. დაყოვნების განაწილება ITU-T-ს "ტაქტილური ინტერნეტის" ანგარიშის საფუძველზე. რადიოინტერფეისის დაყოვნების სიდიდედ თითოეულ მიმართულებაზე შეგვიძლია ვივარაუდოდ 100 მკწმ.	35
ნახ. 6. კრიტიკული MTC-ს ტევადობა - მხარდაჭერილი მოწყობილობების რაოდენობა ერთი შედგენის წერტილისთვის (სადგურისთვის) წამტანი სიხშირით 5,2 გჰც და ზოლის სიგანით 100 მჰც. პაკეტის მიახლოებითი ზომა 100 ბიტი, სენსორის დაყოვნების დრო 1 მილიწამი	37
ნახ. 7. სიგნალის დონის ცვლილების დამახასიათებელი გრაფიკები.....	42
ნახ. 8. შემთხვევით სტაციონალურ ფართო გაგებით რადიარხში არაკორელირებული გაფანტვით ოთხი ავტოკორელაციური ფუნქციის თანაფარდობები	50
ნახ. 9. მრავალსიხვიანი არხის დაყოვნების ტიპური პროტოკოლი	51
ნახ. 10. არხების კლასიფიკაცია.....	53
ნახ. 11. MIMO-სისტემის სტრუქტურული სქემა.....	54
ნახ. 12. რადიოსიგნალის მრავალსიხვიანი გავრცელება	55
ნახ. 13. ვიბრატორების მესერი.....	56
ნახ. 14. ექსპერიმენტის ჩასატარებლად აგებული Wi-Fi ქსელის ტოპოლოგია	62
ნახ. 15. დაკარგული პაკეტების რაოდენობის საშუალო მნიშვნელობები ექსპერიმენტის სამივე სცენარიდან	65

ნახ. 16. ჰიბრიდული ავტომატური განმეორების მოთხოვნის დამუშავება ..	66
ნახ. 17. ტრადიციული და ვირტუალური არქიტექტურების შედარება	68
ნახ. 18. ჰიბრიდულ ადაპტური ალგორითმის ბლოკ სქემა	74
ნახ. 19. დაკვირვების ჩასატარებლად აგებული ქსელი.....	75
ნახ. 20. დაყოვნების საშუალო მნიშვნელობა	75
ნახ. 21. კვანძების რაოდენობის (ნახტომების - Hops) გავლენა დაყოვნებაზე	76
ნახ. 22. კვანძების რაოდენობის გავლენა დაყოვნებაზე	77
ნახ. 23. ავტომობილის კომუნიკაციის მაგალითები 5G ქსელში	79
ნახ. 24. www.speedtest.net-ის გრაფიკული ინტერფეისი გაზომვის პროცესში.....	80
ნახ. 25. დაყოვნებისა და სხვა პარამეტრების გაზომვის შედეგები	81
ნახ. 26. VPN კლიენტების ერთმანეთთან კავშირის სქემა, მობილური ქსელის გამოყენებით	82
ნახ. 27. დაშორებული წვდომის VPN ქსელი.....	84
ნახ. 28. ქსელის ნაწილები, რომლებსაც გაივლიან პაკეტები მობილური ქსელის გარდა	86
ნახ. 29. ექსპერიმენტის დროს გამოყენებული VPN კლიენტის მონაცემები ...	89

გამოყენებული აბრევიატურების ნუსხა

1G – First Generation (Mobile Technology)
2G – Second Generation (Mobile Technology)
2,5G - Generation (Mobile Technology)
3G – Third Generation (Mobile Technology)
3GPP - Third Generation Partnership Project
4G – Fourth Generation (Mobile Technology)
5G - Fifth Generation (Mobile Technology)
CSV - Comma Separated Values
E2E- End-to-End
IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers
IoT- Internet of Things
GRE - Generic Routing Encapsulation
LTE - Long-Term Evolution
NB-LTE – Node B LTE
M2M- Machine-to-Machine
MTC- Machine-Type Communication
VPN - Virtual Private Network
NMT – Nordic Mobile Telephone
AMPS – Advanced Mobile Phone System
TACS – Total Access Communication System
GSM – Global System for Mobile Communications
GSM-1800 – Global System for Mobile Communications 1800 MHz standard
IS-136 – Interim Standard 136
PDC – Personal Digital Cellular
IS-95 – Interim Standard 95
WCDMA – Wideband Code Division Multiple Access
HSPA – High Speed Packet Access
HSDPA - High Speed Downlink Packet Access
CDMA2000 – Code Division Multiple Access 2000
TD-SCDMA – Time Division Synchronous Code Division Multiple Access
EDGE – Enhanced Data rates for GSM Evolution
FDD – Frequency Division Duplex
TDD – Time Division Duplex
EPC – Enhanced Packet Core
URLLC – Ultra-Reliable and Low Latency Communications
KPI – Key Performance Indicator
ITU-T – International Telecommunication Union Telecommunication
Standardization Sector
ETSI – European Telecommunications Standards Institute
OFDM - Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
OFDMA – Orthogonal Frequency-Division Multiplexing Access
INR – Interference plus noise ratio

MIMO – Multiple Input Multiple Output
LOS – Line-Of-Sight
NLOS – Non-Line-Of-Sight
SNR – Signal-to-noise ratio
PDF – Power Delay Profile
ISI - InterSymbol Interference
BLAST – BLocked ASynchronous Transmission
Wi-Fi – wireless fidelity
ICMP – Internet Control Message Protocol
MAC – media access control
SDN – Software Defined Networks
PRACH – Physical Random Access Channel
TTI – Transmission Time Interval
ARQ – Automatic Repeat Request
HARQ – Hybrid Automatic Repeat Request
OSI – Open Systems Interconnection
PHY – physical layer
IP – Internet Protocol
TX – Transmitter
ACK – acknowledgement
NACK – negative-acknowledgement
SGW – Serving Gateway
PDNGW – Packet Data Network Gateway
NFV – Network Function Virtualization
V2P – vehicle-to-person
V2N – vehicle-to-network
V2V – vehicle-to-vehicle
V2I – vehicle-to-infrastructure
CSV – comma-separated values
GMT – Greenwich Mean Time
AM – ante meridiem Time Before noon
MS – Millisecond
DSL – Digital Subscriber Line
S2S – Site-to-Site
GRENA – Georgian Research and Educational Networking Association
IOS – iPhone operating system
ФАПЧ – Фа́зовая автоподстро́йка частоты

მადლიერება

ეს ნაშრომი ვერ შედგებოდა რომ არა ბევრი ადამიანის ძალისხმევა რომელთა სახელებიც არ ჩანს სატიტულო გვერდზე. თუმცა მათი შრომა, კოოპერაცია, მეგობრობა და ურთიერთგაგება იყო ძალიან მნიშვნელოვანი დისერტაციის მომზადებისას.

მადლობას ვუხდი ჩემს ხელმძღვანელს, ყველა ჩემს კოლეგებს უნივერსიტეტში რომლებმაც წვლილი შეიტანეს ამ დისერტაციის შესრულებისას, შემოთავაზებული წინადადებების, რჩევების და შინაარსზე გაკეთებული შენიშვნებისა და კომენტარებისთვის.

დისერტაციაზე მუშაობის პროცესი აერთიანებს ტელეკომუნიკაციის დარგში მომუშავე მაღალი კვალიფიკაციის ინჟინრებსა და სპეციალისტებს. რომ არა მათი ძალისხმევა ეს დისერტაციავერ შედგებოდა.

დაბოლოს, მადლიერი ვარ ჩემი ოჯახის, რომელიც მხარში მედგა დისერტაციაზე მუშაობის მართლაც ხანგრძლივი პერიოდის განმავლობაში.

შესავალი

პრობლემის აქტუალობა. ბოლო წლების განმავლობაში სწრაფად იზრდება ინტერესი რადიოკავშირის სისტემებისადმი და მათ მიერ უზრუნველყოფილი უკაბელო მომსახურების სერვისებისადმი – იქნება ეს ხმა, მონაცემები თუ მულტიმედია. ასევე მომატებული IoT (Internet of Things), დიდი მოცულობის მონაცემთა (Big Data) და ე.წ. Cloud-based სერვისების არსებობა ახალ მოთხოვნებს უყენებს თანამედროვე და მომავალი თაობის მობილურ ქსელებს. თანამედროვე ქსელებით მიწოდებულ მზარდი რაოდენობის სერვისებს შორის მნიშვნელოვან ადგილს იკავებს ქსელების გამოყენება მანქანათაშორის კომუნიკაციაში, სადაც ქსელის ზოგიერთი პარამეტრი კრიტიკულად მნიშვნელოვანია. უმნიშვნელოვანესია რომ მობილურმა ოპერატორებმა უზრუნველყონ ქსელის ძირითადი მახასიათებლების მაღალი ხარისხი. კერძოდ, ეს არის მომხმარებელთათვის დამაკმაყოფილებელი სერვისის მიწოდების ფუნდამენტური მოთხოვნა.

განსაკუთრებით მობილური ქსელის აქტიურმა გამოყენებამ საგნების ინტერნეტის ტექნოლოგიაში (IoT – Internet of Things) განაპირობა უპრეცედენტო მოთხოვნა საწარმოო პროცესების, ავტომობილებისა და სხვა მანქანათშორისი კომუნიკაციის მართვისა და დინამიური პროცესების მონიტორინგის მიმართ ნებისმიერ ადგილას და ნებისმიერ დროს. შედეგად, გაიზარდა არა მხოლოდ მობილური მონაცემების მოცულობა, არამედ გარდაიქმნა ქსელების შემადგენლობა და სტრუქტურა - გატარების ზოლი, რომელიც მნიშვნელოვანი იყო წინა თაობის მობილურ ქსელებში LTE-ს ჩათვლით ეხლა უკვე მთავარი ინტერესის საგანია პაკეტის დაყოვნება.

ეს ტენდენცია ზრდადია რადგან, მატულობს როგორც ქსელზე მიერთებული მოწყობილობების (ავტომობილები, მანქანა დანადგარები, სხვადასხვა ბუნებრივი მოვლენების გამზომი სენსორები და სხვ.) მრავალფეროვნება ისე მათი რაოდენობა. სხვადასხვა ტიპის ქსელებს

გააჩნიათ განსხვავებული მოთხოვნები ქსელის ისეთ პარამეტრებზე როგორცაა სიხშირული ზოლის სიგანე, გამტარუნარიანობა, სინქრონიზაცია, ამ კვლევის საგანია მათ შორის ერთ-ერთი - ქსელში გადაცემული მონაცემების. ახალი თაობის ქსელები უნდა ითვალისწინებდნენ განსხვავებულ (მცირე) დაყოვნების სიდიდეს კრიტიკული მანქანათშორისი კომუნიკაციისთვის. ყოველივე ეს მიიღწევა დაყოვნების შემცირების მეთოდების მეშვეობით.

უკვე მოახლოებული, მომავლის 5G - მეხუთე თაობის მობილური ქსელი, რადიკალურად შეცვლის ადამიანების ცხოვრებას, მათ ყოველდღიურ ცხოვრებას და სამუშაოს. მისი მიზანია მომხმარებლებისთვის უფრო მაღალი მონაცემთა გადაცემის სიჩქარის, საიმედოობის და უსაფრთხოების უზრუნველყოფა. მომავალი მობილური მანქანათშორისი კომუნიკაციის MTC (Machine Type Communication) სერვისები დაჯგუფდება ორ ძირითად კატეგორიად - მასობრივი MTC და კრიტიკული MTC. კრიტიკული MTC-ს მომსახურებებისთვის მნიშვნელოვანია მცირე დაყოვნება. ამიტომაც, 5G ქსელმა უდნა უზრუნველყოს დაყოვნება 1 მილიწამამდე ავტომატური მოწყობილობებისთვის, სადაც უმნიშვნელოვანესი როლი მიენიჭება პაკეტის დაყოვნების შემცირების მეთოდებს. ასეთი ტიპის მომსახურების ერთ-ერთ ძალიან კარგ მაგალითს წარმოადგენს, თვითმართვადი ავტომობილები, რომელთა გამართული ფუნქციონირება დამოკიდებული იქნება რამდენიმე მაჩვენებელზე, სახელდობრ მონაცემების დაყოვნებაზე, კავშირის საიმედოობასა და ხელმისაწვდომობაზე.

LTE გახდა ყველაზე წარმატებული მობილური უსადენო ფართოზოლოვანი ტექნოლოგია, რომელიც 2016 წლის დასაწყისისთვის ემსახურებოდა ერთ მილიარდზე მეტ მომხმარებელს და მხარს უჭერს გამოყენების სფეროების ფართო სპექტრს. 25 წლის წინანდელ, მხოლოდ ხმის გადამცემ ანალოგურ სისტემებთან შედარებით სხვაობა შთამბეჭდავია. მიუხედავად იმისა რომ LTE-ს განვითარება და დანერგვა ჯერ კიდევ არ

არის დასკვნით (ფინალურ) ეტაპზე, ინდუსტრია უკვე დგარს მობილური კომუნიკაციების მომდევნო თაობის გზაზე, რომელიც ჩვეულებრივ შეესაბამება მეხუთე თაობას ან უბრალოდ 5G-ს. მობილური ფართოზოლოვანი შეღწევა არის და იქნება მომავალი ფიჭური კომუნიკაციის მნიშვნელოვანი ნაწილი, მაგრამ მომავალი უსადენო ქსელები ასევე მოიცავენ *გამოყენების ვარიანტების* მნიშვნელოვნად ფართო სპექტრს და შესაბამისად მოთხოვნათა ფართო დიაპაზონს [15].

სამუშაოს მიზანი და კვლევის ამოცანები. დისერტაციის მიზანს წარმოადგენს 5G სატელეკომუნიკაციო მობილური ქსელში კრიტიკული მანქანათმშორისი მომსახურებებისთვის პაკეტის გადაცემის დაყოვნების კვლევა, ფაქტორების შესწავლა, რომლებიც გავლენას ახდენენ დაყოვნებაზე, მის გასაუმჯობესებლად შესწავლილი მეთოდების შესწავლა და კვლევა.

დასახული მიზნის მიღწევისათვის გადაწყვეტილი იქნა შემდეგი ამოცანები:

1. ქსელის მაჩვენებლების ურთიერთდამოკიდებულების კვლევა ჩატარებული ექსპერიმენტის შედეგად მიღებული მონაცემების ანალიზის საფუძველზე;
2. აღნიშნული ანალიზის საფუძველზე, წარმოდგენილია დაყოვნების შესამცირებლად შესწავლილი მეთოდები;
3. შემუშავებულია პაკეტის დაყოვნების განსაზღვრის პრაქტიკული მეთოდები;
4. დაყოვნების გაზომვის შემუშავებული მეთოდი შემოწმებულია არსებულ ქსელებზე;
5. გამახვილებულია ყურადღება აღნიშნული კვლევის პრაქტიკულ გამოყენებაზე, უნივერსიტეტის სასწავლო ლაბორატორიებსა და მოქმედ კომერციულ ქსელში.

კვლევის მეთოდოლოგია. სადისერტაციო ნაშრომის შედეგების მისაღებად ძირითადად გამოყენებულია თვისებრივი კვლევის მეთოდოლოგია, რაც გულისხმობს საკვლევი საკითხისა და შესაბამისად

შერჩეული სამეცნიერო ლიტერატურის (სტატიები, სადისერტაციო ნაშრომები, სახელმძღვანელოები) სიღრმისეულ შესწავლასა და ანალიზს. ასევე გამოყენებულია დისკუსიები ხელმძღვანელთან საკვლევი თემის გარშემო.

კვლევის ერთ-ერთ მეთოდს წარმოადგენს პრაქტიკული ექსპერიმენტი, პაკეტის დაყოვნებაზე დაკვირვების ჩასატარებლად გამოყენებულია Wi-Fi ქსელი. ასევე შექმნილია მეორე, მესამე და მეოთხე თაობის ქსელებში დაყოვნების სიდიდის რაოდენობრივი კვლევისთვის - ვირტუალური „კლიენტ-სერვერის“ ქსელის დიზაინი, რომლითაც შესაძლებელია დაყოვნების გაზომვა ბოლოდან-ბოლომდე (End-to-End) - საბოლოო მომხმარებლებს შორის.

მეცნიერული სიახლე. მეხუთე თაობის ქსელში კრიტიკული მანქანათშორისი კომუნიკაციის (M2M) მომსახურებებისთვის შემუშავებული იქნა უსადენო ქსელში ჰიბრიდულ ადაპტური ალგორითმი. მომხმარებლის მოწყობილობების შორის დაყოვნების გაზომვის მიზნით შეიქმნა ქსელის სპეციალური დიზაინი ტერმინალების ერთმანეთთან დასაკავშირებლად, ჩატარდა შესაბამისი ექსპერიმენტი.

პრაქტიკული ღირებულება და სამუშაოს შედეგების რეალიზაცია. დისერტაციაში აღწერილი ექსპერიმენტი მზად არის იმისათვის რომ დღესვე დაინერგოს უნივერსიტეტში ტელეკომუნიკაციის დეპარტამენტის დამამთავრებელი კურსის ან მეორე საფეხურის (მაგისტრატურის) სტუდენტებისთვის მობილური კავშირის ტექნოლოგიების სწავლებისას როგორც ლაბორატორიული სამუშაო.

შემუშავდა საბოლოო მომხმარებლებს შორის პაკეტის დაყოვნების გაზომვის ერთ-ერთი მეთოდი შესაბამისი სქემითა და შესრულების გეგმით, რომელიც საკუთარი კვლევებისთვის შეუძლიათ გამოიყენონ მობილური სატელეკომუნიკაციო და ინტერნეტ მომსახურებათა მიმწოდებლებმა, თუ მათ მიერ მოხდება ინვესტირება აღნიშნული მეთოდის დახვეწა, გაუმჯობესების მიზნით.

გაზომვის მეთოდი განვითარებისა და სრულყოფის შემდეგ შესაძლოა გამოყენებულ იქნეს კომერციული მიზნებითაც.

სამუშაოს აპრობაცია. სადისერტაციო ნაშრომის საკითხები განიხილებოდა და მოხსენიებული იქნა ქართულ იტალიურ საერთაშორისო კონფერენციაზე „სხვადასხვა ინდუსტრიის დინამიური და უკანასკნელი ტენდენციები ევროპასა და საქართველოში“. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ადმინისტრაციული კორპუსი. 2018 წლის 18 ოქტომბერი, და საქართველოს ეროვნული უნივერსიტეტში გამართულ კონფერენციაზე „საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია სეუ 2017“. თბილისი, 2017 წელი.

პუბლიკაციები. სტატია „ფიჭური კავშირის ზოგიერთი პრობლემური საკითხის კვლევა პროგრამირებადი რადიო ტექნოლოგიების გამოყენებით“, გამოქვეყნებულია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის 2017 წლის N3 ყოველკვარტალურ სამეცნიერო პუბლიკაციების გამოცემაში.

„ფიზიკური პროცესების მონიტორინგი და მართვა სენსორული ქსელების გამოყენებით“, ევრორეგიონული სასწავლო უნივერსიტეტის ყოველწლიური სამეცნიერო კონფერენციის სტატიების კრებული N1, 2017.

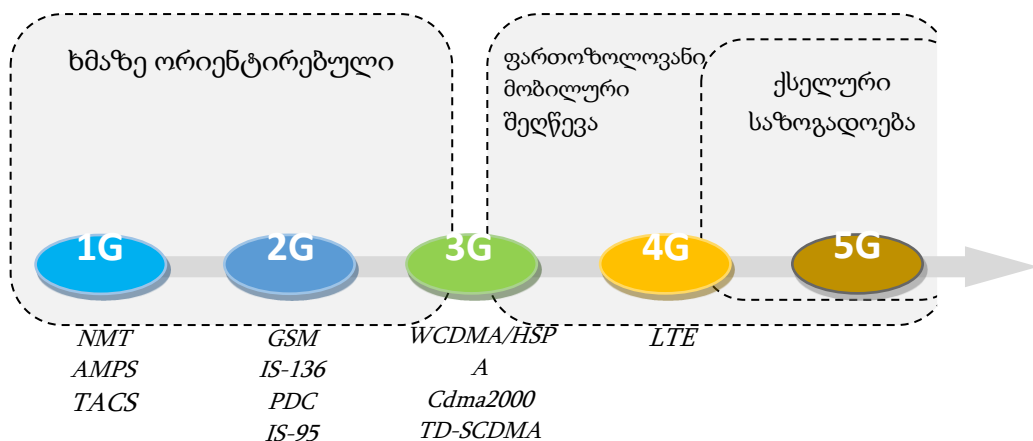
„ჭკვიანი სახლები, ქალაქები და საგნების ინტერნეტი უსადენო ქსელების გამოყენებით“, საქართველოს ეროვნული უნივერსიტეტის სამეცნიერო კონფერენციის სტატიების კრებული N1, 2017.

დისერტაციის სტრუქტურა და მოცულობა. დისერტაცია შეიცავს: ტიტულის გვერდს, ხელმოწერების გვერდს, საავტორო უფლებების გვერდს, რეზიუმეს ქართულ და ინგლისურ ენაზე, შინაარსს, ცხრილების ნუსხას, ნახაზების ნუსხას, გამოყენებული აბრევიატურების ნუსხას, მაღლიერების გვერდს. ძირითადი ტექსტი შედგება შესავლის, თავების, ქვეთავებისა და პარაგრაფებისგან, დასკვნებისაგან და ბოლოს გამოყენებული ლიტერატურის ნუსხას. საერთო მოცულობა შეადგენს 106 გვერდს.

თავი 1. მობილური კავშირის ქსელების ზოგადი მიმოხილვა

მობილური კომუნიკაცია გახდა ყოველდღიური მოხმარების საგანი. ბოლო ათწლეულებში ის რამდენიმე ნარჩევი ინდივიდებისთვის შექმნილი ძვირადღირებული ტექნოლოგიისგან გარდაიქმნა მსოფლიოს მოსახლეობის უდიდესი ნაწილის მიერ გამოყენებულ თანამედროვე ყველგან გავრცელებულ სისტემად.

მსოფლიოს მოევლინა მობილური კომუნიკაციათა სისტემის ოთხი თაობა, რომელთაგან თითოეული ასოცირებული იყო ტექნოლოგიების განსაზღვრულ ნაკრებთან და მათ მიერ მხარდაჭერილ კონკრეტულ გამოყენების ვარიანტებთან ნახ. 1. თაობები და მათ შორის ნაბიჯები ამ ნაშრომში გამოიყენება დისერტაციის შინაარსის წარმოსადგენად როგორც საერთო მონაცემები. დანარჩენი ნაწილი მიძღვნილია კვლევის მთავარ საგანზე - პაკეტის დაყოვნებაზე მობილური კავშირის ქსელებში და განსაკუთრებული ყურადღება არის გამახვილებული მეოთხე (LTE) და მეხუთე (5G) თაობის ქსელებში დაყოვნების როგორც ქსელის მახასიათებელი პარამეტრის მნიშვნელობაზე [15].



ნახ. 1. ფიჭური კავშირის თაობები

1.1. ხმის გადაცემაზე ორიენტირებული - პირველი და მეორე თაობის ტექნოლოგიები

პირველი თაობის (1G) სისტემები იყო მხოლოდ ხმოვანი, ანალოგური მობილური სატელეფონო სისტემები 1980-იან წლებში, ხშირად ხელმისაწვდომი იყო ეროვნული დონეზე, საერთოდ არ იყო ან შეზღუდული იყო საერთაშორისო როუმინგი. 1G სისტემები მოიცავდა NMT, AMPS და TACS ტექნოლოგიებს. მობილური კომუნიკაცია ხელმისაწვდომი იყო 1G სისტემამდეც, მაგრამ, როგორც წესი, მცირე მასშტაბით და მიზნად ისახავდა ხალხის ძალიან მცირე შერჩეულ ჯგუფს.

მეორე თაობის (2G) სისტემები გამოჩნდნენ ადრეულ 1990-იან წლებში. 2G ტექნოლოგიების მაგალითები მოიცავს ევროპული წარმოშობის GSM ტექნოლოგიას, ამერიკულ IS-95/CDMA და IS-136/TDMA და იაპონურ PDC ტექნოლოგიებს. 2G სისტემები იყო კვლავ ხმაზე ორიენტირებული, მაგრამ სრულად ციფრული ტექნოლოგიის წყალობით უზრუნველყოფილი იყო მნიშვნელოვნად მაღალი ხარისხი. ამ ტექნოლოგიებიდან ზოგიერთი წლების შემდეგ გაფართოვდა პაკეტურ მონაცემთა მომსახურებების მხარდასაჭერად. ეს გაფართოება ხანდახან მოიხსენიება როგორც 2,5G იმის მისათითებლად რომ მათ ფესვები არის 2G ტექნოლოგიიდან, მაგრამ აქვთ შესაძლებლობების გაცილებით უფრო ფართო დიაპაზონი ვიდრე თავდაპირველ ტექნოლოგიებს. EDGE არის 2,5G ტექნოლოგიის კარგად ცნობილი მაგალითი. GSM/EDGE ჯერ კიდევ ფართოდ გამოიყენება სმარტფონებში, მაგრამ ასევე ფართოდ გამოიყენება ზოგიერთი მანქანური ტიპის კომუნიკაციაში, როგორცაა განგაშის სიგნალები, გადახდის სისტემები, და უსაფრთხოების მონიტორინგის სისტემები.

1.2. 3G და 4G - მობილური ფართოზოლოვანი შეღწევა

1990-იანების განმავლობაში, დაიწყო მოთხოვნა არა მარტო ხმის არამედ მონაცემთა სერვისებზე, რამაც გამოიწვია ახალი თაობის ფიჭური ტექნოლოგიის აუცილებლობა, რომელიც გამოვიდოდა *მხოლოდ ხმოვანი* შეტყობინებების ჩარჩოებიდან. ამავდროულად გვიან 1990-იან წლებში მიუხედავად იმისა რომ 2G GSM ევროპაში განვითარებული იყო, უკვე გახდა დეფაქტო გლობალური სტანდარტი. 3G ტექნოლოგიების გლობალური დაფარვის უზრუნველსაყოფად, ცხადი გახდა რომ 3G-ს განვითარება გლობალურ საფუძველზე უნდა განხორციელებულიყო. ამის გამარტივებისთვის ჩამოყალიბდა მესამე თაობის პარტნიორობის პროექტი (*Third-Generation Partnership Project - 3GPP*) 3G WCDMA და TD-SCDMA ტექნოლოგიების განვითარებისთვის. ცოტა ხნის შემდეგ შეიქმნა პარალელური ორგანიზაცია 3GPP2 კონკურენტი 3G CDMA2000 ტექნოლოგიის შესაქმნელად 2G IS-95 ტექნოლოგიის ევოლუციის შედეგად.

WCDMA-ს პირველი გამოშვება დასრულდა 1999 წელს. ის მოიცავდა არხებით კომუტირებად ხმოვან და ვიდეო სერვისებს და მონაცემთა სერვისებს ორივე - პაკეტურად კომუტირებად და არხებით კომუტირებად მატარებლებს.

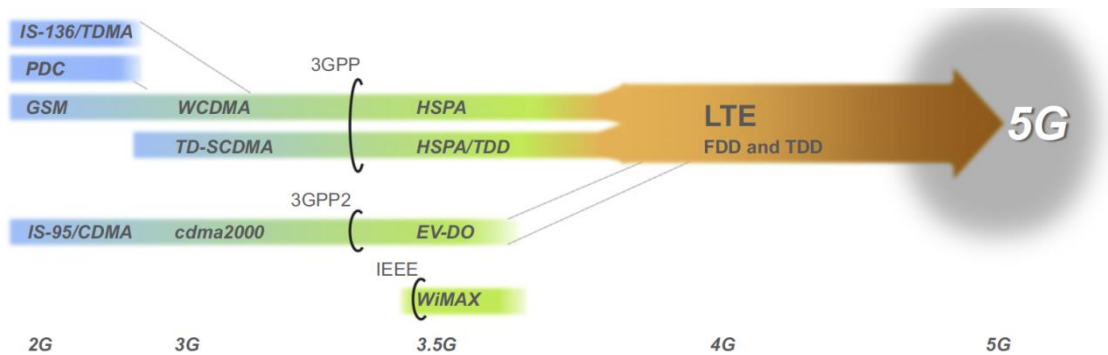
WCDMA-ს პირველი მნიშვნელოვანი გაფართოება გამოჩნდა მაღალ სიჩქარიანი ჩამოტვირთვის პაკეტური შეღწევის (*High Speed Downlink Packet Access - HSDPA*) წარდგენით მეხუთე გამოშვებაში, რომელსაც მოყვა გაზრდილი ატვირთვა მეექვსე გამოშვებაში, ერთობლივად ეს გამოშვებები ცნობილია როგორც მაღალ სიჩქარიანი პაკეტური შეღწევა (*High Speed Packet Access - HSPA*). HSPA ზოგჯერ მოიხსენიება როგორც 3.5G, რომელიც უზრუნველყოფს „ჭეშმარიტ“ ფართოზოლოვან მობილურ კავშირს რამდენიმე მბიტ/წმ სიჩქარით და თავსებადია თავდაპირველ 3G ტექნიკურ პირობებთან. მობილური ფართოზოლოვანი შეღწევის მხარდაჭერა გახდა ისეთი სმარტფონების სწრაფი განვითარების საფუძველი როგორცაა iPhone

და Android მოწყობილობების ფართო სპექტრი. მასობრივი ბაზრისთვის მობილური ინტერნეტის ფართო ხელმისაწვდომობის გარეშე სმარტ ტელეფონების გამოყენება იქნებოდა მნიშვნელოვნად შემცირებული და მკაცრად შეზღუდული. ამავდროულად, სმარტფონების მასიური გამოყენება და პაკეტურ-მონაცემებზე დაფუძნებული სერვისების ფართო სპექტრი, როგორცაა სოციალური ქსელი, ვიდეო, სათამაშო და ინტერნეტ-მაღაზია, მოითხოვს გატარების ზოლის გაზრდასა და სპექტრული ეფექტურობის გაუმჯობესებას. მომხმარებლებისთვის რომლებიც უფრო და უფრო მეტად იყენებენ მობილურ მომსახურებებს იზრდება ასევე მათი მოლოდინი მონაცემთა გადაცემის სიჩქარის გაზრდისა და დაყოვნების შემცირების თვალსაზრისით. ეს მოთხოვნები ნაწილობრივ დაკმაყოფილებული იყო HSPA-ს უწყვეტი და ჯერ კიდევ მიმდინარე ევოლუციით, მაგრამ ამან გამოიწვია ასევე დისკუსია 4G ტექნოლოგიაზე და შუა 2000-იან წლებში.

4G LTE ტექნოლოგია თავდაპირველად პაკეტურ მონაცემთა მხარდაჭერისთვის შემუშავდა და 3G-ისგან განსხვავებით არ გააჩნია არხებით კომპუტირებადი ხმოვანი შეტყობინების გადაცემა, სადაც HSPA იყო როგორც დამატება (add-on), რათა გარდა არსებული ტექნოლოგიისა უზრუნველყო ასევე მაღალი ხარისხის პაკეტური მონაცემები. ყურადღების ცენტრში იყო ფართოზოლოვანი მობილური შეღწევის მომსახურებები მკაცრი მოთხოვნებით მონაცემთა გადაცემის მაღალ სიჩქარეზე, დაბალ დაყოვნებაზე და მაღალ გამტარუნარიანობაზე. სპექტრის მოქნილობა და მაქსიმალური საერთოობა FDD და TDD გადაწყვეტილებებს შორის იყო სხვა მნიშვნელოვანი მოთხოვნები. შეიქმნა ასევე ძირითადი ქსელის (Core Network) ახალი არქიტექტურა ცნობილი როგორც Enhanced Packet Core (EPC), რათა შეეცვალა GSM და WCDMA/HSPA ტექნოლოგიებში გამოყენებული არქიტექტურა. LTE- ის პირველი ვერსია იყო 3GPP- ის სპეციფიკაციის 8 გამოშვების ნაწილი, ხოლო პირველი კომერციულ გამლა

შედეგად 2009 წლის ბოლოს, რასაც მოჰყვა LTE ქსელების სწრაფი და მსოფლიო გაშლა.

LTE-ის ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი ასპექტია ერთი ტექნოლოგიის მსოფლიო აღიარება, განსხვავებით წინა თაობებისგან, რომელთათვისაც არსებობს რამდენიმე კონკურენტი ტექნოლოგია, ნახ. 2. ერთიანი, საყოველთაოდ აღიარებული ტექნოლოგია აჩქარებს ახალი სერვისების განვითარებას და ამცირებს ხარჯებს როგორც მომხმარებლის ასევე ქსელ ოპერატორისთვის.



ნახ. 2. უსადენო ტექნოლოგიების თავმოყრა (კონვერგენცია)

2009 წლიდან კომერციულ დანერგვასთან ერთად LTE მნიშვნელოვნად ევოლუციონირდა მონაცემთა გადაცემის სიჩქარის, გამტარუნარიანობის, სპექტრის და გაშლის მოქნილობის და გამოყენების დიაპაზონის თვალსაზრისით. მომიჯნავე ლიცენზირებულ სპექტრის მაკროცენტრული განლაგებით 20 მგჰც სიხშირულ ზოლში 300 მბიტ/წმ მონაცემთა გადაცემის პიკური სიჩქარეებით, ვერსია 13-ში LTE-ს ევოლუციას შეუძლია მულტი-გბიტ/წმ გადაცემის პიკური სიჩქარის მხარდაჭერა საანტენო ტექნოლოგიების, მრავალადგილიანი კოორდინაციის, ფრაგმენტირებული და ასევე არალიცენზირებულ სპექტრის ექსპლოატაციის გაუმჯობესების ხარჯზე. LTE-ის ევოლუციამ ასევე მნიშვნელოვნად გააფართოვა გამოყენების ვარიანტები მობილური ფართოზოლოვანი კავშირის მიღმა, მაგალითად, გააუმჯობესა მასიური მანქანური ტიპის კომუნიკაციის

მხარდაჭერა და წარადგინა პირდაპირი მოწყობილობა-მოწყობილობა კომუნიკაცია.

1.3. 5G - მობილური ფართოზოლოვანი შეღწევის მიღმა - ქსელური საზოგადოება (*Networked Society*)

LTE დანერგვის არც თუ ისე ადრეულ ეტაპზეა, ამიტომ ინდუსტრია უკვე დგარს მობილური კავშირის მომავალი თაობის გზაზე, რომელსაც ჩვეულებრივ მეხუთე თაობას ან 5G-ს უწოდებენ.

მობილური ფართოზოლოვანი კავშირი არის, და კვლავაც იქნება, მნიშვნელოვანი ნაწილი მომავალი ფიჭური კავშირგაბმულობის, მაგრამ მომავალი უსადენო ქსელები ასევე მოიცავენ *გამოყენების ვარიანტების* მნიშვნელოვნად უფრო ფართო სპექტრს.

მობილური ფართოზოლოვანი კავშირი არის და კვლავაც იქნება მომავალი ფიჭური კავშირის მნიშვნელოვანი ნაწილი, მაგრამ მომავალი უსადენო ქსელები მნიშვნელოვნად დიდ დონეზე მოიცავენ ასევე *გამოყენების ვარიანტების* ბევრად უფრო ფართო სპექტრს. არსებითად, 5G უნდა ჩაითვალოს როგორც პლატფორმა, რომელიც უზრუნველყოფს მიერთებას ყველა სახის მომსახურებასთან, როგორც არსებულ ასევე მომავალ ჯერ კიდევ უცნობ მომსახურებებთან, ამგვარად უსადენო ქსელები გამოდიან მობილური ფართოზოლოვანი კავშირის საზღვრებს გარეთ. კავშირი უზრუნველყოფილი იქნება პრაქტიკულად ნებისმიერ ადგილას ნებისმიერ დროს ვისთან ან რასთანაც გვინდა. ტერმინი „*ქსელური საზოგადოება*“ ზოგჯერ გამოიყენება მაშინ როცა საუბარია ისეთ სცენარზე, როდესაც მიერთების შესაძლებლობები გამოდიან მობილური სმარტფონების საზღვრებს გარეთ, რაც ძალიან ღრმა გავლენას ახდენს საზოგადოებაზე.

მასობრივი მანქანური-ტიპის კომუნიკაცია, რომლის მაგალითს წარმოადგენს სენსორული ქსელები სოფლის მეურნეობაში, ტრაფიკის მონიტორინგში და შენობების კომუნალური მოწყობილობების დაშორებულ

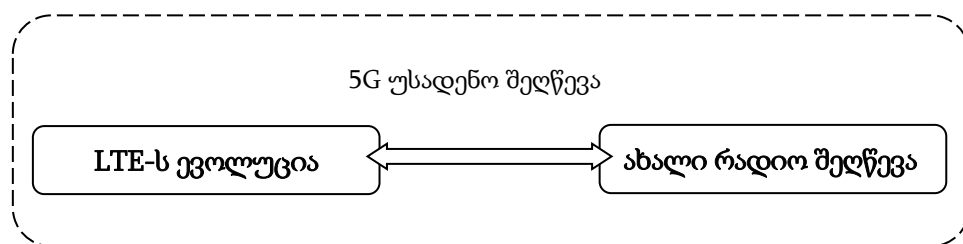
მართვაში არის არამობილური ფართოზოლოვანი დანართის ერთ-ერთი ტიპი. ეს დანართები პირველ რიგში მოითხოვენ მოწყობილობისთვის ძალიან მცირე ელ. ენერგიას, მაშინ როცა სიჩქარე და მონაცემების მოცულობა ერთ მოწყობილობაზე მოკრძალებულია. ამ დანართებიდან ბევრი შესაძლოა უკვე მხარდაჭერილი იქნას LTE-ს განვითარებით.

არამობილური ფართოზოლოვანი დანართების სხვა მაგალითს წარმოადგენს ზესაიმედო კავშირი დაბალი დაყოვნებით (ultra-reliable and low latency communications - URLLC) ცნობილია ასევე როგორც კრიტიკული მანქანური ტიპის კომუნიკაცია. ამის მაგალითია ინდუსტრიული ავტომატიზაცია, სადაც მოთხოვნა დაყოვნებასა და საიმედოობაზე ძალიან მკაცრია. კავშირი სატრანსპორტო საშუალებებს შორის (Vehicle-to-vehicle V2V communication) მათი გადაადგილების უსაფრთხოებისთვის არის კიდევ ერთი მაგალითი.

მიუხედავად ამისა, მობილური ფართოზოლოვანი კავშირი დარჩება მნიშვნელოვან გამოყენების ვარიანტად და უსადენო ქსელების დატვირთვის მოცულობა გაიზრდება სწრაფად, ისე როგორც მომხმარებლის მოლოდინი მონაცემთა გადაცემის სიჩქარეზე, ხელმისაწვდომობასა და დაყოვნებაზე. ეს გაფართოებული მოთხოვნები ასევე უნდა დააკმაყოფილოს 5G უსადენო ქსელმა.

გამტარუნარიანობის გაზრდა მიიღწევა სამი გზით: გაზრდილი სპექტრული ეფექტურობით, შემჭიდროვებული განაწილებით, და გაზრდილი სპექტრის სიგანით. LTE-ს სპექტრული ეფექტურობა უკვე მაღალია და მიუხედავად იმისა რომ შესაძლებელია კიდევ უფრო გაუმჯობესება, საკმარისი მაინც არ არის ტრაფიკის ზრდის დასაკმაყოფილებლად. ასევე მოსალოდნელია რომ ქსელის დენსიფიკაცია (დაგეგმარება და გაშლა მოსახლეობის სიმჭიდროვის გათვალისწინებით) მოხდება არა მხოლოდ გამტარუნარიანობის თვალსაზრისით, არამედ მონაცემთა გადაცემის მაღალი სიჩქარის ხელმისაწვდომობის თვალსაზრისით და შესაძლოა უზრუნველყოს გამტარუნარიანობის

მნიშვნელოვანი ზრდა, თუნდაც დამატებითი ანტენების მოძიების ხარჯზე. სპექტრის მოცულობის გაზრდა დაგეგმარება, მაგრამ სამწუხაროდ, გამოუყენებელი სპექტრის რაოდენობა მობილური კავშირის ტიპიურ ზოლებში შეზღუდულია, საკმაოდ მცირეა და არის 3 გჰცმდე. ამიტომ ყურადღება გამახვილებული იყო ცოტათი უფრო მაღალ სიხშირულ ზოლებზე, როგორც 3 – 6 გჰც დიაპაზონში ასევე 6 – 30 გჰც დიაპაზონში, რომლისთვისაც LTE არ არის გათვალისწინებული როგორც დამატებითი სპექტრის ათვისების საშუალება. თუმცა, რამდენადაც გავრცელების პირობები მაღალ სიხშირულ ზოლებში ნაკლებად მისაღებია ფართომასშტაბიანი ზონის დასაფარად და მოითხოვს უფრო სრულყოფილ საანტენო ტექნოლოგიებს, როგორცაა სხივის ფორმირება, ეს ზოლები შესაძლოა ძირითადად ემსახურებოდეს, როგორც შემავსებელი უფრო დაბალი სიხშირის არსებულ ზოლებს.



ნახ. 3. 5G შედგება LTE-ს ევოლუციისა და ახალი რადიო შეღწევისგან

როგორც წინა განხილვიდან ჩანს მოთხოვნების დიაპაზონი უსადენო 5G ქსელებისთვის არის ძალიან ფართო, რაც მოითხოვს ქსელის მაღალ მოქნილობას. გარდა ამისა რამდენადაც მოცემულ მომენტში ბევრი მომავალი დანართი შეუძლებელია გათვალისწინებულ იქნეს, საკვანძო პირობას წარმოადგენს ქსელის მდგრადობა მომავლისთვის (ქსელმა უნდა გაუძლოს იმ აპლიკაციების მოზღვავებას რომელსაც ეხლა ვერ ვპროგნოზირებთ). ამ პირობათაგან ზოგიერთი შესაძლოა უზრუნველყოს LTE-ს ევოლუციამ, მაგრამ არა ყველა, რაც მოითხოვს ახალ რადიო-შეღწევის ტექნოლოგიას LTE-ს ევოლუციის შესავსებად როგორც ნახ. 3-ზეა ნაჩვენები.

1.4. 5G ქსელის ზოგიერთი თავისებურება

5G ტექნოლოგიამ გარდა რადიოარხების გამტარუნარიანობის გაზრდისა უნდა უზრუნველყოს მომენტალური ჩატვირთვის და გადმოტვირთვის სიჩქარეები. ავტონდუსტრიის წარმომადგენლები დაინტერესებულნი არიან ქსელთან დაკავშირებული თვითმართვადი ავტომობილების წარმოებით, ამიტომ ერთ-ერთი გამოწვევაა მონაცემთა გადაცემისას დაყოვნების შემცირების მექანიზმების დანერგვა. ძირითადი ამოცანა იქნება ასევე ელ. ენერჯის მოხმარების შემცირება, რაც მნიშვნელოვანია საგნების ინტერნეტისთვის.

განსაკუთრებული თავისებურება არის აგრეთვე გადასვლა მილიმეტრულ და სანტიმეტრულ დიაპაზონზე. იმისათვის რომ ყველა ამოცანისა და წაყენებული მოთხოვნის გადაჭრას გაართვას თავი 5G მობილური ქსელი უნდა გაიშალოს თავისუფალ მაღალი სიხშირის დიაპაზონებში.

5G სტანდარტის კიდევ ერთი განსაკუთრებულობაა მულტიტექნოლოგიურობა, რაც გულისხმობს ყველა არსებული ტექნოლოგიების - GSM, UMTS, LTE, Wi-Fi მხარდაჭერას. ამით მიიღწევა მაღალხარისხიანი მომსახურება და ქსელის განტვირთვის შესაძლებლობა გადატვირთულ ლოკაციებზე. D2D ტიპის კავშირის მეშვეობით კი მომხმარებლის მოწყობილობები უშუალოდ შეძლებენ მონაცემების გაცვლას ერთმანეთს შორის 5G ქსელის გავლის გარეშე.

5G ქსელების არქიტექტურა ეფუძნება ღრუბლოვანი ტექნოლოგიების გამოყენებას და აპარატურული რესურსების დეცენტრალიზაციას. მომავალი თაობის ქსელებში ასევე მნიშვნელოვანი როლი აქვს პროგრამულად განსაზღვრულ ქსელებს (Software Defined Network – SDN), რომელიც აქამდე არსებულ ქსელებთან შედარებით ამარტივებს და უფრო მეტად დინამიურს ხდის ტექნოლოგიების მართვას.

თავი 2. პაკეტის დაყოვნების სიდიდე მომავალი თაობის ულტრასაიმედო კომუნიკაციებისთვის

2.1. მომსახურების ახალი სახეები რომლებიც უნდა დააკმაყოფილოს მომავალი თაობის მობილურმა ქსელებმა

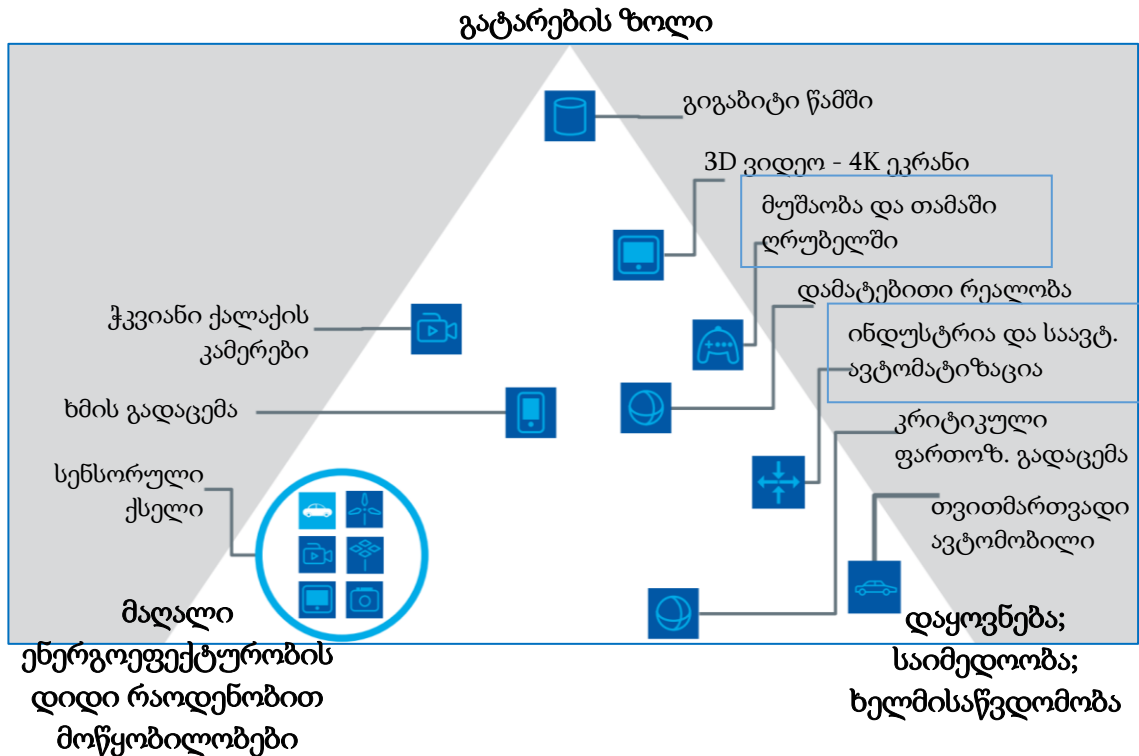
მსგავსად ყოველი წინა თაობისა 5G-ს პრაქტიკაში დანერგვის სიჩქარე და ოპერატორების მიერ მისი მონეტიზირების შესაძლებლობა იქნება პირდაპირი ფუნქცია ახალი და უნიკალური გამოყენების ვარიანტებისა რომლსაც ის შემოგვთავაზებს. აქედან გამომდინარე 5G ოპერატორებისთვის საკვანძო კითხვები ძირითადად არის შემდეგი:

1. რა შეუძლიათ გააკეთონ მომხმარებლებს ქსელში რომელიც აკმაყოფილებს მომავალი თაობის ქსელების (5G) მოთხოვნებს და რომელიც არ არის შესაძლებელი უკვე არსებულ ქსელებში?
2. ეს პოტენციური მომსახურებები რამდენად იქნებიან მომგებიანი?

5G-სთვის გათვალისწინებულია ახალი სერვისები და გამოყენების ვარიანტები და სავარაუდოდ ისინი იქნებიან ტექნოლოგიის მამოძრავებლები [19].

ქსელის პარამეტრების მიმართ არსებობს სამი ძირითადი მოთხოვნა: გატარების ზოლი (Throughput), დაყოვნება/საიმედოობა (Latency/Reliability) და დიდი რაოდენობით დაბალი ენერგომომხმარების მოწყობილობები (N of low cost devices). ზოგიერთი გამოყენების ვარიანტები ოპტიმიზაციისთვის შესაძლოა მოითხოვდნენ რამდენიმე პარამეტრს, მაშინ როცა სხვებისთვის საკმარისი იქნება ეფექტურობის მხოლოდ ერთი საკვანძო მაჩვენებელი (key performance indicator - KPI). მომავალი თაობის ქსელების ერთ-ერთი ძირითადი გამოწვევა იქნება ასეთი მრავალფეროვანი გამოყენების ვარიანტების მხარდაჭერა მოქნილი და საიმედო გზით.

ნახ. 4-ზე ილუსტრირებულია მოსალოდნელი 5G მომსახურებების მრავალფეროვნება. პოტენციური 5G გამოყენების ვარიანტები და მათთან ასოცირებული ქსელის მოთხოვნები აღწერილია ქვემოთ.



ნახ. 4. მომსახურებების მრავალფეროვნება, გამოყენების ვარიანტები და მოთხოვნები

არსებობს მთელი რიგი პოტენციური გამოყენების ვარიანტებისა - ეს არის გართობა, ასევე უფრო პრაქტიკული სცენარები, როგორცაა წარმოება ან მედიცინა, და ღრუბლოვანი სერვისები ბევრ გადაადგილებად ტექნოლოგიაზე და ა. შ. მაგ. ოპერაცია შეიძლება შესრულდეს რობოტის მიერ რომელსაც დაშორებულად მართავს ქირურგი და ეს შესაძლოა მოხდეს მსოფლიოს სხვა მხარიდან. ამ ტიპის დანართები მოითხოვენ როგორც მაღალ სიჩქარეს ასევე დაბალ დაყოვნებას, რაც არის LTE-ს შესაძლებლობებს მიღმა [11].

2.1.1. ავტონომიური მართვა (ავტოპილოტი)/დაკავშირებული ავტომობილები

ავტომობილების გარე სამყაროსთან მიერთების შესაძლებლობას მივყავართ არსებული საგზაო ინფრასტრუქტურის გაცილებით უფრო ეფექტურ და უსაფრთხო გამოყენებამდე. თუ გზებზე არსებული ყველა ავტომობილი მიერთებული იქნება მოძრაობის (გადაადგილების) ერთიან სისტემასთან მაშინ ისინი შეძლებენ იმოგზაურონ გაცილებით უფრო ჩქარა და ერთმანეთთან უფრო ახლო დისტანციაზე უბედური შემთხვევის რისკის გარეშე - სრულად ავტომატიზირებული ავტომობილებით ადამიანის მიერ შეცდომის დაშვების შესაძლებლობა კიდევ უფრო მცირდება. მიუხედავად იმისა რომ ასეთი სისტემები არ მოითხოვენ მაღალ სიჩქარეს, მონაცემთა გადაცემისას ნულთან მიახლოებული ბრძანება-პასუხის დრო იქნება გადამწყვეტი მათი უსაფრთხო ოპერირებისთვის, ამგვარად ასეთი დანართები ნამდვილად ითხოვენ დაყოვნებას 1 მლწმ-მდე. გარდა ამისა ავტომობილი სრულად “უმძლოლო” უნდა იყოს გასავლელი გზის სრულ მონაკვეთზე და შესაბამისად მოითხოვს გზის სრულად დაფარვას ქსელით 100% საიმედოობის მისაღწევად - იმისათვის რომ იყოს განხორციელებადი ამოცანა.

2.1.2. ჯანდაცვა

ჯანმრთელობის სექტორს გააჩნია ბევრი ისეთი დანართი რომლებმაც შეიძლება ისარგებლონ მობილური კომუნიკაციებით. კომუნიკაციის სისტემებს შეუძლიათ უზრუნველყონ ტელემედიცინა, რომელიც დისტანციურად ახორციელებს კლინიკურ ჯანმრთელობის დაცვას. ის ხელს უწყობს მანძილის დაბრკოლებების აღმოფხვრას და სამედიცინო მომსახურების ხელმისაწვდომობის გაუმჯობესებას, რაც ხშირ შემთხვევაში არ არის შესაძლებელი შორეულ სოფლებში. ის ასევე გამოიყენება

სიცოცხლის გადარჩენის, კრიტიკული ზრუნვისა და საგანგებო სიტუაციებისას.

უსადენო სენსორულ ქსელებზე დაფუძნებული მობილური კომუნიკაციებს შეუძლიათ უზრუნველყონ ისეთი პარამეტრების მონიტორინგი როგორცაა გულის ცემის სიხშირე და სისხლის წნევა.

2.1.3. მრეწველობა

უსადენო და მობილური კომუნიკაციები ხდება სულ უფრო და უფრო მეტად მნიშვნელოვანი ინდუსტრიული დანართებისთვის. სადენების მოტაჟი ძვირია და კაბელების შეცვლა რეკონფიგურირებადი უსადენო არხებით არის მაცდური შესაძლებლობა ბევრი ინდუსტრიისთვის. თუმცა ამ მიზნის მისაღწევად საჭიროა უკაბელო კავშირის მუშაობა მსგავსი დაყოვნებით, საიმედოობით და გადაცემის სიჩქარით როგორც კაბელიანი. მცირე დაყოვნება და ძალიან მცირე შეცდომების ალბათობა არის ახალი მოთხოვნები, რომელსაც უნდა ითვალისწინებდეს 5G.

გამოყენების სხვა ვარიანტებია - ლოჯისტიკა და სატვირთო გადაზიდვები, ტაქტილური ინტერნეტი, საგნების ინტერნეტი და სხვა.

როგორც ზემოთ არის აღწერილი *გამოყენების ვარიანტებს* შორის ერთ-ერთი ყველაზე მნიშვნელოვანი მომსახურებათა სახეების ჯგუფია მანქანათმშორისი კომუნიკაცია (MTC - Machine Type Communications), რომელიც თავის მხრივ იყოფა მასობრივ მანქანათმშორის კომუნიკაციად და კრიტიკულ მანქანათმშორის კომუნიკაციად. დისერტაციაში განხილულია სწორედ მომავალი მობილური კავშირის ქსელის ერთ-ერთი პარამეტრი - პაკეტის დაყოვნება, რომელიც მნიშვნელოვანია კრიტიკული მანქანათმშორისი კომუნიკაციისთვის. კერძოდ, დაყოვნება როგორც ქსელზე წაყენებული მოთხოვნა და მისი მცირე მნიშვნელობის აუცილებლობა განხილულია ავტოპილოტით მართვადი ავტომობილების მაგალითზე.

2.2. კრიტიკული მანქანათშორისი კავშირის მთავარი საზომი პარამეტრები

კრიტიკული მანქანათშორისი კავშირი რეალიზებულ უნდა იქნეს შემდეგი სამი პარამეტრის მიხედვით: დაყოვნება, საიმედოობა, ხელმისაწვდომობა.

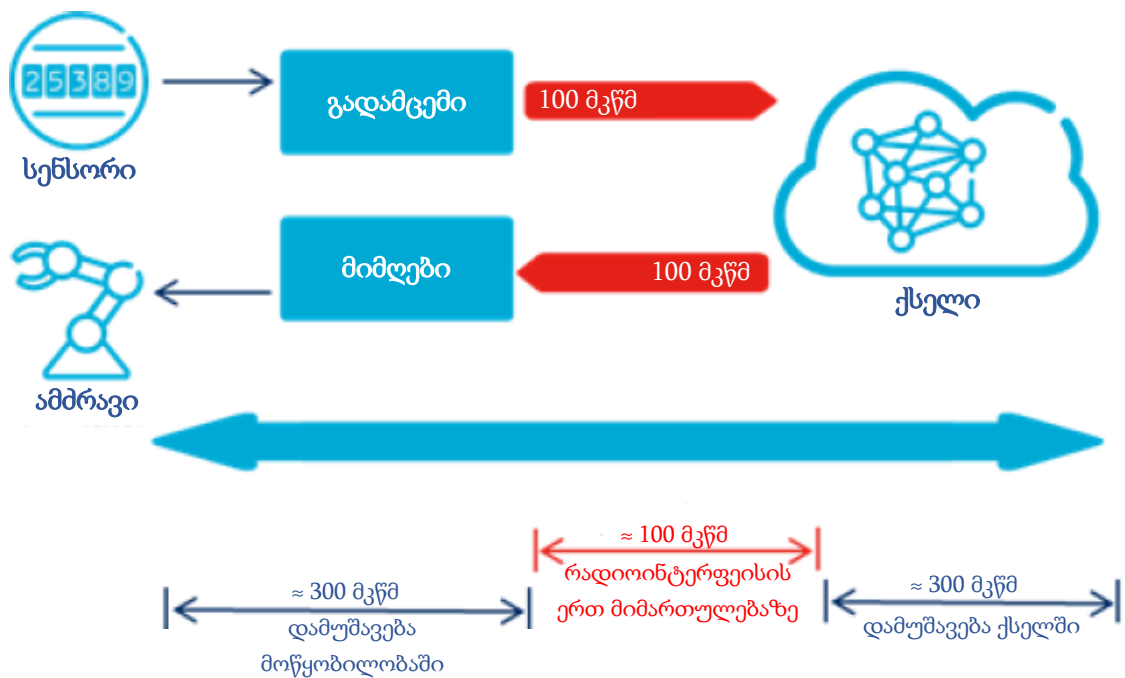
დაყოვნება გულისხმობს მონაცემების დაგვიანების დროს, რომლებიც გენერირდება მაგ: სენსორიდან და იგივე მონაცემები კორექტულად მიიღება ამძრავზე (actuator), როგორც ილუსტრირებულია ნახ. 5-ზე როგორც საერთაშორისო სატელეკომუნიკაციო კავშირის (ITU-T) ტექტილური ინტერნეტის ტექნოლოგიების დაკვირვების ანგარიშშია განმარტებული ყველაზე მკაცრი მოთხოვნა დამაბოლოებელ მოწყობილობებს შორის კავშირის დაყოვნებაზე შეიძლება იყოს ერთი მილიწამი.

საიმედოობა გულისხმობს შეტყობინების გარანტირებულად წარმატებულ გადაცემას დაყოვნების განსაზღვრული ბიუჯეტის ფარგლებში. მოთხოვნები საიმედოობაზე განსხვავებულია სხვადასხვა *კრიტიკული მანქანათშორისი მომსახურებებისთვის* (Mission-Critical MTC Services), მაგრამ შესაძლოა შემცირდეს ერთამდე მილიარდი შეტყობინებისთვის როგორც ნაჩვენებია ETSI - TR 102 889-2 ანგარიშში. მაგალითად, სამრეწველო ავტომატიზაციისას გადაცემული ერთი მილიარდი შეტყობინებიდან მხოლოდ ერთი შეტყობინება შეიძლება დაიკარგოს ან შეფერხდეს მოცემული დაყოვნების ბიუჯეტის ფარგლებში.

სისტემის **ხელმისაწვდომობა** უნდა უზრუნველყოს რომ კრიტიკულად მნიშვნელოვანი აპლიკაციები (დანართები) არ გაითიშონ და არ შეფერხდნენ, მაშინ როცა ისინი საჭიროა. იმისათვის რომ გათანაბრდეს სადენიანი და უსადენო გადაწყვეტების ხელმისაწვდომობა მიღწეულ უნდა იქნეს 99,999 % ხელმისაწვდომობა.

საერთოდ თუ გვინდა განვიხილოთ *კრიტიკული მანქანური ტიპის კომუნიკაციების* (mission-critical MTC) გამოყენების ყველა შესაძლო

ვარიანტი, რადიოტექნოლოგია, რომელსაც ვაპროექტირებთ უნდა იყოს მასშტაბირებადი ამ მკაცრი მოთხოვნებისადმი. შემდეგ როგორც მოსალოდნელია გაჩნდება კითხვები: „როგორ შეიძლება შევასრულოთ ეს მოთხოვნები რადიო ქსელის დაგეგმვაში მინიმალური სირთულის შეტანით?“ და „როგორი იქნება კრიტიკული მანქანური ტიპის კომუნიკაციების პრაქტიკული საზღვრები ტიპიური დანართებისთვის?“



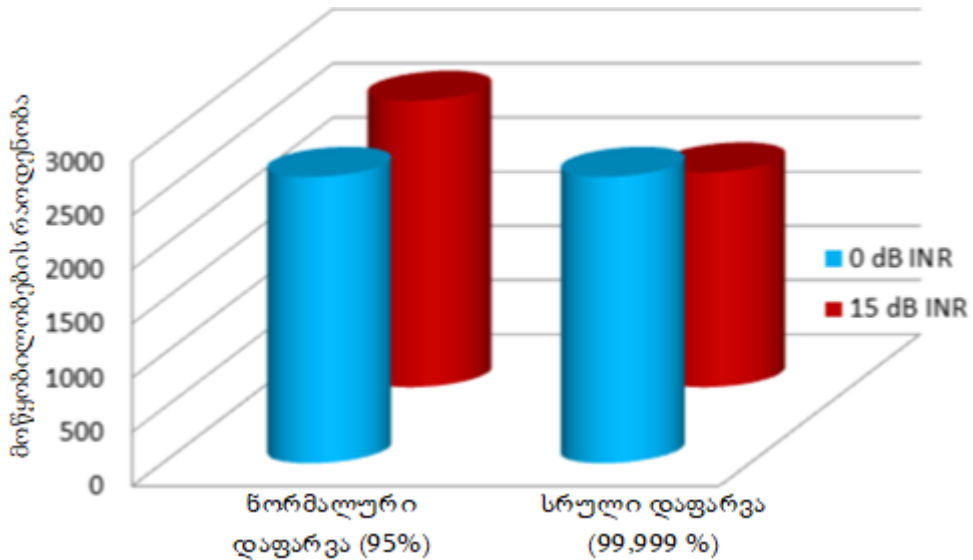
ნახ. 5. დაყოვნების განაწილება ITU-T-ს "ტაქტილური ინტერნეტის" ანგარიშის საფუძველზე. რადიონტერფეისის დაყოვნების სიდიდედ თითოეულ მიმართულებაზე შეგვიძლია ვივარაუდოდ 100 მკწმ.

პირველ კითხვაზე პასუხის გასაცემად ბაზისად აღებულია 3GPP Long Term Evolution - LTE. LTE-ს მსგავსად არჩეულია რადიონტერფეისის ორთოგონალური სიხშირული დაყოფით მულტიპლექსირების (OFDM - Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) საფუძველზე, რათა თავი ავარიდოთ სიმბოლოთაშორის ხელშეშლებს, იმის გამო რომ OFDM სიმბოლოთა ციკლური პრეფიქსი უფრო დიდია ვიდრე არხის განაწილების დაყოვნება. ზემოთ ნახსენები უფრო დაბალი დაყოვნებისა და მაღალი საიმედოობის უზრუნველსაყოფად იდენტიფიცირებულია მთელი რიგი LTE-ს მოდიფიკაციებისა რომლებისთვისაც საჭიროა:

- შემცირდეს გადაცემის დროის ინტერვალი, მაგ: OFDM სიმბოლოების 100 მკწმ და უფრო მოკლე ხანგრძლივობით, რომლებიც უზრუნველყოფენ მონაცემთა გადაცემას უფრო სწრაფად და ეფექტურად;
- ფიზიკური არხების რეკონსტრუირება, რომელიც მოგვცემს არხის ადრეული შეფასების საშუალებას;
- ხვევადი (მაგ: მონაცემთა არხებისთვის) და ბლოკური (მაგ: კონტროლის არხებისთვის) კოდების გამოყენება სწრაფი და საიმედო დეკოდირების უზრუნველსაყოფად;
- მაღალი სხვადასხვაობის დონეების რეალიზაციით უმჯობესდება სიგნალების აღმოჩენის საიმედოობა და დეკოდირება, ისევე როგორც მათი ხელმისაწვდომობა.

შემდეგ მეორე არსებითი კითხვა: „როგორი იქნება კრიტიკული მანქანური ტიპის კომუნიკაციების პრაქტიკული საზღვრები ტიპური დანართებისთვის?“ ამ კითხვაზე პასუხის გასაცემად შემუშავდა მოდელირების სცენარი, რომელიც განთავსებულია ქარხანაში 100x100 მ ფართობის ტერიტორიაზე. სიგნალების დონეების უზრუნველსაყოფად გამოყენებულია საბაზო სადგურის რვა ანტენა და მოწყობილობის ორი ანტენა. სამრეწველო დანართების მოთხოვნაა რომ გადაცემული მილიარდი მონაცემიდან შესაძლებელია დაიკარგოს ან შეფერხდეს მხოლოდ ერთი შეტყობინება 100 მკწამიანი რადიოინტერფეისის დაყოვნებისას. ქვემოთ გამოსახული მოდელირების შედეგები გვიჩვენებს რომ კრიტიკული MTC-ს ზემოთხსენებულ მოწყობილობებთან ერთად შეუძლია ათასობით სამრეწველო ავტომატიზირებული მანქანის მხარდაჭერა (მაგ. ატვირთვის მონაცემთა გადაცემა). ასევე აღმოჩნდა რომ სიგნალების დონეების მრავალფეროვნების გაზრდა აუმჯობესებს სისტემის მდგრადობას მოულოდნელი ან გაუთვალისწინებელი ინტერფერენციის წყაროების წინააღმდეგ. ეს ნაჩვენებია ნახ. 6-ზე ხელშეშლა-ხმაური ფარდობის (Interference plus noise ratio - INR) გამოყენებით. ამიტომ შეიძლება

ხაზგასმით ვთქვათ რომ სიგნალების დონეების სხვადასხვაობა არის კრიტიკული რადიომელწევის მნიშვნელოვანი ინსტრუმენტი ხელმისაწვდომობისა და საიმედოობის თვალსაზრისით. [15]



ნახ. 6. კრიტიკული MTC-ს ტევადობა - მხარდაჭერილი მოწყობილობების რაოდენობა ერთი შედეგის წერტილისთვის (სადგურისთვის) წამტანი სიხშირით 5,2 გჰც და ზოლის სიგანით 100 მჰც. პაკეტის მიახლოებითი ზომა 100 ბიტი, სენსორის დაყოვნების დრო 1 მილიწამი

მიღებული შედეგებიდან შეიძლება ითქვას რომ შესაძლებელია შეიქმნას 5G რადიოინტერფეისი რომელიც უზრუნველყოფს რადიოგადაცემას მილიწამზე ნაკლებ დროში 10^{-9} მტყუნების დონით და მინიმალური დამატებითი სირთულის გამოყენებით.

2.3. რატომ უნდა იყოს დაყოვნების სიდიდე 1 მწმ ან ნაკლები

ზემოთ მოყვანილი მომსახურების სახეებიდან განვიხილოთ ავტონომიური მართვა (ავტოპილოტი) და ერთმანეთთან ქსელის მეშვეობით დაკავშირებული ავტომობილები.

ავტომობილების ქსელთან მიერთების რამდენიმე მამოძრავებელი - მოტივი არსებობს, მათგან ყველაზე მნიშვნელოვანია ადამიანის (როგორც მძღოლის ასევე ქუჩაში ქვეითად მოსიარულის) უსაფრთხო გადაადგილება

და მეორე ეს არის საგზაო ტრაფიკის განმუხტვა ავტომობილების რაოდენობის ყოველწლიური ზრდის პირობებში. სწორედ ამიტომ საჭიროა ავტომობილების როგორც ერთმანეთთან ასევე სხვა ჭკვიან სისტემებთან (მაგ. ჭკვიანი საგზაო ინფრასტრუქტურა) დაკავშირება.

ცნობილია რომ ავტონდუსტრიაში უკვე არსებობს ახალი მიმართულება, რომლის ინტერესია უსაფრთხოების მიზნით შესაძლებელი გახდეს მოძრავ ავტომობილებს შორის დისტანციის განსაზღვრა, დაცვა, საჭიროების შემთხვევაში შეჩერება და უსაფრთხოების არსებული მდგომარეობის კონტროლი და მონიტორინგი, რაც გულისხმობს საფრთხის წარმოშობის შემთხვევაში ინფორმაციის გენერირებას, მძღოლის შეტყობინებას და გადაცემას საავტომობილო უსაფრთხოების სამსახურებზე (მათი არსებობის შემთხვევაში). ასეთ ავტომობილებს უწოდებენ ე. წ. „ჭკვიან ავტომობილებს“. ავტომწარმოებლების მიერ ამ ამოცანის გადაჭრის მცდელობები უკვე არსებობს. ამის ნათელი მაგალითია „ტესლას“ თანამედროვე ავტომობილები, რომლებიც აღჭურვილნი არიან სენსორებით და გარკვეულ მანძილზე შეუძლიათ განსაზღვრონ ინციდენტის საფრთხე. ჩნდება ბუნებრივი კითხვა, თუ ეს ყველაფერი არსებობს მაშინ რატომ უნდა დავაკავშიროთ ავტომობილები ერთმანეთს ქსელის მეშვეობით? ავტონომიურ სისტემებს აქვთ გარკვეული შეზღუდვები, მათ შორის რამდენიმე არის ყველაზე მნიშვნელოვანი: [5]

1. მათი რადარების მოქმედების არეალი შეზღუდულია ამიტომ ისინი მუშაობენ მხოლოდ ლოკალური მასშტაბებით;
2. უსაფრთხოების სისტემაში არა აქვთ ინტეგრირებული საავტომობილო ტრაფიკის კონტროლი;
3. ისინი არ არიან დაკავშირებული უსაფრთხოების მონიტორინგის რაიმე ერთიან სისტემასთან;
4. გაუმართავი ავტომობილის მიახლოება (შესაძლოა ახლოს მოძრავი ავტომობილი არ არღვევდეს წესებს, მაგრამ თუ ის ტექნიკურად გაუმართავია მისი გადაადგილება უქმნის საფრთხეს სხვა

ავტომობილებს, ქვეითებსა და ზოგადად გარემოს. ქსელთან კავშირის შემთხვევაში კი მისი მდგომარეობის შესახებ ინფორმაცია იქნება ხელმისაწვდომი სხვა ავტომობილის მძღოლებისთვის და ამგვარად ისინი გაფრთხილებული იქნებიან პოტენციური საფრთხის შესახებ);

5. მოძრავი ადამიანების აღმოჩენის შესაძლებლობა, ადამიანსა და ავტომობილს შორის დისტანციის განსაზღვრა;
6. ავტომობილების კავშირი სხვა ინფრასტრუქტურასთან - შუქნიშნები, ხიდები, გზის რთული მონაკვეთები, საგზაო ნიშნები და სხვა ნაგებობები. ყველაფერი ეს ქმნის ჭკვიან საგზაო ინფრასტრუქტურას [19];
7. ქსელთან მუდმივი მიერთება.

ავტომობილის ავტონომიური მართვა (ავტოპილოტი) და ერთმანეთთან ქსელის მეშვეობით დაკავშირებული ავტომობილები

ავტომობილების არსებული უსაფრთხოების ყველა ამ ნაკლოვანების აღმოფხვრა შესაძლებელია ახალი 5G თაობის ქსელების გამოყენებით, რომლისთვისაც მანძილი ვერ იქნება შეზღუდული და მოგვცემს საავტომობილო ტრაფიკისა და უსაფრთხოების მონიტორინგის მომსახურებათა ინტეგრირების შესაძლებლობას. ასევე მეტად დაცული იქნება ქვეითთა გადაადგილება, საგზაო ინფრასტრუქტურასთან კავშირი გაამარტივებს გზებზე გადაადგილებას და ქსელთან მუდმივ კავშირის მეშვეობით შესაძლებელი გახდება სხვა მნიშვნელოვანი ინფორმაციის ავტომატური მიღება (რევერსულ მოძრაობებზე მიმართულების შეცვლა, გზის ჩაკეტვა, წარმოქმნილი საცობები, შემოვლითი გზის არსებობა, გზის საფარის დაზიანების გამო წარმოქმნილი საფრთხე და ა. შ.).

განვიხილოთ ავტომობილის გაჩერებისთვის საჭირო დროის მონაკვეთი. სხვადასხვა სიჩქარით მოძრავი ავტომობილის გასაჩერებლად სამუხრუჭე მანძილი არის $\approx 2 \div 3$ წმ. ამ დროის $1/4 \approx 500 \div 750$ მლწმ ესაჭიროება მძღოლს ფიქრისა და გადაწყვეტილების მისაღებად, ხოლო $2/3 \approx 1500 \div 2250$ მლწმ საჭიროა მოქმედებისთვის (მუხრუჭზე დაჭერა -

ავტომობილის გაჩერება), ხოლო იმ შემთხვევაში თუ ვერ მოხერხდა ავტომობილის შეჩერება და მოხდა ინციდენტი 15 ÷ 30 მლწმ სჭირდება უსაფრთხოების ბალიშების მოქმედებაში მოსვლას, ბალიშები ბოლომდე იბერება 60 ÷ 80 მილიწამის შემდეგ. [13, 14]

თვითმართვად ავტომობილებში დაყოვნების 1 მლწმ-მდე შემცირებით მიიღწევა სამუხრუჭე მანძილის შემცირება, რადგან მძღოლის ფიქრისა და გადაწყვეტილების მისაღებად განკუთვნილი დროის ნაწილი $\approx 500 \div 750$ მლწმ შემცირდება რამდენიმე მილიწამამდე (1 მილიწამამდე პაკეტის დაყოვნება და 1 მილიწამამდე ბრძანების მიცემა აქტუატორზე). ამგვარად თვითმართვადი ავტომობილები შეძლებენ გადაადგილებას ერთმანეთისგან უფრო მოკლე დისტანციის დაცვით ($\approx 1,5 \div 2,25$ წმ), საბოლოოდ კი მივიღებთ ავტომობილებს შორის უფრო მცირე დისტანციას და შესაბამისად საგზაო ტრაფიკის ოპტიმიზაციას.

თავი 3. მობილური კავშირის ქსელების რადიოარხების მოდელირება პაკეტების დაყოვნების შესაფასებლად

მე-4 და შემდგომი თავების მობილური კავშირის ქსელებში ძირითად ამოცანებს წარმოადგენენ გადაცემის მაღალსიხშირეანი რადიოარხების შექმნა და ამ არხებით გადაცემული IP პაკეტების დაყოვნების შემცირება. ძირითად დაბრკოლებებს ამ მიზნების მისაღწევად წარმოადგენენ გამოყენებული სიხშირული ზოლებისა და გადასაცემი სიგნალების სიმძლავრის შეზღუდულობა.

ინფორმაციის გადაცემის თეორია - კერძოდ კ. შენონის ფუნდამენტალური დებულებები არხების გამტარუნარიანობის შესახებ საშუალებას იძლევა შეიქმნას რადიოარხების ახალი მოდელები ახლებური მიდგომებით, მაგალითად ისეთის, როგორიცაა არხის მოდელი სივრცით დროითი კოდირებით. ასეთი კოდირების ტექნიკურ შესაძლებლობას იძლევა MIMO (Multiple Input Multiple Output) ტექნოლოგიის გამოყენება და სწორედ ამ ტექნოლოგიის გამოყენებაზეა ორიენტირებული 4G-ს მოწინავე ვარიანტები და 5G მთლიანად. ქვემოთ მოყვანილი იქნება შესაბამისი რადიოარხების მოდელირების პრინციპები და პაკეტების დაყოვნებების მექანიზმები, აგრეთვე ნაჩვენები იქნება ამ დაყოვნებების მინიმიზაციის გზები.

3.1. მობილური კავშირის ქსელების რადიოარხების მოდელირება

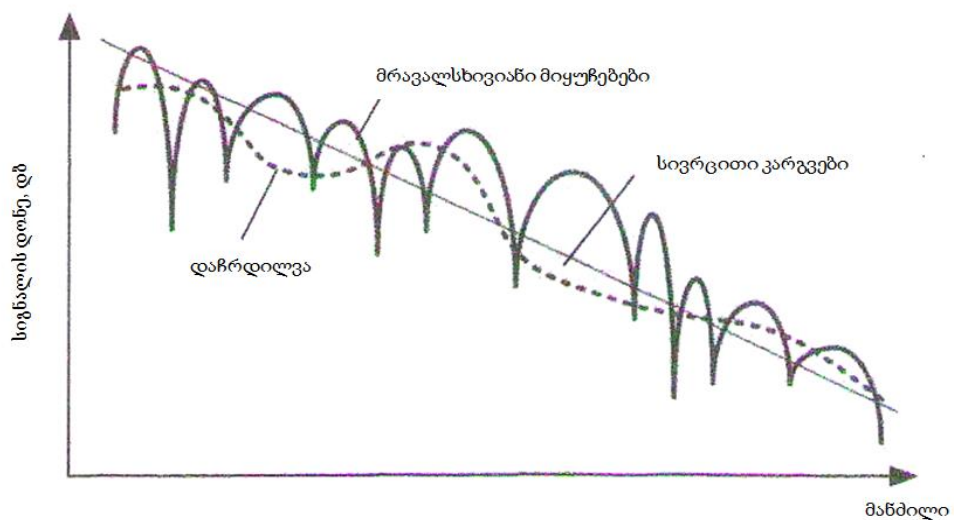
გადამცემის ანტენიდან გასხივებული ელექტრომაგნიტური ტალღები (რადიოტალღები) მიმღებამდე ვრცელდებიან როგორც პირდაპირი სხივის სახით, ასევე გავრცელების გზაზე არსებული დაბრკოლებებიდან არეკლილი სხივების სახით. ამასთანავე უნდა აღინიშნოს, რომ ასეთი არეკვლილი სხივები მიმღებში შეიძლება მოვიდნენ მრავალჯერადი არეკვლის შედეგად.

არხები პირდაპირი და არაპირდაპირი ხედვების შესაბამისად იწოდებიან - LOS (Line-Of-Sight) და NLOS (Non-Line-Of-Sight). ამ უკანასკნელ შემთხვევაში სიგნალი მიმღებში ფორმირდება მხოლოდ არეკლილი სიგნალების (მათ შორის მრავალჯერადად) სუპერპოზიციის სახით. გავრცელების ამ სახეს ლიტერატურაში ეწოდება მრავალსხვიანი გადაცემა. [2]

ცნობილია, რომ როგორც პირდაპირი სხივი, ასევე არეკლილი სხივები გავრცელების დროს განიცდიან მიღევას, რომელიც დამოკიდებულია გავრცელების მანძილზე. მაგრამ ზოგადად სიგნალის (ელექტრომაგნიტური ტალღით) დონის ბუნებრივი შემცირებისა და მანძილზე (რადიოტალღების მიღევა თავისუფალ სივრცეში) სიგნალის შესუსტების სისწრაფის მიხედვით არჩევენ სამ დონეს:

- ძალიან ნელი მიღევები საბაზო სადგურსა და მობილურ ტერმინალს შორის მანძილის ცვლილების გამო;
- ნელი მიყუჩებები დაჩრდილვის გამო (Long-term);;
- სწრაფი მიყუჩებები მრავალსხვიანი გავრცელების გამო (Short-term).

ნახ. 7. ნაჩვენებია ამ სიგნალის დონის ცვლილების დამახასიათებელი გრაფიკები.



ნახ. 7. სიგნალის დონის ცვლილების დამახასიათებელი გრაფიკები

ელექტრომაგნიტური ველის დაძაბულობა მიღების წერტილში შეიძლება წარმოდგენილი იქნას, როგორც მანძილის ფუნქცია ($r(x)$) ან დროის ფუნქცია ($r(t)$), თუ შევცვლით ცვლადს $t = \frac{x}{v}$, სადაც v მიმღების ტერმინალის გადაადგილების სიჩქარეა.

ზოგადად $r(x)$ ან $r(t)$ შეიძლება დახასიათებული იქნას ორი კომპონენტით:

- ნელი ან ხანგრძლივი ცვლილებებით $m(t)$ ან $m(x)$;
- სწრაფი ან ხანმოკლე ცვლილებებით $r_0(t)$ ან $r_0(x)$;

მიღებული სიგნალი შეიძლება აღწერილი იქნას ამ ორი თანამამრავლით (წრფივი ერთეულებით):

$$r(t) = m(t)r_0(t) \text{ ან } r(x) = m(x)r_0(x) \quad (3.1)$$

დეციბელით აღწერისათვის გამრავლების ოპერაცია შეიცვლება შეკრების ოპერაციით

$$R(t) = M(t) + R_0(t) \text{ ან } R(x) = M(x) + R_0(x) \quad (3.2)$$

ასეთი მიდგომა ნიშნავს, რომ ხდება სწრაფი ცვლილებების ზედდება ნელ ცვლილებებზე. დამტკიცებულია, რომ დონის ლოკალური საშუალო მნიშვნელობის ცვლილება, გამოსახული წრფივ ერთეულებში განაწილებულია ნორმალური კანონით, ხოლო დეციბელებში გამოსახული კი ლოგარითმულ ნორმალური კანონით.

მობილური კავშირის ქსელებში გამოყენებული რადიოარხების ანალიზისათვის გამოიყენებენ ორ უკიდურეს სცენარს:

- არსებობს პირდაპირი ხედვა და მიმღები ღებულობს ერთ ძლიერ პირდაპირ სიგნალს მრავლობით მცირე სიმძლავრის არეკლილ სიგნალებთან ერთად (შემთხვევა LOS);
- მიმღები ღებულობს მხოლოდ არეკლილ სიგნალების ნაკრებს (N-LOS).

ამ ორი სცენარიდან განსაკუთრებული ყურადღების მიქცევა საჭიროა მეორე სცენარისადმი (მრავალსხივიანი გავრცელება). საქმე იმაშია, რომ რადიოტალღების გავრცელების დროს მობილური ტერმინალის მიერ მიღებული სიგნალი განიცდის მნიშვნელოვან სწრაფ ფლუქტუაციას

ტერმინალის უმნიშვნელო გადაადგილების დროსაც. (მაგალითად GSM-1800 ქსელებში რადიოტალის საშუალო სიგრძე 17 სმ-ით. ტერმინალის გადაადგილების დროს ტალის სიგრძის ნახევარ მანძილზე სიგნალის დონე შეიძლება შემცირდეს 40 დბ-ით, რაც კავშირის შეწყვეტის მიზეზი შეიძლება გახდეს. მიყუჩების ასეთი ფლუქტუაციის მიზეზი მრავალსხივიანი გავრცელებაა. ამ დროს მიმღებში სიგნალი მიდის არეკლილი სხვადასხვა დაბრკოლებიდან და, შესაბამისად გადიან სხვადასხვა მანძილებს გადამცემიდან-მიმღებამდე. ასეთი დროითი დისპერსია იწვევს მიღებული რადიოსიგნალების ფაზების დისპერსიას და ზოგ შემთხვევაში ისინი შებრუნებული ფაზებითაც (1800) შეიძლება მივიდნენ მიმღებში, რაც გამოიწვევს მათ ურთიერთდაკომპენსირებას და დონის ნახტომისებრ შემცირებას (კავშირის შეწყვეტას).

დიდი მასშტაბის მიყუჩებები გაიგივდება მიღებებთან, რომლებიც გამოწვეულია მიმღები ტერმინალის საბაზო სადგურის მიმართ დიდ მანძილებზე გადანაცვლებით, მცირე მასშტაბის მიყუჩებები თავს იჩენენ მიმღების და გადამცემის სივრცითი განლაგების მცირე ცვლილებების დროს.

მობილური კავშირის პრაქტიკულ სქემებში სიგნალი გადამცემიდან მიმღებამდე (ელექტრომაგნიტური ტალღა) განიცდის რეფრაქციას, მიყუჩებას, არეკვლას (შენობებიდან, ხეებიდან, სხვადასხვა სიმაღლის ბუნებრივი დაბრკოლებებიდან) და მიაღწევნ მიმღებს სხვადასხვა გზებით და შესაბამისად მიმღებში მრავალსხივიანი სიგნალის იმპულსური რეაქცია (გამოხმაურება) აღიწერება გამოსხივებით.

$$h(\tau, t) = \sum_n a_n(t) e^{-j2\pi f_i \tau_n(t)} \delta(\tau - \tau_n(t)) \quad (3.3)$$

სადაც $a_n(t)$ სიგნალის n -ური სხივის მიღების კოეფიციენტია დროის t -მომენტში; $\tau_n(t)$ - სიგნალის n -სხივის დაყოვნებაა დროის t მომენტში; $e^{-j2\pi f_i \tau_n(t)}$ -მამრავლია, რომელიც ითვალისწინებს f_i -სიხშირის გადამტანი სიგნალის ფაზის ცვლილებას, გამოწვეულს დროითი დაყოვნებით - τ ; $\delta(\tau - \tau_n(t))$ - დელტა ფუნქციაა.

არსებობს მცირე მასშტაბის მიყუჩებების წარმოქმნის ორი მექანიზმი:

- სიგნალის დროითი გაფანტვა;
- არხის მახასიათებლების ცვლილება მიმღები ტერმინალის საბაზო სადგურის მიმართ გადაადგილების გამო.

ცხრილი 1. მცირე მასშტაბის მიყუჩებების წარმოქმნის მექანიზმების, კატეგორიების და მიყუჩებების შედეგების კლასიფიკაცია

	დროითი განზომილების მექანიზმი მრავალსიხვიანი გავრცელების მიხედვით		დროში ცვლადი მექანიზმი, მოძრაობით განპირობებული	
დროითი დაყოვნების სფერო	სიხშირულ-სელექტიური მიყუჩება (დამახინჯება სიმბოლთშორისი ინტერფერენციის გამო, იმპულსის განადგურება, შეცდომის გამოჩენის შეუქცევადი სიხშირე) გაფართოების მრავალსიხვი დაყოვნება < სიმბოლოს ხანგრძლიობაზე	ორმაგი მექანიზმი	სწრაფი მიყუჩება (მაღალი მობილურობა, წყვეტა ΦAPI, შეცდომის გამოჩენის შეუქცევადი სიხშირე) არხში მიღების სისწრაფე > სიმბოლოების გადაცემის სისწრაფეზე	დოპლერის გადაადგილების სფერო
	ამპლიტუდური მიყუჩება (SNR გაფართოების მრავალსიხვი დაყოვნება < სიმბოლოს ხანგრძლიობაზე		ნელი მიღება (დაბალი მობილურობა) არხში მიღების სისწრაფე < სიმბოლოების გადაცემის სისწრაფეზე	
სიხშირული სფერო	სიხშირულ-სელექტიური მიყუჩება (დამახინჯება სიმბოლთშორისი ინტერფერენციის გამო, იმპულსის განადგურება, შეცდომის გამოჩენის შეუქცევადი სიხშირე) არხის კოჰერენტულობის ზოლის სიფართე < სიმბოლოების გადაცემის სისწრაფეზე	ორმაგი მექანიზმი	სწრაფი მიღება (მაღალი მობილურობა, წყვეტა ΦAPI, შეცდომის გამოჩენის შეუქცევადი სიხშირე) არხში კოჰერენტულობის დრო < სიმბოლოების გადაცემის სისწრაფეზე	დროითი სფერო
	ამპლიტუდური მიყუჩება (SNR დანაკარგი) არხის კოჰერენტულობის ზოლის სიფართე > სიმბოლოების გადაცემის სისწრაფეზე		ნელი მიღება (დაბალი მობილურობა, (SNR დანაკარგი) არხში კოჰერენტულობის დრო > სიმბოლოების გადაცემის სისწრაფეზე	

ცხრილი 1-ში მოყვანილია მცირე მასშტაბის მიყუჩებების წარმოქმნის მექანიზმების, კატეგორიების და მიყუჩებების შედეგების კლასიფიკაცია.

მიყუჩებების მექანიზმი შეიძლება აღწერილი იქნას დროით განზომილებაში (დროითი დაყოვნება) და სიხშირულ განზომილებაში (სიხშირის ცვლილება – დოპლერის ძვრა). კერძოდ, დროითი გაფანტვა

ახასიათებს მრავალსხივიანი გავრცელებით გამოწვეული დაყოვნების გაფანტვას (დროით განზომილებაში) და არხის კოჰერენტულობას სიხშირულ განზომილებაში.

ანალოგიურად დროითი განზომილების მექანიზმი ახასიათებს არხის კოჰერენტულობის დროს, ხოლო სიხშირული განზომილების მექანიზმი დოპლერის ძვრას.

3.2. რადიოკავშირის არხები მრავალსხივიანი გავრცელებით

როგორც ზევით იყო აღნიშნული მიმღები ტერმინალის მიერ რადიოსიგნალები მიიღებიან, როგორც პირდაპირი სხივით ასევე არეკლილი სხივებით, როგორც პირდაპირი, ასევე არეკლილი სხივები განიცდიან გაფანტვას, დიფრაქციას, არეკვლას. ამიტომ მიმღებამდე მიდიან სხვადასხვა გზებით.

თუ მხედველობაში მივიღებთ, რომ ელექტრომაგნიტური ტალღები ვრცელდებიან სინათლის სიჩქარით ($V=3 \cdot 10^8$ მ/წმ), ე.ი. ერთ მიკროწამში (10^{-6} წმ) გადიან 300 მ მანძილს, გამოდის რომ ორი რადიოტალღის მიმღებში მოსვლის დრო, მაგალითად სხვადასხვა გზებით, რომელთა მანძილებს შორის სხვაობა უდრის 1 კმ-ს იქნება 3,3 მკწმ. მიმღებში სხვადასხვა დროში მოსული ასეთი სიგნალები განიცდიან ურთიერთ ინტერფერენციას. თუ მობილური სადგური (მიმღები ტერმინალი) გადაადგილდება სივრცეში, ე.ი. გადაადგილდება ინტერფერენციის ველის გავლით, და მის მიერ მიღებული სიგნალის დონე იცვლება სხვადასხვა მნიშვნელობით სხვადასხვა სიხშირეზე, ასეთ არხებს უწოდებენ არხებს მახასიათებლების ცვლილებით დროში და სიხშირული სელექციით.

რადიოარხის მნიშვნელოვან მახასიათებელს წარმოადგენს სიხშირის დოპლერის ძვრა, რომელიც გამოწვეულია V-სიჩქარით მოძრავი ობიექტიდან არეკლილი რადიოსიგნალის სიხშირის ცვლილებით. სიხშირის ასეთი ცვლილება გამოისახება გამოსახულებით

$$f_{\text{დmax}} = \frac{V}{c} * f_0 = \frac{f_0}{1080 \text{ მგჰც}} * \frac{V}{\text{კმ/ს}} \text{ ჰც} \quad (3.4)$$

ცხრილი 2-ში მოყვანილია დოპლერის ძვრის სიხშირეების მნიშვნელობები 900 და 2025 მგჰც-სიხშირეებზე მიმღების გადაადგილების სხვადასხვა V-სიჩქარეებისათვის.

ცხრილი 2. დოპლერის ძვრის სიხშირეების მნიშვნელობები 900 და 2025 მგჰც-სიხშირეებზე მიმღების გადაადგილების სხვადასხვა V-სიჩქარეებისათვის

რადიოტალის სიხშირე, მგჰც	დოპლერის სიხშირე, ჰც გადაადგილების სიჩქარე - V, კმ/სთ			
	2,4	48	120	192
900	2,0	40	100	160
2025	9,5	90	225	300

თუ მიმღებში რადიოტალა მოდის არაპირდაპირ ($\alpha = 0$), არამედ გარკვეული კუთხით მაშინ დოპლერის სიხშირე მცირდება

$$f_{\text{დ}} = f_{\text{დmax}} * \cos \alpha \quad (3.5)$$

მიმღებში, რომელიც მოძრაობს ინტერფერირების ველში მიღებული სიგნალი წარმოადგენს რადიოტალის მრავალი სხივით სუპერპოზიციის შედეგს და შესაბამისად განიცდის დროით ფლუქტუაციას. ამ მოვლენას მიუყრება ეწოდება. რადგან დოპლერის ძვრა დამოკიდებულია მიმღებში რადიოტალის მოსვლის კუთხეზე, შესაბამისად სხვადასხვა მიმართულებიდან მიღებული რადიოტალეები სხვადასხვა დოპლერის ძვრით ხასიათდებიან, რომლებიც ძირითად f_0 - სიხშირესთან ქმნიან დოპლერის სპექტრს. ნახ. 9-ზე ნაჩვენებია მიმღებში რადიოსიგნალის დონის ცვლილების დამოკიდებულება ცენტრალური სიხშირისათვის $f_0 = 900$ მგჰც, მიმღების გადაადგილების სიჩქარისათვის $V=60$ კმ/სთ, დოპლერის მაქსიმალური ძვრისათვის $f_{\text{დmax}} = 50$ ჰც.

როგორც გრაფიკიდან ჩანს დოპლერის ძვრის გამო შესაძლებელია ღრმა მიყუჩებები - 40 დბ-მდე, რაც რადიოკავშირის დაკარგვას ანუ რადიო არხის გაჩერებას გამოიწვევს.

დოპლერის ძვრა, ანუ სიხშირის ცვლილება ცხადია იწვევს მიმღებში მიღებული სიგნალის ფაზის ძვრას. ციფრული ფაზური მოდულაციის დროს (როგორც აბსოლუტური, ასევე ფარდობითი) ფაზის ძვრა გადასაცემი ერთი სიმბოლოს სიდიდით იწვევს შეცდომას ამ სიმბოლოს მიღებისას (Bit Error) და ეს დრო გამოითვლება როგორც

$$t_{\text{კორელ}} = \frac{1}{f_{\text{cmax}}} \quad (3.6)$$

ამ დროს არხის კორელაციის დრო ეწოდება.

სიმბოლოს გადაცემა ხანგრძლივობით T_S შესაძლებელია პირობით თუ

$$f_{\text{cmax}} * T_S \ll 1 \quad (3.7)$$

აქედან შეიძლება გამოვიტანოთ დასკვნა, რომ რადიოარხებში მრავალსიხვიანი გავრცელებით გადაცემის სისწრაფე შემოსაზღვრულია დოპლერის ძვრის მაქსიმალური მნიშვნელობით.

მიმღებში სხვადასხვა გზებით მიღებული სიგნალების დაყოვნებების სხვადასხვა მნიშვნელობები ქმნიან სიმბოლთაშორის ინტერფერენციებს (ხელშეშლებს). დამტკიცებულია რომ მრავალსიხვიანობით გამოწვეული დამახინჯებების თავიდან აცილებისათვის უნდა სრულდებოდეს პირობა

$$f_{\text{corr}} = \frac{1}{\Delta\tau} \quad (3.8)$$

სადაც $\Delta\tau$ -კვადრატული ფესვია რადიოსიგნალების დაყოვნებების დისპერსიიდან, რომელსაც ეწოდება დაყოვნებების სიმძლავრის გაფანტვა, f_{corr} - კოჰერენტობის ზოლია. ნაიკვისტის თეორის თანახმად კოჰერენტობის პირობაა $B \ll f_{\text{corr}}$ ან $\Delta\tau \ll T_S$.

3.3. უსადენო კავშირის არხის სტატისტიკური აღწერა

აღწერილი რადიოარხები ჩათვლილია დეტერმინირებულად, თუმცა რეალურად მათი პარამეტრების პროგნოზირება შეუძლებელია. ამიტომ არხების აღწერისათვის საჭიროა სტატისტიკური მოდელის გამოყენება.

არხი შეიძლება განსაზღვრული იქნას მისი იმპულსური გამომხაურების ავტოკორელაციური ფუნქციით.

$$R_h(\tau_1, \tau_2, t_1, t_2) = E[h(\tau_1, t_1)h^*(\tau_2, t_2)] \quad (3.9)$$

სადაც * აღნიშნავს კომპლექსურ შეუღლებას, $h(\tau, t)$ - ავტოკორელაციური ფუნქცია. სამუალო მნიშვნელობა $E[h(\tau, t)]$ მიჩნეულია ნულოვანად. ეს აღწერა შესაძლებელია გამარტივდეს დაშვებებით:

- შემთხვევითი პროცესი, რომელიც აღწერს იმპულსურ გამოხმაურებას ფართო გაგებით სტაციონალურია. ამ შემთხვევაში ავტოკორელაციური ფუნქცია დამოკიდებულია მხოლოდ სხვაობაზე $\Delta t = t_2 - t_1$ და არა დროის აბსოლიტურ მომენტზე t -ზე:

$$R_h(\tau_1, \tau_2, \Delta t) = E[h(\tau_1, t)h^*(\tau_2, t + \Delta t)] \quad (3.10)$$

- მიმღებში სხვადასხვა გზით მოსული სიგნალების ასლები არაკორელირებულია, ე.ი. ადგილი აქვს არაკორელირებულ გაფანტვას.

ეს ორი დაშვება გადააქცევს რადიოარხს სტაციონალურად ფართო გაგებით, არაკორელირებული გაფანტვით. ასეთ არხებს წარმოადგენენ მობილური კავშირის მრავალსხვიანი რადიოარხები (საბაზო სადგურიდან - აბონენტის მოწყობილობამდე და პირიქით), რომლებიც კიდევ უფრო გამარტივებულად აღიწერებიან იმპულსურ გამოხმაურების ავტოკორელაციური ფუნქციით

$$R_h(\tau, \Delta t) = E[h(\tau, t)h^*(\tau, t + \Delta t)] = Q(\Delta t, \tau_1)\delta(\tau_2 - \tau_1) \quad (3.11)$$

სიხშირულ სიბრტყეში ეს ფუნქცია ასე წარმოდგება

$$R_T = (f_1, f_2, \Delta t) = R_T(\Delta f, \Delta t) \quad (3.12)$$

ეს ნიშნავს, რომ ავტოკორელაციური ფუნქცია დამოკიდებულია მხოლოდ სიხშირის ძვრაზე Δf და არა ამ სიხშირეების (f_1, f_2) აბსოლიტურ მნიშვნელობებზე. ფურიეს გარდაქმნების გამოყენებით

$$R_h(\tau, \Delta t) \leftarrow F_\tau \rightarrow R_T(\Delta f, \Delta t) \quad (3.13)$$

შეიძლება ავტოკორელაციური ფუნქცია ჩაიწეროს ასე

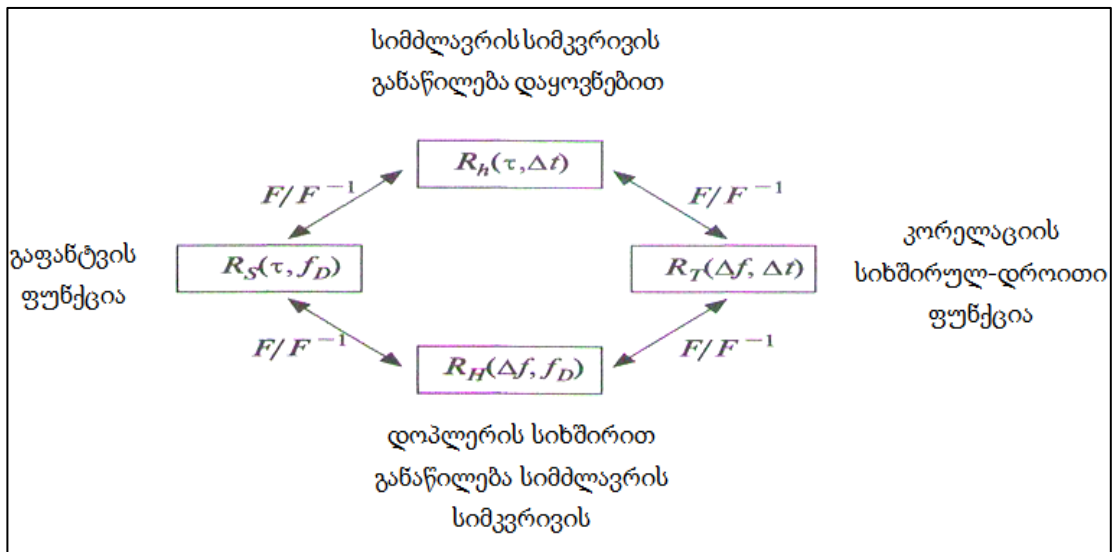
$$R_h(\tau, \Delta t) \leftarrow F_{\Delta t} \rightarrow R_S(\tau, f_D) \quad (3.14)$$

და

$$R_S(\tau, f_D) \leftarrow F_\tau \rightarrow R_H(\Delta f, f_D) \quad (3.15)$$

გაფანტვის ავტოკორელაციურ ფუნქციას $R_S(\tau, f_D)$ -ს აქვს განსაკუთრებული მნიშვნელობა. იგი აღნიშნავს, ალბათობას, რომელითაც სიგნალები მიმღებში მიიღებიან τ დაყოვნებით და f_D დოპლერის ძვრით.

დაყოვნებების, გაფანტვის, დოპლერის სიხშირეების და სიხშირულ დროითი კორელაციების ურთიერთდამოკიდებულება რადიოარხში ნაჩვენებია ნახ. 8.



ნახ. 8. შემთხვევით სტაციონალურ ფართო გაგებით რადიოარხში არაკორელირებული გაფანტვით ოთხი ავტოკორელაციური ფუნქციის თანაფარდობები

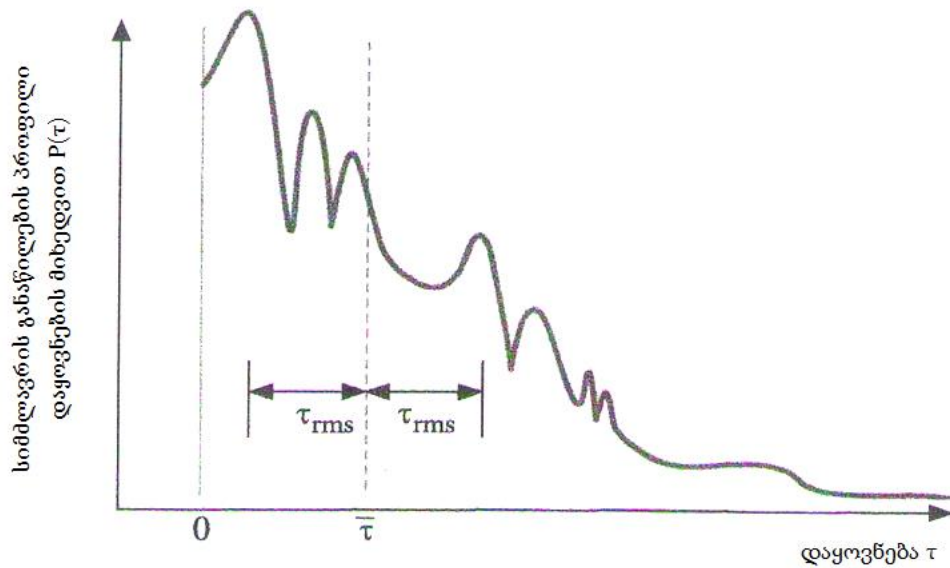
3.4. მიმღების მიერ მიღებული სიგნალის ასლების სიმძლავრეების განაწილება

რადიოარხის გამარტივებული სტატისტიკური აღწერა შესაძლებელია მისი იმპულსური გამოხმაურების ავტოკორელაციური ფუნქციით შემთხვევისათვის, როცა $\Delta t \rightarrow 0$. ფუნქციას აღნიშნავენ, როგორც $P_h(\tau) = R_h(\tau) = R_h(\tau, 0)$.

(Power Delay Profile – PDF - სიმპლავრის დაყოვნების პროფილი) ეს ფუნქცია შეიძლება გარდაისახოს ალბათობის სიმკვრივედ $P(\tau)$ და ნორმალიზების შემდეგ მიიღებს სახეს

$$P(\tau) = \frac{R_h(\tau)}{\int_{-\infty}^{\infty} R_h(\tau) d\tau} = \frac{P_h(\tau)}{\int_{-\infty}^{\infty} P_h(\tau) d\tau} \quad (3.16)$$

ნახ. 9-ზე ნაჩვენებია სიდიდის დაყოვნებების პროფილი მრავალსხვიანი გავრცელების რადიოარხისათვის.



ნახ. 9. მრავალსხვიანი არხის დაყოვნების ტიპური პროტოკოლი

ამ განაწილების საშუალო კვადრატული გადახრა

$$\tau_{rms} = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} (\tau - D_\tau)^2 P(\tau) d\tau} \quad (3.17)$$

ახასიათებს დაყოვნების გაფანტვას, გამოწვეულს მრავალსხვიანი გავრცელებით. საშუალო დაყოვნება გამოითვლება, როგორც

$$D_\tau = E[\tau] = \int_{-\infty}^{\infty} \tau P(\tau) d\tau \quad (3.18)$$

ანალოგიურად შესაძლებელია მიმღებში მოსული სიგნალის ასლების დოპლერის ძვრის განაწილების სიმკვრივის გამოთვლაც:

$$P(f_D) = \frac{R_H(f_D)}{\int_{-\infty}^{\infty} R_H(f_D) df_D} = \frac{S(f_D)}{\int_{-\infty}^{\infty} S(f_D) df_D} \quad (3.19)$$

როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული რადიარხები კლასიფიცირდებიან იმის მიხედვით, თუ რა სისწრაფით იცვლებიან მათი მახასიათებლები გადასაცემი სიმბოლოს მინიმალურ ხანგრძლივობასთან შედარებით. თუ სიმბოლოს ხანგრძლივობაა $T_s \ll T_j$ (T_j - არხის კოჰერენტულობის დროა) არხი წარმოადგენს არხს ნელი მუყუჩებებით, წინააღმდეგ შემთხვევაში ($T_s \gg T_j$) არხი განიცდის სწრაფ მიყუჩებებს.

რადიოარხის უფრო სრული აღწერისათვის საჭიროა ნაპოვნი იქნას ერთობლივი ალბათობის სიმკვრივე, როგორც დაყოვნებების ასევე დოპლერის ძვრის შედეგად - $P(\tau, f_D)$, რომელიც შეიძლება მიღებული იქნას $R_s(\tau, f_D)$ - ავტოკორელაციის ფუნქციიდან (3.9). ამ ფუნქციით შეიძლება გამოითვალოს როგორც დაყოვნებების სიდიდე ასევე დოპლერის ძვრების მნიშვნელობები.

არხის კოჰერენტულობის დროს T_j და კოჰერენტულობის დიაპაზონი $B_s - B_s = \frac{1}{T_s}$ ერთმნიშვნელოვნად განსაზღვრავენ არხს და გამოიყენება მიმღებ-გადამცემი მოწყობილობების დამუშავების პროცესში. აქ ყურადღება უნდა მიექცეს ორ ძირითად მიდგომას, კერძოდ.

- 1) T_s - გადასაცემი სიმბოლოს ხანგრძლივობას, რომელიც განსაზღვრავს გადაცემის სისწრაფეს.

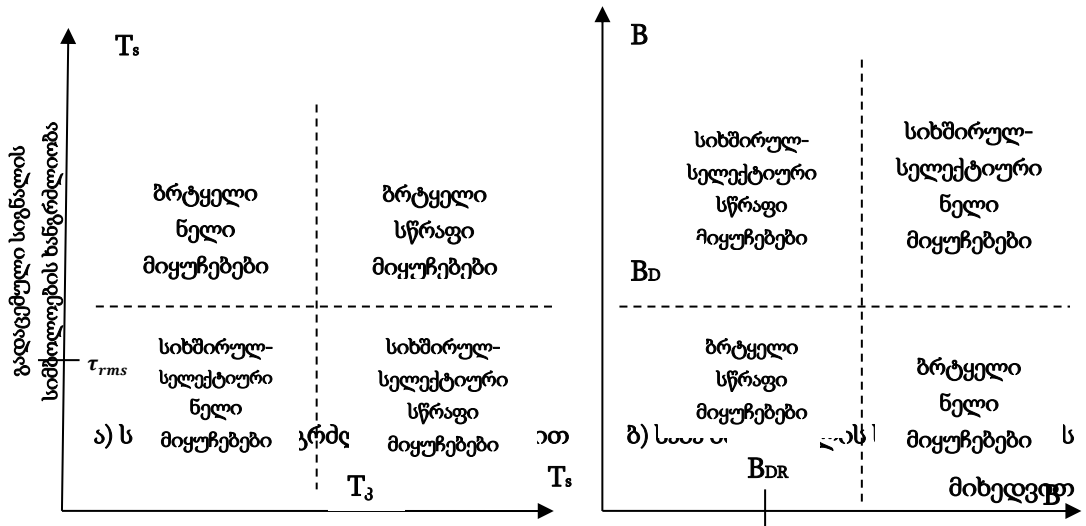
თუ $T_j \ll T_s$, მაშინ მიმღებში სიმბოლო მიიღება დიდი დამახინჯებით რასაც მივყავართ Bit Error-ის მაღალ მნიშვნელობებთან. დოპლერის გაფანტვა B_D იქნება მეტი ვიდრე სიგნალის სპექტრის სიგანე ($B_D \gg B$) და მიღებული სიგნალი იქნება გამოხატულად დროზე დამოკიდებული.

თუ $T_j \gg T_s$, მაშინ კავშირის არხი განიხილება, როგორც სტაციონალური ერთი სიმბოლოს ხანგრძლივობის განმავლობაში და სიგნალი დროზე დამოუკიდებელია.

- 2) გადასაცემი სიგნალის სიხშირული სპექტრის სიგანეს, B :

თუ $B_j \ll B$, მაშინ კავშირის არხის გადაცემის ფუნქცია იცვლება B - სიხშირულ დიაპაზონში. დაყოვნების გაფანტვა ამ შემთხვევაში იქნება მეტი, ვიდრე სიმბოლოს ხანგრძლივობა ($\tau_{rms} \gg T_s$) რასაც მოჰყვება

სიმბოლთაშორისი დამახინჯებები (InterSymbol Interference – ISI). ამ დამახინჯებების თავიდან ასაცილებლად საჭიროა მიმღებში ეკვალიზერის გამოყენება. არხის ასეთ ქმედებას სიხშირულ-სელექტიური მიღევა ეწოდება.



ნახ. 10. არხების კლასიფიკაცია

თუ $B_p \gg B$ არხის გადაცემის ფუნქცია მთელი დიაპაზონის მანძილზე მუდმივია, სიმბოლთაშორისი დამახინჯებები მინიმალურია და არხი ითვლება ვიწროზოლოვანად.

ზემოაღნიშნული მსჯელობების საილუსტრაციოდ ნახ.10-ზე მოყვანილია არხების კლასიფიკაციის გრაფიკი.

3.5. მობილური კავშირის MIMO-სისტემების რადიოარხების მათემატიკური მოდელი

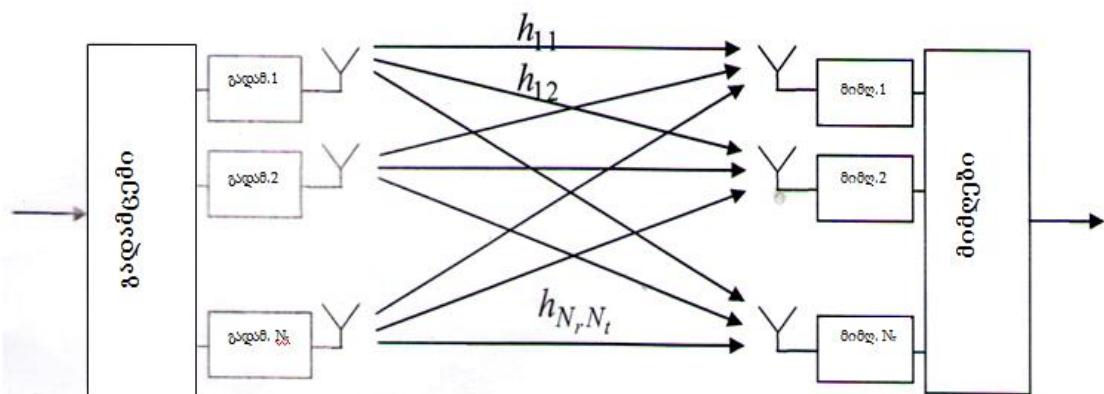
ინფორმაციის გადაცემის მეთოდების თეორიული კვლევებისათვის საკვანძო საკითხს წარმოადგენს სატელეკომუნიკაციო არხების, მათ შორის რადიოარხების მათემატიკური მოდელირება. მობილური კავშირის სიტემები და ქსელების განვითარების ძირითადი მიმართულებები დაკავშირებულია გადაცემის სისწრაფეების გაზრდასა და საიმედობის (ხელშეშლამდგრადობის) ამაღლებასთან. ამ ამოცანების გადაჭრის ერთ-ერთ ეფექტურ გზად მიჩნეულია MIMO (Multiple Input Multiple Output)

მეთოდების გამოყენება. MIMO-მეთოდები და სპექტრული ეფექტურობის ამაღლების სხვა მეთოდები შეიძლება გამოყენებული იქნას OFDM და OFDMA-ტექნოლოგიებთან ერთობლივად (OFDMA – Orthogonal Frequency Division Multiple Access). ტექნოლოგიების ასეთი ერთობლივი გამოყენება უდევს საფუძვლად მობილური კავშირის ახალ თაობებს 4G, LTE-Advanced და 5G-ს. წინამდებარე პარაგრაფში შევხებით მხოლოდ MIMO- სისტემების მათემატიკური მოდელირების საკითხებს.

MIMO სისტემებში გადამცემსა და მიმღებს შორის იქმნება რამოდენიმე სივრცითი არხი მრავალი შესასვლელითა და მრავალი გამოსასვლელით.

აქ არ მოვიყვანთ MIMO სისტემებში გამოყენებულ ისეთ ცნობილ მეთოდებს როგორცაა Alamout-ის მეთოდი და ალგორითმი BLAST. ჩვენ შევხებით მხოლოდ MIMO-არხების განზოგადებული მათემატიკური მოდელების შექმნის პროცედურებს.

MIMO-ტექნოლოგიის რეალიზაციის სქემა მოყვანილია ნახ. 11. გადამცემი ბლოკი შეიცავს N_t გადამცემსა და ანტენას, მიმღები კი N_r მიმღებ ანტენას. ნებისმიერი გადამცემიდან სიგნალი შეიძლება მიიღოს მიმღების ნებისმიერმა ანტენამ.



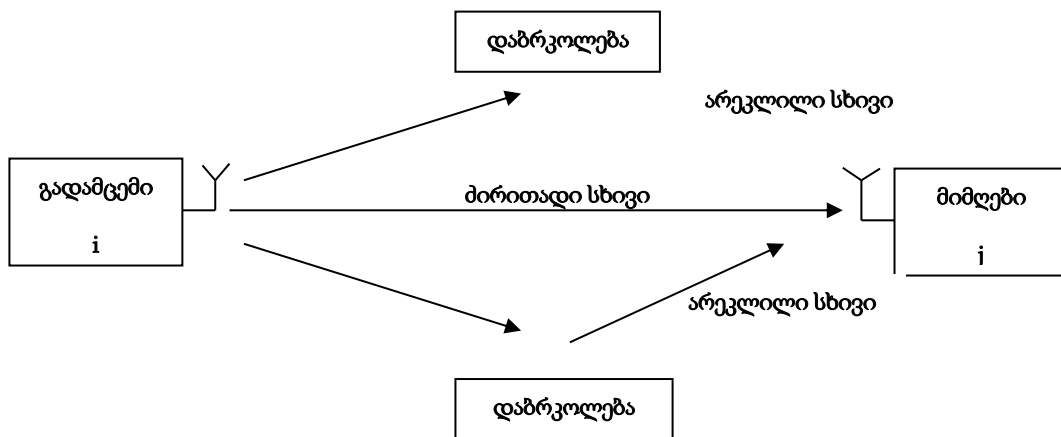
ნახ. 11. MIMO-სისტემის სტრუქტურული სქემა

არხის გადაცემის კოეფიციენტების მატრიცა ასე ჩაიწერება

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & \dots & h_{1N_t} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & \dots & h_{2N_t} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} & \dots & h_{3N_t} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ h_{N_r1} & h_{N_r2} & h_{N_r3} & \dots & h_{N_rN_t} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

და ის წარმოადგენს MIMO არხების ძირითად მახასიათებლს. მობილური კავშირის მრავალსხვიანი არხების ანალიზისათვის გამოიყენება დაშვება, რომ არხი კვაზი სტაციონალურია და სიგნალ/ხელშეშლის ფარდობის დაქვეითება დიაპაზონში (1-2) გგჰც, გამოწვეული მიყუჩებებით ექვემდებარება რელიეს მოდელს.

(3.20) მატრიცის თითოეული h_{ij} კოეფიციენტი შეიძლება შედგებოდეს რამოდენიმე სხვისაგან.



ნახ. 12. რადიოსიგნალის მრავალსხვიანი გავრცელება

ეს კოეფიციენტები არ არიან დამოუკიდებლები, რაც დასტურდება შემდეგი მსჯელობით. ჩავწეროდ სიგნალი ჰარმონიულ რხევად კუთხური სიხშირით $\omega_0 = 2\pi f_0$.

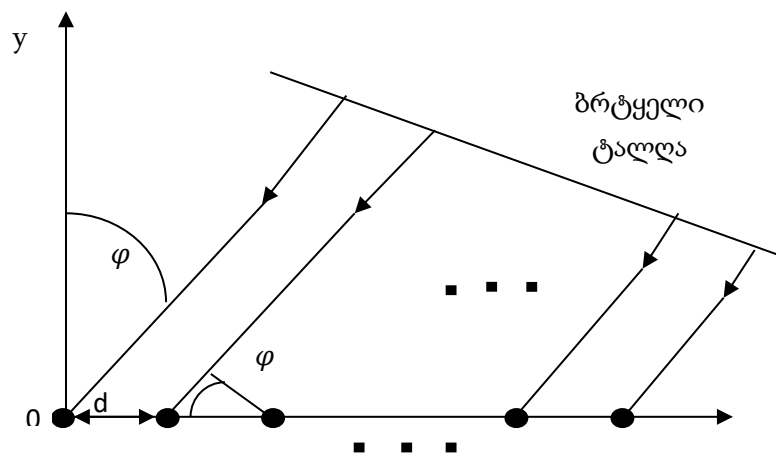
ზოგადად მიმღებში შემოსული სხვივები მიიღებიან ანტენებით, რომელიც წარმოადგენს ვიბრატორების მესერს (ნახ. 13). მასზე ეცემა ბრტყელი რადიოტალღა ერთ-ერთი სხვის სახით. ზოგად შემთხვევაში ეს სხვი ეცემა ვიბრატორების მესერს φ კუთხით. ვიბრატორებს შორის მანძილი აღვნიშნოთ d -თი. საწყისად მივიღოთ პირველი ვიბრატორი

(მარცხნიდან პირველი ნახ. 13-ზე) $t=0$ მომენტში ამ ვიბრატორის მიღებული სიგნალი აღიწერება, როგორც

$$s_1(t) = \exp(j\omega_0 t) \quad (3.21)$$

მეორე ვიბრატორში სიგნალის ფაზა წინ უსწრებს პირველი ვიბრატორის სიგნალის ფაზას, რადგანაც სიგნალის ამ ვიბრატორში შესვლის დრო ნაკლებია, ნაკლები მანძილის გავლის გამო. ეს დრო განისაზღვრება ნახ. 13-დან

$$\tau = \frac{d \sin \varphi}{c} \quad (3.22)$$



ნახ. 13. ვიბრატორების მესერი

სადაც c -სინათლის სიჩქარეა ვაკუუმში (რადიოტალღების გავრცელების დრო). შესაბამისად მეორე ვიბრატორში სიგნალი აღიწერება ასე

$$s_2(t) = \exp(j\omega_0(t + \tau)) = \exp(j2\pi f_0 \tau) \exp(j\omega_0 t) \quad (3.23)$$

ზოგადად შეიძლება ჩავწეროთ, რომ სიგნალის ფაზა ორ უახლოეს ვიბრატორს შორის შეადგენს $\frac{2\pi}{\lambda} d \sin \varphi$ და შესაბამისად n -ურ ელემენტში სიგნალის ფაზა იქნება

$$s_n(t) = \exp(j \frac{2\pi}{\lambda} (n - 1) d \sin \varphi) \exp(j\omega_0 t), \quad n = 1, \dots, N \quad (3.24)$$

აქ $\exp(j \frac{2\pi}{\lambda} (n - 1) d \sin \varphi)$ - სიგნალის კომპლექსური ამპლიტუდაა S_n შესაბამისად სიგნალი ჩაიწერება ასე

$$S_n(t) = S_n \exp(j\omega_0 t) \quad (3.25)$$

აქ შესაძლებელია ყველა N მიმღები ვიბრატორის სიგნალის აღწერა მატრიცით:

$$\vec{S} = \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ \exp\left(j\frac{2\pi}{\lambda}d\sin\varphi\right) \\ \vdots \\ \exp\left(j\frac{2\pi}{\lambda}(N-1)d\sin\varphi\right) \end{pmatrix} \quad (3.26)$$

$$\vec{s}(t) = \begin{pmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \\ \vdots \\ s_N(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_N \end{pmatrix} \exp(j\omega_0 t) = \vec{S} \exp(j\omega_0 t) \quad (3.27)$$

MIMO-სისტემაში r -ანტენის მიერ მიღებული ყველა სხვივისაგან მიღებული ჯამური სიგნალი აღიწერება როგორც

$$z_r(t) = \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^{N_t} [h_{cln} u_x(t - (n-1)T - \tau_l) + h_{sln} u_x(t - (n-1)T - \tau_l) + \xi(t)], \quad 0 < t < \infty, \quad (3.28)$$

სადაც L -არხში სხვივების სრული რაოდენობაა; $\tau_l - l$ სხვივის დაყოვნების დროა; u_x -სიგნალის ცნობილი რეალიზაციაა მიმღებში; T -გაადასაცემი სიმბოლოების ხანგრძლიობაა; h_{cln} და $h_{sln} - l$ სხვივის გადაცემის შემთხვევითი სიმფაზური და კვადრატურული შემადგენლებია: $\xi(t)$ - გაუსის შემთხვევითი ადიტიური ხელშეშლაა.

თუ მხედველობაში მივიღებთ, რომ გადამცემსა და მიმღებს შორის მანძილი მრავალჯერ აღემატება რადიოტალღის სიგრძეს, შესაძლებელია არ გავითვალისწინოთ გადამცემი ანტენის გეომეტრია და ჩავთვალოთ, რომ MIMO-სისტემაში გამოსხივება მოდის ერთი გეომეტრიული წერტილიდან. მაშინ მიმღებში ანტენის ვიბრატორების მესერის გეომეტრიის გათვალისწინებით MIMO-სისტემის რადიოარხის ძირითადი მატრიცის კოეფიციენტები h_{rij} ასე გამოითვლება

$$h_{rn} = \sum_{l=1}^L (1 + \alpha A_{ul}) \exp(j\pi \frac{d}{\lambda} (r-1)(\varphi_{cl} + \beta \varphi_{\phi_l})) \quad (3.29)$$

სადაც $\varphi_{cl} = \sin\left(\frac{Q_l}{180}\pi\right)$, $Q_l - l$ სხვივის მიმღებში მოსვლის კუთხეა. $A_{ul} - l$ სხვივის შემთხვევითი ამპლიტუდაა; $\varphi_{\phi_l} - l$ სხვივის შემთხვევითი ფაზაა ($\varphi_{\phi_l} = \arctan \frac{y_1}{y_2}$); α და β წონითი კოეფიციენტებია, რომლებიც ითვალისწინებენ სიგნალების სივრცით კორელაციას მიმღები ანტენის ვიბრატორებში.

3.6. მობილური კავშირის რადიოარხების მოდელირებით

მიღებული ძირითადი შედეგები

რადიოსიგნალები გადამცემიდან მიმღებამდე გავრცელების დროს განიცდიან დამახინჯებებსა და ცვლილებებს, კერძოდ დიდი და მცირე მასშტაბების მიყუჩებებს. რადიოსიგნალების გავრცელების ცნობილ მოვლენას სივრცით კარგვებს - სიგნალის დონის შემცირებას მანძილის პროპორციულად, ემატება დაჩრდილვის მოვლენა, რაც იწვევს სიგნალის სიმძლავრის შემცირების ფლუქტუაციას გარემომცველი გარემოებების შესაბამისად. შედეგად ადგილი აქვს ე.წ. დიდი მასშტაბის მიყუჩებებს. მცირე მასშტაბის მიყუჩებები გამოწვეულია მრავალსხივიანი გავრცელების შედეგად, როდესაც მიმღებში სიგნალი მიდის სხვადასხვა ფაზაში მყოფი სიგნალის ასლების სახით, რომლებიც ერთმანეთს აძლიერებენ ან ასუსტებენ.

მრავალსხივიანი გავრცელების შედეგია დაყოვნების გაფანტვა, დოპლერის გაფანტვა და კუთხური გაფანტვა, რომლებიც იწვევენ მიღების სიხშირულ, დროით და სივრცით სელექტიურობას. დროითი დაყოვნება და მისი გაფანტვა, რომელიც ემატება რადიოტალღების ბუნებრივ დაყოვნებას, გამოწვეული რადიოტალღების გავრცელების სასრული სიჩქარით ($3 \cdot 10^8$ მ/წმ), როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული დამოკიდებულია გარემომცველ გარემოზე. კერძოდ ქალაქის ტიპური განაშენიანების პირობებში ეს დამატებითი დაყოვნება შეიძლება შეადგენდეს (0-2,14) მკწმ, გარეუბნების პირობებში (0-0,528)მკწმ, ხოლო მცირე სიმაღლის გორაკიანი ტერიტორიისათვის (0-18)მკწმ.

მობილური კავშირის MIMO-სისტემების მოდელირების დროს მხედველობაში უნდა იქნას მიღებული გადამცემი და მიმღები ანტენების მასივების კონფიგურაციები და კორელაციები. α და β კოეფიციენტების შერჩევით (3.29) გამოსახულებაში შეიძლება შევარჩიოთ როგორც სრულად კოლერირებული ($\alpha = 0$ და $\beta = 0$), ან არაკოლერირებული.

თავი 4. პაკეტის დაყოვნების შემცირების არსებული მექანიზმები

პაკეტის ძალიან დაბალი დაყოვნების მთავარი მამოძრავებელი არის ახალი დანართების მხარდაჭერა. მომავლის ქსელებში გათვალისწინებული ზოგიერთი გამოყენების კარიანტები, როგორცაა საგზაო ტრაფიკის უსაფრთხოება, კრიტიკული ინფრასტრუქტურის კონტროლი და ინდუსტრიული პროცესები, საჭიროებენ დღეისათვის არსებული მიბილური კომუნიკაციის სისტემებთან შედარებით მნიშვნელოვნად მცირე დაყოვნებას.

დაყოვნების შემცირება ბოლოდან-ბოლომდე (End-to-End) მოითხოვს ხელმისაწვდომი გამტარუნარიანობის გაზრდას და ქსელის რესურსების სრულ კონტროლს. დაყოვნების მიმართ ასეთი კრიტიკული დანართების მხარდაჭერისთვის 5G ქსელი უნდა ითვალისწინებდეს, რომ მიღწეულ იქნას ბოლოდან-ბოლომდე მილიწამების ერთნიშნა ციფრთა დიაპაზონიდან ან უფრო ნაკლები, თუმცა წარდგენითი დონის კადრირების მოთხოვნამ და გადამტანებისთვის არსებულმა კოდეკების შეზღუდვებმა შესაძლოა მიგვიყვანოს უფრო მაღალ დაყოვნებამდე პრაქტიკაში.

ბევრი მოწყობილობა გააზიარებს გამოთვლით სიმძლავრეებს და დამგროვებლებს რადიონტერფეისთან ახლოს, რაც ნიშნავს ტექნიკური საშუალებების განთავსებას მომხმარებელთან რაც შეიძლება ახლოს. ეს ქმნის ახალ შესაძლებლობებს რეალურ დროში კომუნიკაციისთვის და მომსახურების ზემოაღიწველობას სხვადასხვა სცენარებისთვის - დაწყებული გართობიდან, საწარმოო პროცესების კონტროლამდე [17].

წინამდებარე დისერტაციაში ყურადღება გავამახვილებულია რამდენიმე მეთოდზე, რომლებიც მოცემულია მესამე თავის შემდეგ პარაგრაფებში.

ა) საარხო დონის (MAC) აგებულების გამარტივება და ბ) პროგრამირებადი ქსელის (SDN) კონტროლერის დანერგვა რეტრანსლატორზე.

4.1. საარხო დონის აგებულების გამარტივება

5G ქსელში დაყოვნების შემცირებისთვის ერთ-ერთი მეთოდი იქნება ისეთი სისტემის დანერგვა რომელსაც ექნება აბონენტების ბაზის ზრდის დამუშავებისა და მართვის შესაძლებლობა. მაგალითად, ქსელში შესაძლოა მიღწეული იქნას დიდი რაოდენობით PRACH (Physical Random Access Channel) არხები, ამან შეიძლება გამოიწვიოს ქსელის გადატვირთულობა (congestion). ეს შესაძლებელია აღმოიფხვრას ფიზიკური და საარხო დონეებზე არსებული სირთულეების (complexity) შემცირებით. რომ გავიგოთ თუ როგორ მუშაობს ეს მეთოდი უფრო ყურადღებით დავაკვირდეთ გადაცემის დროის ინტერვალს (Transmission Time Interval - TTI) და ჰიბრიდული ავტომატური განმეორების მოთხოვნას (Hybrid automatic repeat request (hybrid ARQ or HARQ)).

4.1.1. გადაცემის დროის ინტერვალი

ეს არის დროის მინიმალური სიგრძე გადაცემისთვის მომხმარებლის მოწყობილობიდან. LTE-ს შემთხვევაში თითოეული ქვეფრეიმი არის ერთი მილიწამი სიგრძის და შეიცავს ორ დროით არხს. ეს არის უმცირესი დაგეგმილი დრო რაც შეიძლება იყოს განკუთვნილი მომხმარებლის მოწყობილობისთვის. დაშიფრული და შეცდომებისაგან დაცული პაკეტის გადაცემის წინ მოითხოვება სრული სატრანსპორტო ბლოკი. ეს ნიშნავს რომ მიკროფონიდან, კამერიდან ან სხვა სენსორიდან, მონაცემების მიღებიდან მის გადაცემამდე არსებობს გარკვეული დაყოვნება.

ჩვეულებრივ გადაცემის დროის ინტერვალის (TTI) გაუმჯობესება მოითხოვს მახასიათებლების ცვლილებებს OSI მოდელის პირველ (PHY) და მეორე (MAC) დონეებზე. იმისათვის რომ მაქსიმალურად გავზარდოთ ენერგო ეფექტურობა და დაყოვნება დავიყვანოთ მინიმუმადე, მომხმარებლის/საკონტროლო მონაცემების გადაცემა დროის მონაკვეთში

უნდა მოხდეს სწრაფად, რაც მიგვიყვანს უფრო მცირე გადაცემის დროის ინტერვალამდე. MAC დონის გამარტივება გვეხმარება მივაღწიოთ მიზნად დასახული გადაცემის - დროს ერთ მილიწამს. მცირე გადაცემის დროის ინტერვალს (TTI) მივყავართ შემცირებულ ბუფერიზაციის დრომდე და საბოლოო ჯამში ბუფერის საჭირო ზომის დაბალ ღირებულებამდე. TTI დროის ინტერვალის შემცირება პირდაპირ ამცირებს ასევე უკუკავშირის დროს. რადგან ფაქტობრივი დაყოვნება დამოკიდებულია არა მხოლოდ TTI-ზე, არამედ დამუშავების დროზე ამიტომ საკონტროლო და ეტალონური სასიგნალო სტრუქტურები ისე უნდა იყოს დამუშავებული რომ მიმღების მხარეს შესაძლებელი იყოს ეფექტური კონვეიერული დამუშავება.

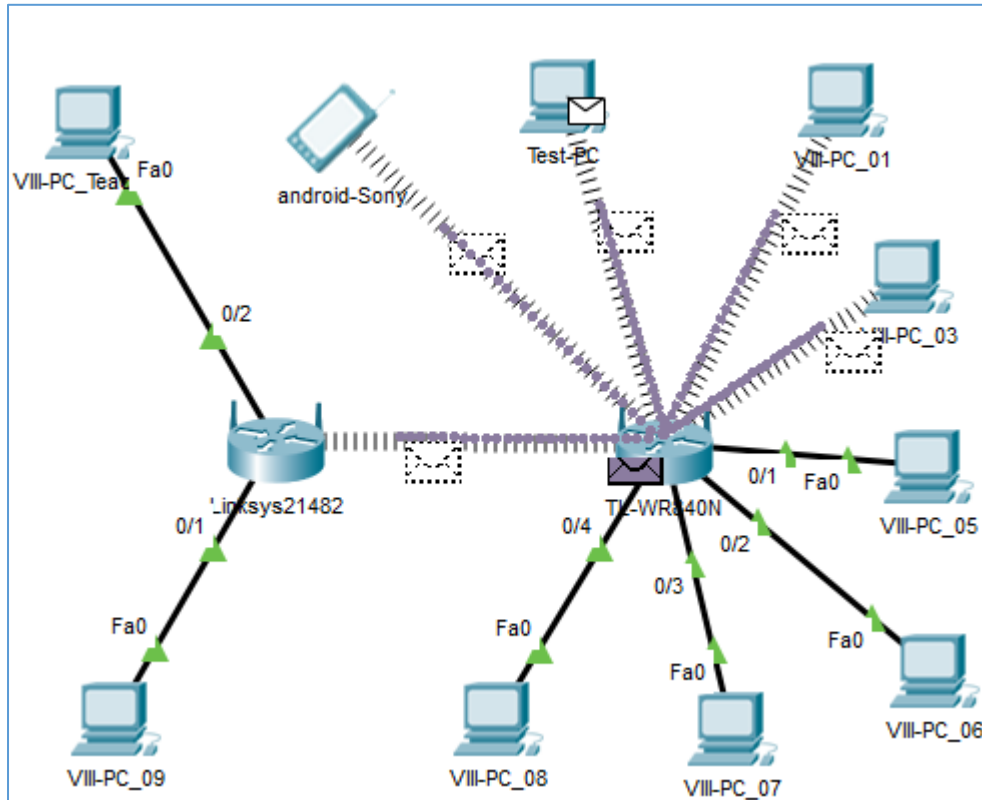
გადაცემის დროის ინტერვალის მნიშვნელობაზე დაკვირვებისთვის უნივერსიტეტის ლაბორატორიაში ჩატარებულია ექსპერიმენტი Wi-Fi ქსელზე. დაკვირვების ჩასატარებლად გამოყენებულია 2 ქსელური მოწყობილობა და 9 მომხმარებლის მოწყობილობა. ნახ. 14-ზე მოცემულია ქსელის ტოპოლოგია რომელიც აიგო ექსპერიმენტისთვის.

TTI-ზე დაკვირვებისთვის გამოყენებულ იქნა ორი პარამეტრის ცვლილება:

1. ყოველი გადაცემული პაკეტის პასუხზე ლოდინის დრო მილიწამებში;
2. პაკეტების გადაცემის სიხშირე;
3. გადაცემული პაკეტის ზომა.

პაკეტების გადასაცემად გამოყენებულია პროგრამული უზრუნველყოფა PingInfoView, რომელიც საშუალებას გვაძლევს საჭირო რაოდენობისა და ზომის (პაკეტის ზომა ბაიტებში) პაკეტები გადავცეთ ყველა მოწყობილობაზე ერთდროულად, სასურველი დროის ინტერვალით მაგ. ყოველ ერთ წამში გადაიგზავნოს 1 პაკეტი ყველა მოწყობილობასთან და ლოდინის დროით მილიწამებში. მიღებული შედეგები შეგვიძლია შევინახოთ .csv ფაილის სახით.

მეოთხე დანართში მოცემულია ექსპერიმენტში გამოყენებული პროგრამული უზრუნველყოფის ძირითადი გრაფიკული ინტერფეისები.



ნახ. 14. ექსპერიმენტის ჩასატარებლად აგებული Wi-Fi ქსელის ტოპოლოგია

შემუშავდა ექსპერიმენტის ჩატარების სამი სცენარი. სამივე შემთხვევაში ქსელის ტოპოლოგია იყო ერთი და იგივე. ასევე მიერთებული მოწყობილობების რაოდენობა - 11 და თითოეულ მოწყობილობაზე გადაცემული პაკეტების რაოდენობა - 100 იყო უცვლელი. პაკეტის ზომა პირველი და მეორე სცენარებისთვის იყო 3000 ბაიტი, ხოლო მესამე სცენარისთვის 12 ბაიტი.

პირველ ვარიანტში პაკეტის გადაცემის სიხშირედ აღებულია 11 პაკეტის (11 მოწყობილობაზე) გადაცემა 3 წამში, ხოლო ყოველი გადაცემული პაკეტის პასუხზე ლოდინის დრო 2 წამი. მიღებული შედეგები მოცემულია ცხრილი 3-ში. საიდანაც ჩანს რომ გადაცემული 1100 პაკეტიდან დაკარგულია მხოლოდ ერთი - მობილურ (ანდროიდ) მოწყობილობასთან.

ექსპერიმენტის მეორე სცენარისთვის პაკეტის გადაცემის სიხშირედ აღებულია 11 პაკეტის (11 მოწყობილობაზე) გადაცემა 1 წამში, ხოლო ყოველი გადაცემული პაკეტის პასუხზე ლოდინის დრო 1 მილიწამი. მიღებული შედეგები მოცემულია ცხრილი 4-ში.

ცხრილი 3.წარმატებით დაბრუნებული და დაკარგული პაკეტები 3 წმ გადაცემის სიხშირისა და 2 წმ პასუხზე ლოდინის შემთხვევაში

მოწყობილობა	IP მისამართი	გადაცემული პაკეტების რაოდენობა	დაკარგული პაკეტების რაოდენობა	დაკარგული პაკეტების წილი %
Linksys21482	192.168.1.1	100	0	0%
VIII-PC_03	192.168.1.101	100	0	0%
VIII-PC_07	192.168.1.103	100	0	0%
android-Sony	192.168.1.106	99	1	1.00%
VIII-PC_01	192.168.1.121	100	0	0%
VIII-PC_Teacher	192.168.1.126	100	0	0%
VIII-PC_05	192.168.1.131	100	0	0%
VIII-PC_08	192.168.1.135	100	0	0%
TL-WR840N	192.168.1.136	100	0	0%
Test_PC	192.168.1.138	100	0	0%
VIII-PC_06	192.168.1.149	100	0	0%
სულ პაკეტების რაოდენობა	ყველა მისამართიდან	1099	1	0%

ცხრილი 4.წარმატებით დაბრუნებული და დაკარგული პაკეტები 1 წმ გადაცემის სიხშირისა და 1 მილიწამი პასუხზე ლოდინის შემთხვევაში

მოწყობილობა	IP მისამართი	გადაცემული პაკეტების რაოდენობა	დაკარგული პაკეტების რაოდენობა	დაკარგული პაკეტების წილი %
Linksys21482	192.168.1.1	87	13	12.00%
VIII-PC_03	192.168.1.101	88	12	12.70%
VIII-PC_07	192.168.1.103	92	8	8.00%
android-Sony	192.168.1.114	61	39	37.00%
VIII-PC_01	192.168.1.121	88	12	12.00%
VIII-PC_Teacher	192.168.1.126	89	11	11.00%
VIII-PC_05	192.168.1.131	89	11	11.00%
VIII-PC_08	192.168.1.135	92	8	8.00%
TL-WR840N	192.168.1.136	91	9	10.00%
Test_PC	192.168.1.138	100	0	0%
VIII-PC_06	192.168.1.149	90	10	11.00%
სულ პაკეტების რაოდენობა	ყველა მისამართიდან	967	133	12.06%

როგორც შედეგებიდან ჩანს გადაცემული 1100 პაკეტიდან წარმატებით დაბრუნდა 967 პაკეტი, დაიკარა - 133. სულ დანაკარგი პაკეტების წილი არის 12.06 %.

ცხრილი 5. წარმატებით დაბრუნებული და დაკარგული პაკეტები 1 წმ გადაცემის სიხშირის, 1 მლწმ პასუხზე ლოდინისა და 12 ბაიტი ზომის პაკეტების გადაცემის შემთხვევაში

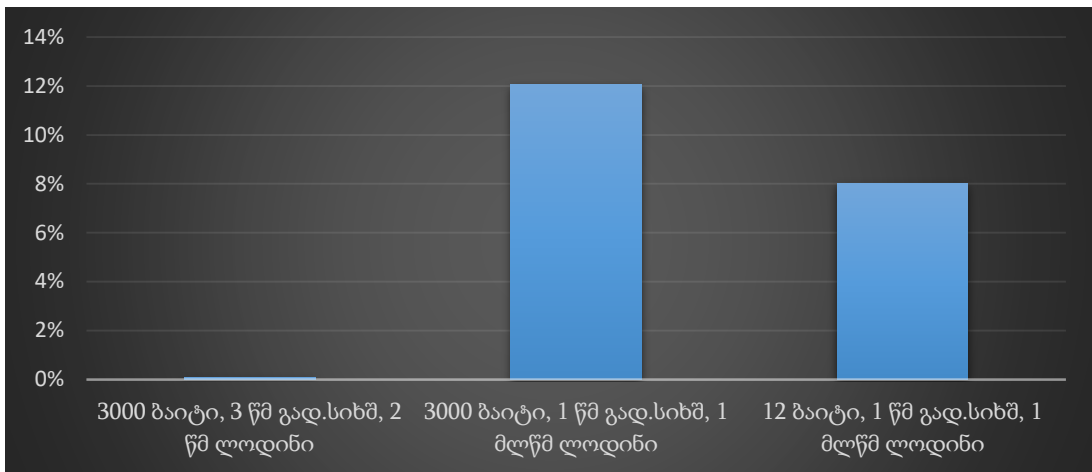
მოწყობილობა	IP მისამართი	გადაცემული პაკეტების რაოდენობა	დაკარგული პაკეტების რაოდენობა	დაკარგული პაკეტების რაოდენობა %
Linksys21482	192.168.1.1	96	4	4.00%
VIII-PC_03	192.168.1.101	96	4	4.00%
VIII-PC_07	192.168.1.103	93	7	7.00%
android-Sony	192.168.1.106	72	27	27.27%
VIII-PC_08	192.168.1.117	93	7	7.00%
VIII-PC_01	192.168.1.121	90	10	10.00%
VIII-PC_Teacher	192.168.1.126	96	4	4.00%
VIII-PC_05	192.168.1.131	91	9	9.00%
TL-WR840N	192.168.1.136	92	8	8.00%
Test-PC	192.168.1.138	100	0	0%
VIII-PC_06	192.168.1.149	92	8	8.00%
სულ პაკეტების რაოდენობა	ყველა მისამართიდან	1011	88	8.02%

წარმოდგენილი შედეგების მიხედვით ერთი და იმავე გადაცემის სიხშირისა და ლოდინის დროის შემთხვევაში, დიდი და მცირე ზომის პაკეტებისთვის კარგები არის სხვადასხვა, 12 ბაიტი ზომის პაკეტისთვის დაკარგული პაკეტების რაოდენობა შემცირდა 4 %-ით. ნახ. 15-ზე გრაფიკულად არის მოცემული ექსპერიმენტის სამივე სცენარისას დაკარგული პაკეტების წილის შედარება.

ნახ. 15 ა-ზე მოცემულია დაყოვნებების საშუალო მნიშვნელობები სამივე სცენარისთვის.

დანართ 2-ში მოცემულია გადაცემის დროის ინტერვალის (TTI) ცვლილებაზე დაკვირვებისას გადაცემული სატესტო მონაცემების

დაყოვნებები, უკან წარმატებით დაბრუნებული და დაკარგული პაკეტების მაჩვენებლები სამი სხვადასხვა სცენარის მიხედვით.



ნახ. 15. დაკარგული პაკეტების რაოდენობის საშუალო მნიშვნელობები ექსპერიმენტის სამივე სცენარიდან

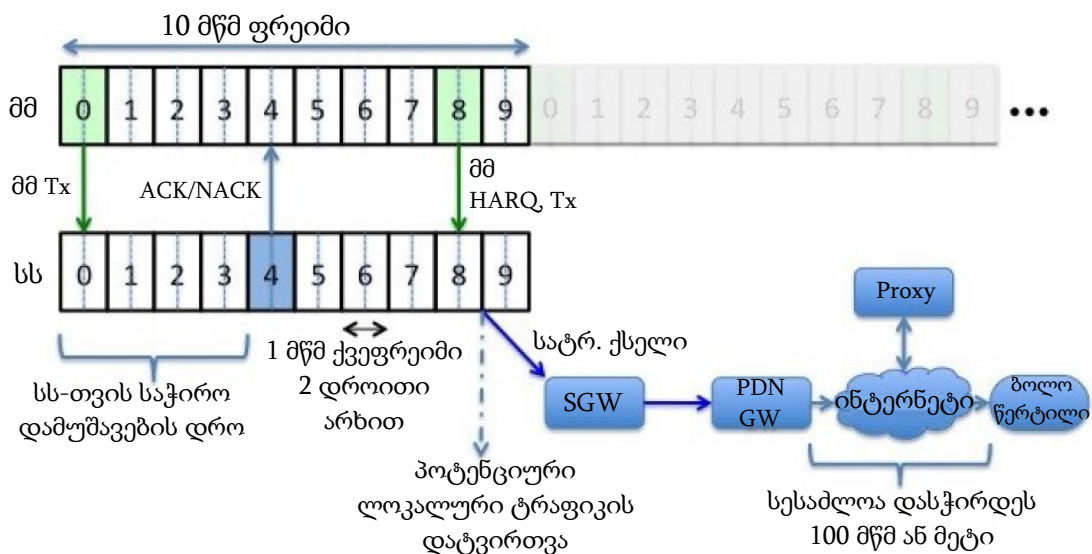
შესაძლოა საჭირო გახდეს დიდი ზომის IP პაკეტების დაყოფა რამდენიმე TTI-ზე, არხის ხარისხთან ადაპტაციისთვის შერჩეული კოდირებისა და მოდულაციის სქემის მიხედვით. ამ სეგმენტაციას იქამდე მივყავართ რომ ერთი IP პაკეტი დაიგეგმება რამდენიმე დროით ინტერვალზე. ეს ჩანს ჩატარებული ექსპერიმენტიდანაც, 3000 ბაიტი ზომის პაკეტების გადაცემისას ისინი დაიყოფა მინიმუმ ორ ნაწილად რაც მოითხოვს უფრო მეტ გადაცემის დროს ინტერვალს.

ექსპერიმენტის მსვლელობისას აღმოჩნდა რომ მობილური ტერმინალური მოწყობილობისა და პერსონალური კომპიუტერის პაკეტის დაყოვნებაზე ტესტირების შედეგები არის მნიშვნელოვნად განსხვავებული. სატესტო მობილური მოწყობილობის მდგომარეობით გამოწვეული სხვაობის გამოსარიცხად შეიცვალა მობილური მოწყობილობა 2-ჯერ, მაგრამ შედეგები იყო იგივე. ეს იმას ნიშნავს რომ დღემდე არსებულ ქსელებთან ადაპტირებული მობილური მოწყობილობების დიდი ნაწილის (მათ შორისაა მოწყობილობები LTE-ს მხარდაჭერით) გამოთვლითი სიმძლავრეები არ არის საკმარისი იმისათვის რომ მიღწეულ იქნას

დაყოვნება 1 მილიწამამდე. მიღებული შედეგების შედარება ნაჩვენებია დანართ 2-ში.

4.1.2. ჰიბრიდული ავტომატური განმეორების მოთხოვნის პროტოკოლი - HARQ

ნებისმიერი გადაცემისას არსებობს შეცდომების შანსი. რომელიმე სახის შეცდომის არსებობისას იგზავნება HARQ მოთხოვნა საბაზო სადგურსა და მომხმარებლის მოწყობილობას შორის. ეს განმეორებითი გადაცემა მოიცავს: შეტყობინების დეკოდირებას და შეცდომებზე შემოწმებას, მოთხოვნას განმეორებით გადაცემაზე, და მოლოდინს კიდევ რამდენიმე განმეორებით გადაცემაზე. ეს პროცესი გავლენას ახდენს ნებისმიერ უსადენო სისტემაში პაკეტის დაყოვნებაზე და განმეორებით გადაცემას შეუძლია გამოიწვიოს წყვეტები დროში. წარმოების



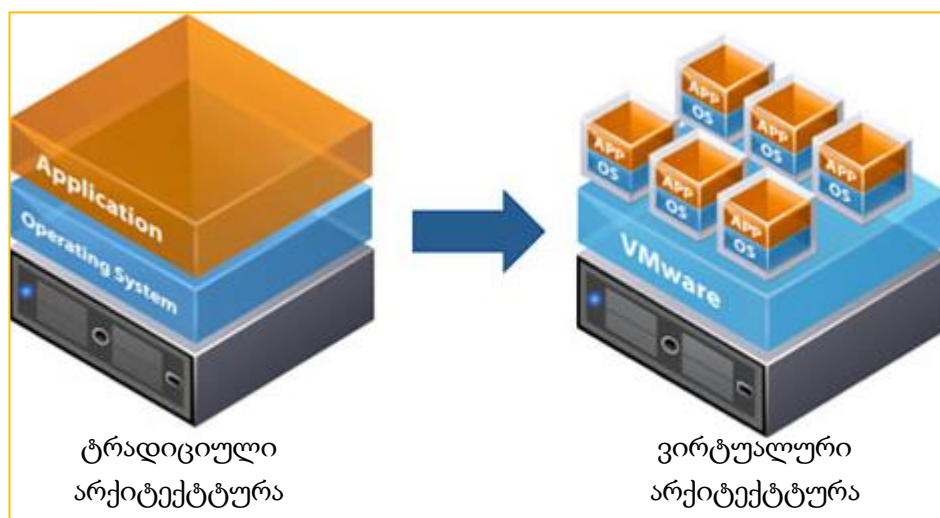
ნახ. 16. ჰიბრიდული ავტომატური განმეორების მოთხოვნის დამუშავება

სტანდარტებზე დაფუძნებული HARQ დამუშავების დაყოვნების დრო არის ოთხი ქვეფრეიმი (ოთხი მილიწამი), რაც იმას გულისხმობს რომ განმეორებითი გადაცემა მოითხოვს შვიდ მილიწამს, შესაძლებლობის დაშვებით რომ იქნება მცირედით მეტი მსგავსი მოთხოვნა. როგორც 5G ქსელშია მოსალოდნელი, თუ არსებობს გადატვირთულობა, მაშინ არის

არხები რომლებშიც ხშირად აქვს ადგილი ამ განმეორებით გადაცემებს, ამგვარად ხელს უწყობს შეყოვნებას ნახ. 16.

4.1.3. ქსელის ფუნქციების ვირტუალიზაცია

ქსელის ფუნქციების ვირტუალიზაცია (Network Function Virtualization - NFV) მომსახურებათა მიმწოდებლებს და ოპერატორებს აძლევს საშუალებას ვირტუალური, პროგრამული დანართების გამოყენებით, მოთხოვნის შესაბამისად, მართონ და გააფართოვონ ქსელის შესაძლებლობები, რომლის არქიტექტურაში ფიზიკური ბლოკები განთავსდნენ ოდესღაც. ეს ამარტივებს დატვირთვის ბალანსირებას, ზრდის, ამცირებს ან გადაანაცვლებს ფუნქციებს განაწილებულ აპარატურულ რესურსებზე.



ნახ. 17. ტრადიციული და ვირტუალური არქიტექტურების შედარება

ვირტუალიზაციის კონცეფციის განვითარებით იცვლება ქსელის შემადგენელი ელემენტების არქიტექტურა. ისინი ერთმანეთთან დაკავშირებულნი ხდებიან არა ოპტიკურ ბოჭკოვანი ან Ethernet კაბელებით არამედ იყენებენ ერთი ფიზიკური პალტფორმის რესურსებს. მაშინ როცა ერთ დროს წარმოდგენაც კი რთული იყო დღეს რეალურია რომ

კომპიუტერის მაუსის რამოდენიმე დაწკაპებით შექმნათ მაგ: მონაცემთა ცენტრი (Data Center). ნახ. 17-ზე ნაჩვენებია ტრადიციული და ვირტუალიზებული არქიტექტურების შედარება.

ზემოთ მოყვანილი ექსპერიმენტის შედეგებიდან ჩანს რომ მომხმარებლის მოწყობილობიდან თავისივე მისამართზე გაგზავნილი პაკეტების დაყოვნების მნიშვნელობა ძირითადად არის 0 მილიწამი, იშვიათ შემთხვევაში 1 მილიწამი და ექსპერიმენტის განმავლობაში შემოწმებული 20'000-მდე პაკეტიდან რამდენიმეჯერ დაფიქსირდა 2 მილიწამი. დაკარგული პაკეტების რაოდენობა კი არის 0.

თავი 5. უსადენო ქსელში დაყოვნების შემცირების

ჰიბრიდულ-ადაპტური ალგორითმი

როგორც მეორე თავში იყო აღწერილი კრიტიკული მანქანათმშობის კომუნიკაციები დამოკიდებულია რამოდენიმე მახასიათებლების გაუმჯობესებაზე. ერთ-ერთ ასეთ მახასიათებელს წარმოადგენს ქსელში გადაცემული პაკეტის დაყოვნება. მის სიდიდეზე გავლენას ახდენს ბევრი ფაქტორი. მნიშვნელოვანი წილი მოდის სიგნალების დამუშავებაზე და მარშრუტის სირთულეზე. დაყოვნების მინიმიზაციის თვალსაზრისით ლოგიკურია, რომ უმჯობესია ყველაზე უმოკლესი და პირდაპირი კავშირი ნაკლები კვანძის გავლით.

პაკეტური კომუტაციის დროს ორობითი სიმბოლოებისგან შემდგარი მცირე პაკეტები, გარდა გადასაცემი სასარგებლო ინფორმაციისა შეიცავს სხვადასხვა დანიშნულების თავსართებს, რომლებიც მოიცავენ პაკეტის ნომერს, პორტის ნომერს, წყაროსა და დანიშნულების ლოგიკურ და ფიზიკურ მისამართებს. ამ მისამართების მიხედვით პაკეტი ქსელში გაივლის მოცემულ მომენტში თავისუფალი მარშრუტით. არსებობს პაკეტური კომუტაციის ორი მიდგომა - ხარისხის და სიჩქარის. თუ მიმღები დაელოდება სხვადასხვა მარშრუტით მოძრავ პაკეტებს და ინფორმაციას აღადგენს უკლებლივ ყველა პაკეტის მიღების შემდეგ, მაშინ ხარისხი იქნება მაღალი, ხოლო თუ მიმღები არ დაელოდება ყველა პაკეტს და ინფორმაციას აღადგენს ნაკლები პაკეტებით ხარისხი გაუარესდება და დაყოვნება შემცირდება. არხების კომუტაციის შემთხვევაში წარმოიქმნება ფიზიკური არხი ორ A და B წერილს შორის. ასეთი მიდგომა ამცირებს ქსელის საერთო რესურსების გამოყენებას ეფექტურობის თვალსაზრისით პაუზების და მონაცემების არარსებობის დროის აუთვისებელი რესურსის გამოყენებლობის გამო. თუმცა დაყოვნების მხრივ სჯობს პაკეტური კომუტაციის მიდგომას და საინტერესოა მისი გამოყენების კვლევა პაკეტის დაყოვნების მიმართ კრიტიკული სერვისებისათვის.

ეს ორი ტექნოლოგია შეიძლება ასე შევადაროთ.

არხების კომუტაცია:

- გამოყოფილი არხი ორ სადგურს შორის;
- არხის შექმნა → ინფორმაციის გადაცემა → არხის დაშლა.

პაკეტური კომუტაცია:

- ინფორმაციის დაყოფა პაკეტების მიმდევრობად;
- თითოეული კვანძი განსაზღვრავს გადაცემის შემდეგ ნაბიჯს თითოეული პაკეტისთვის.

პაკეტური კომუტაციის ალგორითმები ითვალისწინებს პაკეტის დაყოვნების ოპტიმიზაციას და არსებობს არხების კომუტაციის ანალოგიური პაკეტური კომუტაციის მეთოდი, რომელიც მსგავსია არხების კომუტაციის მეთოდისა მხოლოდ არა გამოყოფილი ფიზიკური არხით.

არხების კომუტაციისთვის მთელი შეტყობინების გადაცემის დრო შეიძლება ჩავწეროთ გამოსახულებით:

$$D_{\text{არხ}} = \frac{K}{R} \quad (4.1)$$

სადაც, K არის შეტყობინების სიგრძე ბიტებში, R - ხაზის გადაცემის სიჩქარე ბტ/წმ (უგულვებელყოფილია კავშირის წამოწყების და დასრულების დრო).

პაკეტური კომუტაციისთვის დაყოვნება შეიძლება გამოითვალოს გამოსახულებით:

$$D_{\text{პკ}} = \frac{P}{R} (N + 1) + \frac{K-P}{R} \quad (4.2)$$

სადაც, P არის პაკეტის ზომა, N კავშირის არხში კვანძების რაოდენობა.

მოვიყვანოთ მაგალითი.

- დავუშვათ შეტყობინების სიგრძეა - 10^6 ბიტი;
- გადაცემის სიჩქარე - 50 კბიტი/წმ;
- კვანძები გადაცემის გზაზე $N = 4$;
- პაკეტის ზომა 2000 ბიტი.

არხების კომუტაციისთვის დაყოვნება იქნება:

$$\frac{10^6 \text{ ბტ}}{50 \text{ კბტ/წმ}} = 20 \text{ წმ}$$

პაკეტური კომუტაციის დაყოვნება:

$$\frac{2000\text{ბტ}}{50\text{კბტ/წმ}}(4 + 1) + \frac{10^6 - 2000}{50\text{კბტ/წმ}} = 20,16\text{წმ}$$

ამ კონკრეტული მაგალითისთვის დაყოვნება პაკეტური კომუტაციით 0,16 წმ-ით მეტია. თუმცა კვანძების რიგის ზრდა და პაკეტის ზომის შემცირება მნიშვნელოვნად გაზრდის სხვაობას, მაგ: თუ 4 კვანძის ნაცვლად გვექნება 9 მაშინ სხვაობა იქნება 0,36 წმ.

სტატიაში წარმოვადგენთ ჰიბრიდულ-ადაპტურ ალგორითმს, რაც ეფუძნება არხების და პაკეტური კომუტაციის კომბინირებულ გამოყენებას და პრიორიტეტების განსაზღვრას სერვისის კრიტიკულობიდან გამომდინარე.

ძირითადი არჩევანი კეთდება ეფექტურობასა და დაყოვნებას შორის ქსელის სხვადასხვა უბნებზე. ამისათვის შემოღებულია მიზნობრივი ფუნქცია. ფუნქცია შეიცავს არსებით პარამეტრებს δ_i -ის, რომლის მიმართაც იძებნება ოპტიმალური მნიშვნელობა.

$$\varphi = (\delta_i) - opt \quad (4.3)$$

კონკრეტული შემთხვევისათვის ფუნქცია შეიცავს პარამეტრებს, რომლებსაც აქვთ გავლენა დაყოვნებაზე, მაგ:

$$\varphi = \sum_{i \in L} C_i X_i + \sum P_i(X_i, \dots, X_j) S_k \rightarrow \min \quad (4.4)$$

სადაც S_k – არის დაყოვნება ერთ კილომეტრზე. $P(X_i, X_j)$ L მანძილი ქსელის X_i და X_j კვანძებს შორის; C_i – დაყოვნება i –ურ კვანძზე იმავე L – ქსელში.

სიბრტყეში გრაფის მედიანის პოვნის ალგორითმით შეგვიძლია ადვილად ვიპოვოთ უმოკლესი გზა. დავუშვათ ევკლიდეს სიბრტყეში მოცემულია წერტილები C_1, C_2, \dots, C_n . და მათთვის განსაზღვრული მეტრიკა

$$P(X_i, X_j) = 0, \quad P(X_i, X_j) = P(X_j, X_i) \quad (4.5)$$

$$P(X_i, X_j) \leq P(X_i, Z) + P(Z, X_j)$$

მოცემულ სიბრტყეში ვიპოვოთ ისეთი X_0 წერტილი, რომ

$$\varphi(X_0) = \sum_{k=1}^n P(X_0, X_k) C_k \rightarrow \min \quad (4.6)$$

ამოცანა იხსნება შემდეგი მარტივი ალგორითმით:

ბიჯი 0 - $i = 1$

ბიჯი 1 - X_0 და X_i ვიპოვოთ მონაკვეთი (X_0, X_1) . ამ მონაკვეთზე ვიპოვოთ წერტილი X_0^1 $P(X_0^{i-1}, X_0)$ მანძილზე $C(X_0^{i-1})$ და $C(X_i)$ წონების უკუპროპორციული

$$X_0^{i-1} X_0^1 X_i \quad C(X_i) = 4, \quad C(X_0^{i-1}) = 8 \quad (4.7)$$

X_0^1 წონა ტოლი იქნება $C(X_0^1) = C(X_0^{i-1}) + C(X_i)$

ბიჯი 2 - $i = i + 1$ თუ $i > n$, მაშინ **ბიჯი 3** თუ არა **ბიჯი 1**

ბიჯი 3 - წერტილი X_0^1 ნაპოვნია.

როგორც განხილული ამოცანიდან ჩანს დაყოვნების თვალსაზრისით უფრო ეფექტურია არხების კომუტაციის მეთოდი. [16].

ნახ. 18-ზე მოცემულია ჰიბრიდულ ადაპტური ალგორითმის მუშაობის ლოგიკა ბლოკ სქემის სახით. კავშირის ინიცირებისას გადაცემული პირველი პაკეტის სათაური შეიცავს დანიშნულებისა და წყაროს ლოგიკურ და ფიზიკურ მისამართებს, მისი მეშვეობით ხდება პირველი საუკეთესო არხის ძებნა. როგორც ნახაზიდან ჩანს პირველ რიგში ხდება საუკეთესო მარშრუტის პოვნა არხის მდგომარეობის (გატარების ზოლის) მიხედვით, ხოლო შემდეგ კვანძების რაოდენობის მიხედვით.

მომდევნო ეტაპზე კი ხდება დანიშნულების მოწყობილობამდე არსებული სხვა ალტერნატიული არხების ძებნა და შედეგების შენახვა. პირველი პაკეტი დანიშნულების ადგილას მიაღწევს შედეგად იდენტიფიცირდება განვლილი გზა (მარშრუტი) და არჩეული გზის იდენტიფიკატორი ეგზავნება ყველა კვანძს რომელიც უნდა გაიაროს ყოველმა მომდევნო პაკეტმა. მეორე პაკეტიდან საჭირო აღარ არის წყაროსა და დანიშნულების მისამართების მიმაგრება, რაც კიდევ ერთი საშუალებაა პაკეტის ზომისა და შესაბამისად მისი დაყოვნების შესამცირებლად.

დამყარებული კავშირის არხის პარამეტრების (მაგ. დაყოვნების) გაუარესების ან ავარიული დაშლის შემდეგ ალტერნატიულ არხზე გადართვისათვის შესაძლებელია გამოყენებულ იქნას უკვე არსებული პროტოკოლები (OSPF), რომლებიც გარკვეული პერიოდულობით ამოწმებენ

არხის მდგომარეობას. გადართვის შემდეგ კი ახალი გზის იდენტიფიკატორი უნდა დაეზავნოს კავშირის ტრაქტში მონაწილე ყველა კვანძს.

მომსახურების დაყოვნების კიდევ უფრო მეტად შესამცირების მიზნით შეგვიძლია გამოვიყენოთ პაკეტის სიგრძის დინამიური ცვლილება (შემცირება ან გაზრდა), რომელსაც უნდა ითვალისწინებდეს იგივე ჰიბრიდულ ადაპტური ალგორითმი.

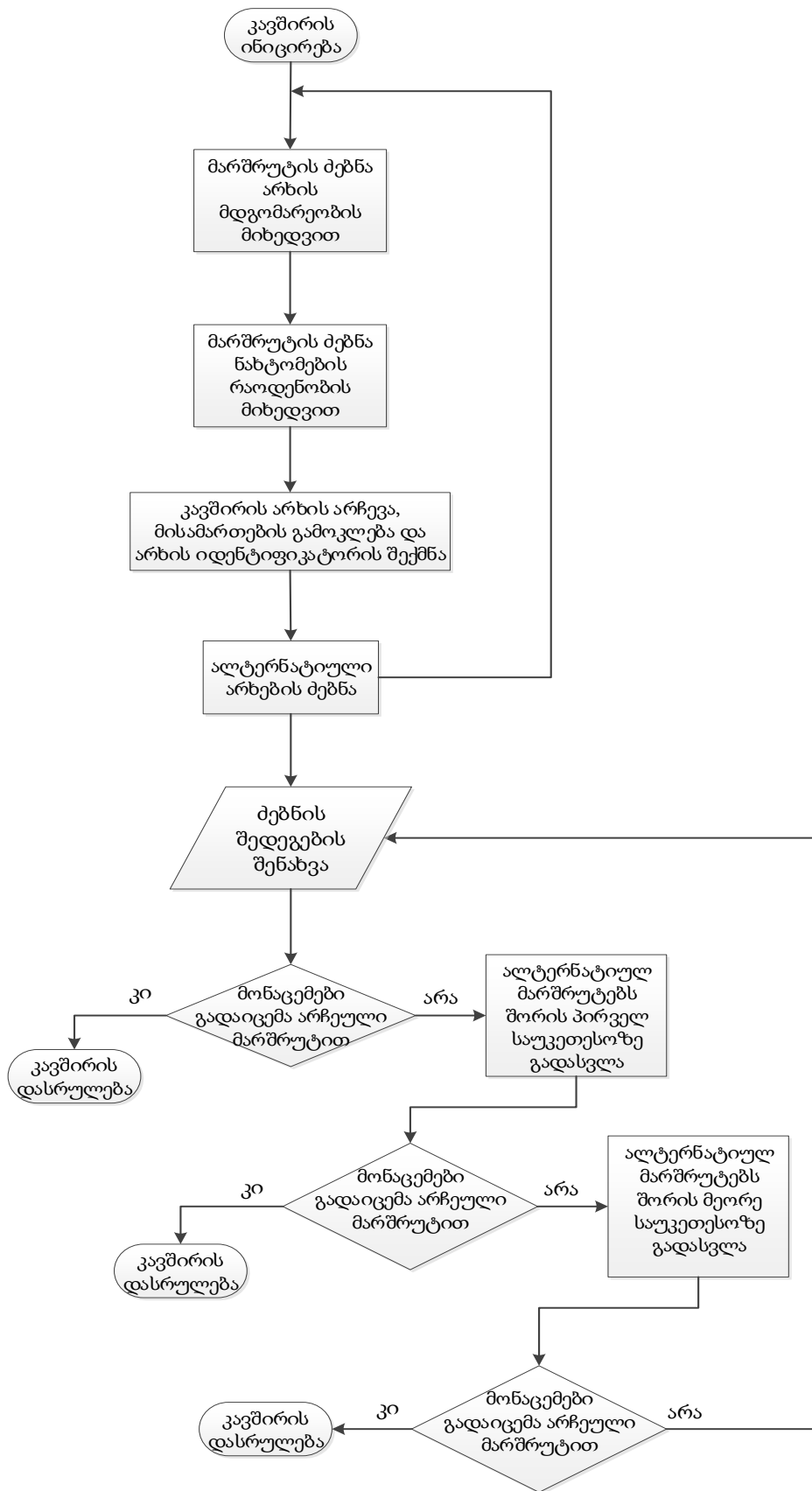
პაკეტის სიგრძის ცვლილების დაყოვნებაზე გავლენის დასადგენად უნივერსიტეტის ლაბორატორიაში ჩატარდა ექსპერიმენტი უსადენო Wi-Fi ქსელზე.

დაკვირვებისთვის გამოყენებულია 12 და 1542 (1542 ბაიტი – Ethernet ქსელის პაკეტის მაქსიმალური სიგრძე) ბაიტი სიგრძის ICMP პროტოკოლით განსაზღვრული 100 პაკეტის გადაცემა ping ბრძანებით. ნახ. 19-ზე მოცემულია ექსპერიმენტის ჩასატარებლად აგებული ქსელის ტოპოლოგია.

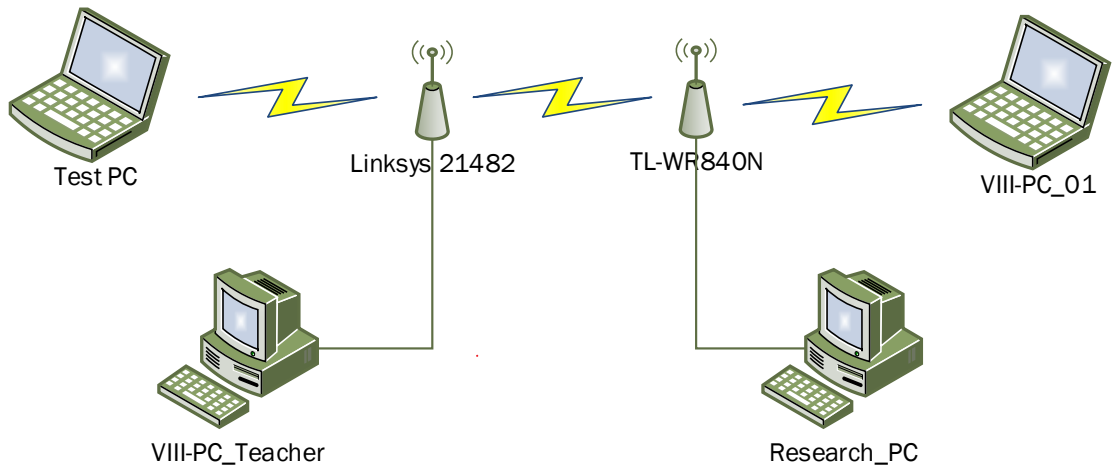
როგორც ნახაზიდან ჩანს გამოყენებულია 2 ქსელური მოწყობილობა Linksys21482 და TL-WR840N და 4 მომხმარებლის მოწყობილობა რომელთაგან 2 დაკავშირებულია სადენით ხოლო დანარჩენი 2 უსადენოდ. Test_PC-დან იგზავნება 100 პაკეტი როგორც კავებზე ასევე ქსელურ მოწყობილობებზე და თავისთავთან, სულ 6 მისამართზე. ასევე ჩანს რომ სატესტო კომპიუტერიდან ყველაზე დაშორებული კვანძებია VIII_PC-01 და Research_PC. VIII_PC-01-მდე გზა შედგება 3 რადიონტერფეისისა და 4 მომხმარებლის მოწყობილობისაგან, Research_PC-მდე კი არის 2 რადიონტერფეისი, 1 საკაბელო შეერთება და ასევე 4 მომხმარებლის მოწყობილობა.

ნახ. 22-ზე მოცემულ გრაფიკზე ნაჩვენებია საშუალო და მინიმალური დაყოვნების შედარება ამ ორი სხვადასხვა სიგრძის პაკეტის გადაცემისას ექვსივე მისამართზე.

გრაფიკიდან ჩანს რომ დაყოვნებაზე მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს როგორც კვანძების რაოდენობა - N , ასევე პაკეტის სიგრძე K .



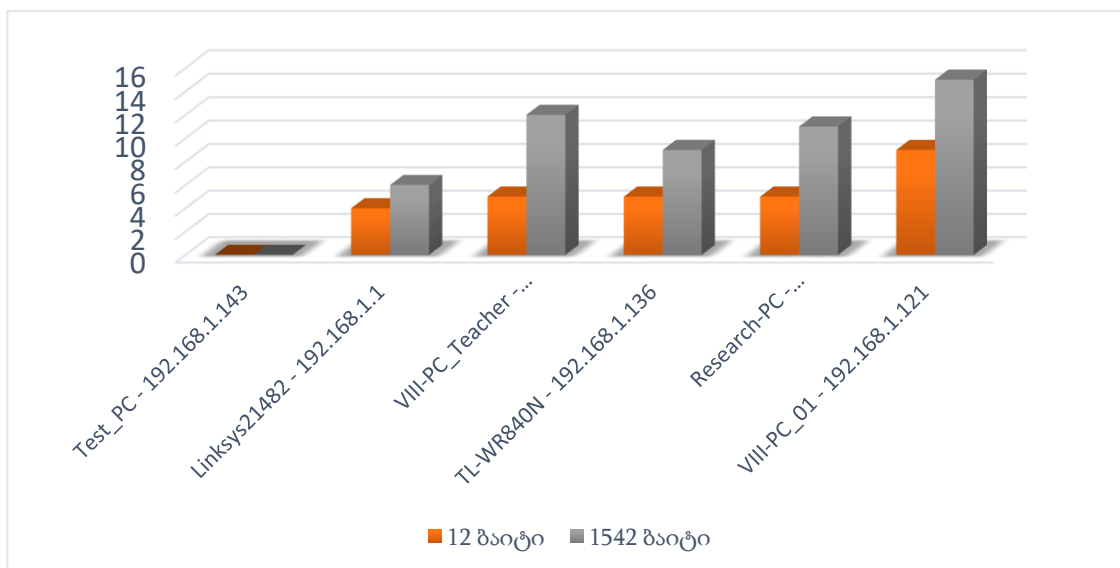
ნახ. 18. ჰირიდულ ადაპტური ალგორითმის ბლოკ სქემა



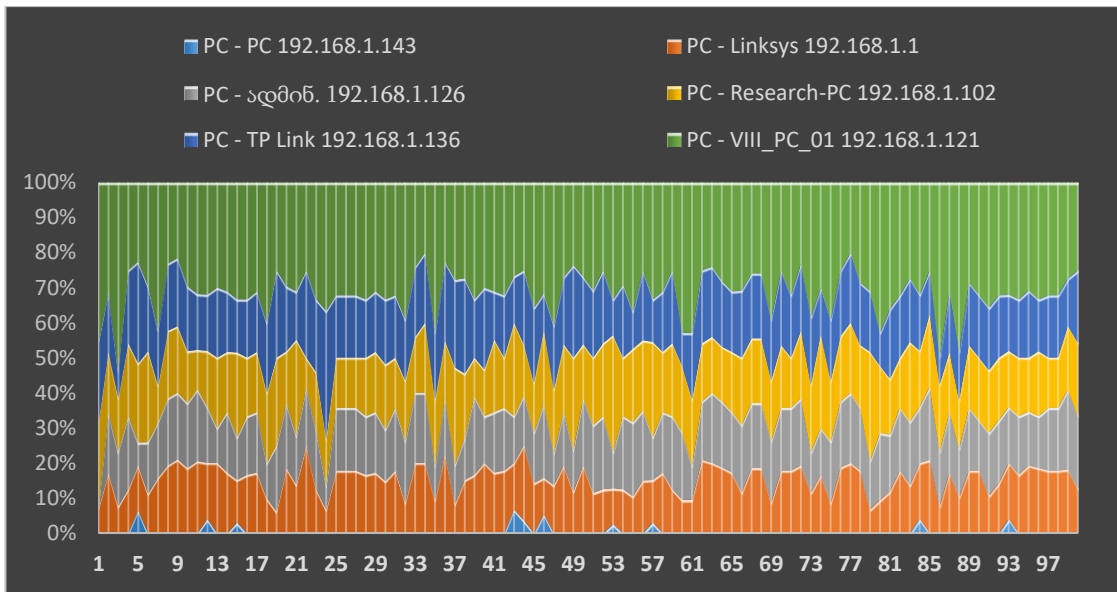
აღნიშვნები		
ქსელის ელემენტები		
აღნიშვნა	რაოდენობა	აღწერა
	2	უსადენო მარშრუტიზატორი
	3	დამაკავშირებელი
	2	კლიენტი კომპიუტერი
	2	ადმინისტრატორი

ნახ. 19. დაკვირვების ჩასატარებლად აგებული ქსელი

დაკვირვებამ აჩვენა რომ კვანძების რაოდენობა გავლენას ახდენს დაყოვნებაზე ნებისმიერი სიგრძის პაკეტისთვის. ქვემოთ მოცემულ ნახ. 21-ზე ნაჩვენებია ნახტომების (Hops) გავლენა პაკეტის დაყოვნებაზე.



ნახ. 20. დაყოვნების საშუალო მნიშვნელობა



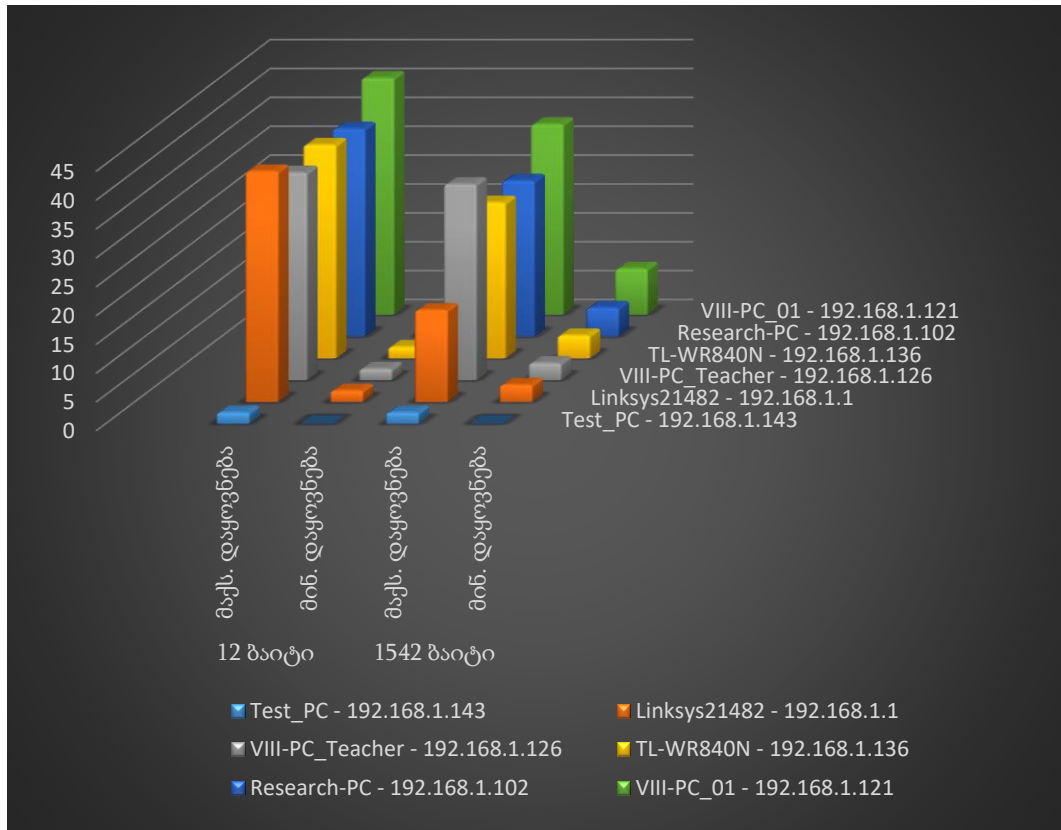
ნახ. 21. კვანძების რაოდენობის (ნახტომების - Hops) გავლენა დაყოფნებაზე

ექსპერიმენტის შედეგებმა ასევე გვიჩვენა რომ ძალიან დიდია სხვაობა დაყოფნების მინიმალურ და მაქსიმალურ მნიშვნელობებს შორის, მაგ. Linksys21482-თან გაგზავნილი 12 ბაიტისანი პაკეტებისთვის მინიმალური დრო იყო 2 მლწმ, ხოლო მაქსიმალური 40 მლწმ, მინიმალური და მაქსიმალური დაყოფნების შედარება ნაჩვენებია ნახ. 4-ზე. ეს საჭიროებს დამატებით კვლევას რათა შემუშავდეს ისეთი მეთოდი რომელიც აგვარიდებს არასასურველ შედეგებს.

დანართ 1-ში დაკვირვების ჩასატარებლად აგებულ ქსელში გადაცემული სატესტო მონაცემების დაყოფნებისთან ერთად მოცემულია წარმატებულად დაბრუნებული და დაკარგული პაკეტების რაოდენობების 12 და 1542 ბაიტი ზომის პაკეტებისთვის.

ჩატარებული თეორიული და ექსპერიმენტული კვლევებიდან ცხადად ჩანს რომ დაყოფნების შემცირების მიზნით ეფექტური იქნება ისეთი ჰიბრიდულ-ადაპტური ალგორითმი რომელიც უზრუნველყოფს საუკეთესო გზის არჩევას (ყველაზე მაღალსიჩქარიანი არხი მინიმალური რაოდენობის კვანძებით) და პაკეტური კომუტაციის ნაცვლად კავშირის დამყარებას როგორც კომუტირებადი არხით.

იმავე ალგორითმით უნდა მოხდეს პაკეტების ოპტიმალური სიგრძის განსაზღვრა დინამიური ცვლილებით, რომელიმე ტექნოლოგიისთვის განკუთვნილი სტანდარტული სიგრძის პაკეტების გამოყენების ნაცვლად.



ნახ. 22. საშუალო და მინიმალური დაყოვნების შედარება

ვირტუალური არხებით კომუტაციის უარყოფითი მხარეა ნაკლები დაცულობა. დაყოვნების მიღებული მინიმალური მნიშვნელობის შენარჩუნების მიზნით არ ხდება ქსელში მონაცემების დაცვის რთული მექანიზმების გამოყენება, ასევე სიგნალები გადაიცემიან მხოლოდ რომელიმე ერთი არჩეული მარშრუტით, ეს ორი მხარე შეიძლება ჩავთვალოთ ჰიბრიდულ-ადაპტური ალგორითმის ნაკლოვანებად.

თავი 6. დაყოვნების გაზომვის მეთოდი ბოლოდან-ბოლომდე (End-to-End) მომხმარებლებს შორის

ყოველი ახალი მომსახურებისთვის ქსელს წაეყენება მოთხოვნები რომლებსაც ის უნდა აკმაყოფილებდეს. კრიტიკული მანქანათმშობის კომუნიკაციის (MTC) მაგალითად კვლევაში მოყვანილია ავტოპილოტი და ქსელთან მიერთებული მოძრავი ავტომობილები, რომლისთვისაც ერთ-ერთი აუცილებელი პარამეტრია პაკეტის დაყოვნება 1 მილიწამამდე.

იმისათვის რომ შესაძლებელი გახდეს მომსახურებების მენეჯმენტი და ხარისხის კონტროლი, მომსახურებებით სარგებლობა და მათი ნდობა, აუცილებელია შესაძლებელი იყოს პაკეტის დაყოვნების გაზომვა. ბოლოდან-ბოლომდე პაკეტის დაყოვნების სისდიდის შესაფასებლად შემუშავდა გაზომვის მეთოდი და ჩატარდა შესაბამისი ექსპერიმენტი.

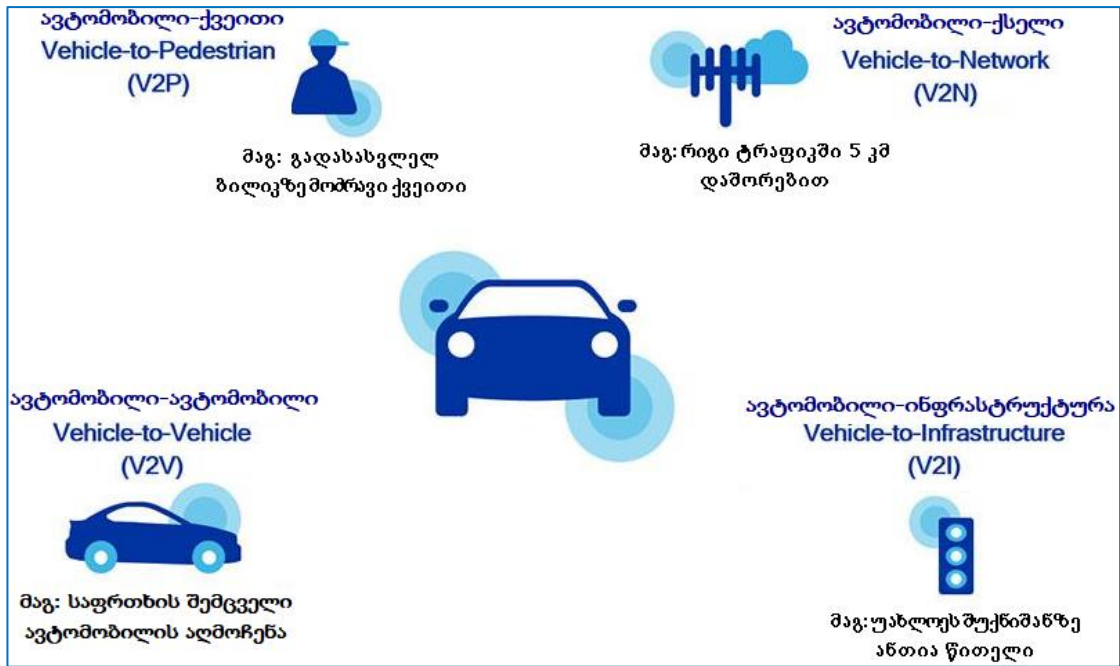
დაყოვნების გაზომვა ბოლოდან-ბოლომდე - E2E არის დამხმარე იდეა რომელიც გამოიყენება ძირითადი იდეის შედეგების მონიტორინგისთვის.

6.1. ექსპერიმენტის მიზანი და ამოცანა

5G ქსელის პირობებში ავტომობილებისთვის მოიაზრება კომუნიკაციის მრავალი შესაძლებლობა, რამდენიმე მაგალითი ნაჩვენებია ნახ. 23-ზე.

კვლევაში ჩატარებული ექსპერიმენტის მიზნები ჩამოყალიბდა შემდეგნაირად:

1. პაკეტის დაყოვნების განსაზღვრის ისეთი მეთოდის შემუშავება რომელიც უნივერსალური იქნება ყველა თაობის მობილური ქსელისთვის;
2. მიღებული შედეგების გამოცდა საქართველოში უკვე არსებულ მობილურ ქსელებზე - 2G, 3G, 4G;



ნახ. 23. ავტომობილის კომუნიკაციის მაგალითები 5G ქსელში

ასევე შესაძლებელი გახდება ინფორმაციის დამუშავების იმ მეთოდების ეფექტურობაზე დაკვირვება, რომლებიც დანერგილია ამა თუ იმ მობილურ ტექნოლოგიაში.

ექსპერიმენტის ამოცანაა ტექნიკური დეტალებისა და დიზაინის შემუშავება, რაც მოგვცემს დასახული მიზნის მიღწევის საშუალებას. დღეისათვის უკვე არსებობს დაყოვნების გაზომვის ისეთი სერვისები როგორცაა ძალიან პოპულარული ვებ აპლიკაციები, რომელთა მეშვეობითაც შესაძლებელია ჯიტერისა და სიჩქარის გაზომვა მაგ.: ერთ-ერთი ასეთია <https://sheamotsme.ge>. ამ აპლიკაციის გრაფიკული ინტერფეისი გაზომვის პროცესში ნაჩვენებია ნახ. 24-ზე. სხვა მსგავსი აპლიკაციების (www.speedtest.net), გამოყენებით მიღებული შედეგების დამახსოვრება და ანალიზი შესაძლებელია .csv (Comma Separated Values) ფაილის სახით, ნიმუში ნაჩვენებია ცხრ.6-ში [3, 17].

წარმოდგენილ ნიმუშებში ნაჩვენები შედეგები ასახავს ქსელის პარამეტრების გაზომვის შედეგებს მხოლოდ მომხმარებლიდან რომელიმე სერვერამდე, მაგ. ინტერნეტ მომსახურებათა მიმწოდებლის სერვერამდე.

ცხრილი 6. speedtest.net-დან ჩამოტვირთული გაზომვის შედეგები

IP ADDRESS	TEST DATE	TIME ZONE	DOWNLOAD MEGABITS	UPLOAD MEGABITS	LATENCY MS	SERVER NAME
93.177.162.23	5/29/2019 4:03 AM	GMT	29.11	28.47	1	Tbilisi

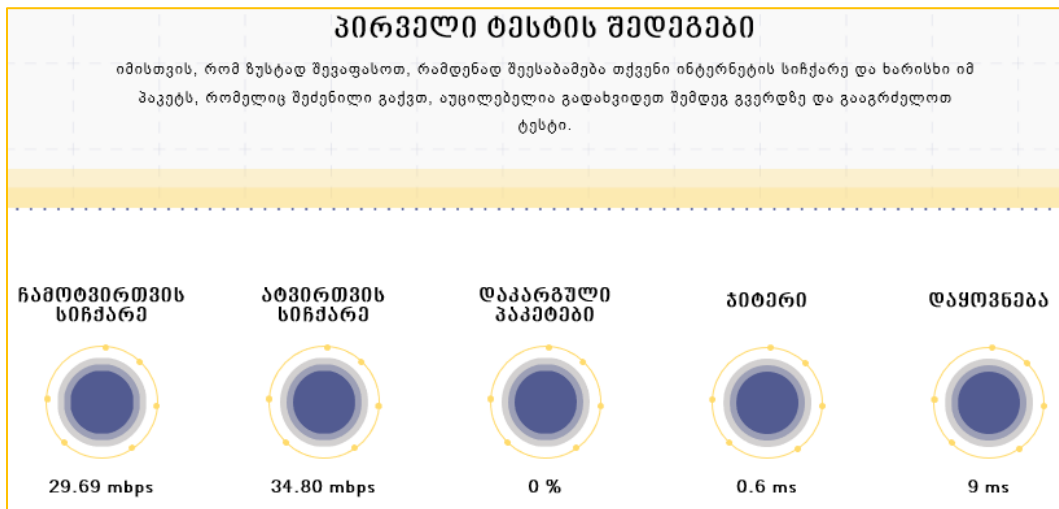
მაგრამ ჩვენი ინტერესია დაყოვნების გაზომვა საბოლოო მომხმარებლის მოწყობილობებს შორის - ბოლოდან-ბოლომდე (E2E).

სწორედ ეს გახდა ჩვენთვის ერთ-ერთი გამოწვევა და შთაგონების წყარო რათა მოგვეფიქრებინა და შეგვექმნა პაკეტის დაყოვნების განსაზღვრის რაიმე გზა.



ნახ. 24. www.speedtest.net-ის გრაფიკული ინტერფეისი გაზომვის პროცესში

ამ მიზნით გაიმართა კონსულტაციები საქართველოში პრაქტიკული გამოცდილების მქონე მაღალი კვალიფიკაციის ინჟინრებთან, დარგის მოქმედ სპეციალისტებთან და უნივერსიტეტის პროფესორ მასწავლებლებთან.

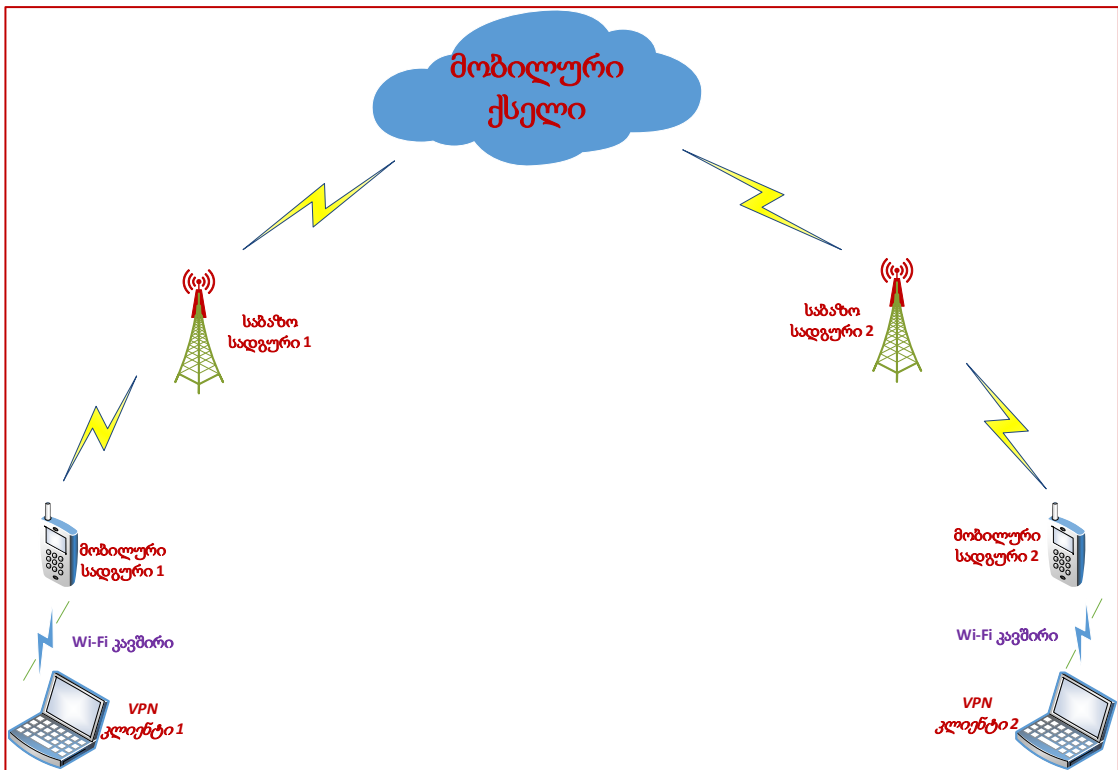


ნახ. 25. დაყოვნებისა და სხვა პარამეტრების გაზომვის შედეგები

6.2. ექსპერიმენტისთვის არჩეული კავშირის სქემა

მობილურ სადგურებს შორის ექო მოთხოვნის პაკეტების დაგზავნის უზრუნველსაყოფად განხილული იყო სხვადასხვა მეთოდები. საბოლოოდ მივედით იმ დასკვნამდე რომ ასეთი ექსპერიმენტის ჩასატარებლად, ფინანსურად ყველაზე დაბალბიუჯეტისანი, განხორციელების თვალსაზრისით ყველაზე მარტივი და მოხერხებული გზა არის ე. წ. VPN (Virtual Private Network) ტექნოლოგიის გამოყენება. შედეგად შემუშავდა ქსელის დიზაინი, რომლის მიხედვითაც VPN კლიენტების ერთმანეთთან დასაკავშირებლად გამოყენებულია მობილურ ქსელი. ქსელის დიზაინი ნაჩვენებია ნახ. 26-ზე.

VPN (Virtual Private Network - ვირტუალური კერძო ქსელი) ტექნოლოგიის მეშვეობით იქმნება დამიფრული ვირტუალური არხები, რომელიც საშუალებას გვაძლევს სხვადასხვა დაშორებულ ქსელებზე (სხვადასხვა ტექნოლოგიით აგებული მობილური თუ ფიქსირებული ქსლებიდან) მიერთებული კვანძები (Hosts) დავაკავშიროთ ერთმანეთს უსაფრთხოდ, როგორც კერძო (ლოკალურ - LAN) ქსელში ჩართული მომხმარებლის მოწყობილობები.



ნახ. 26. VPN კლიენტების ერთმანეთთან კავშირის სქემა, მობილური ქსელის გამოყენებით

VPN ქსელის შესაქმნელად გამოყენებულია Cisco-ს მიერ შექმნილი პროტოკოლი - GRE (Generic Routing Encapsulation - საერთო მარშრუტიზაციის ენკაპსულაცია), რომელსაც შეუძლია სხვადასხვა ტიპის ქსელური პროტოკოლის პაკეტის ინკაფსულაცია IP გვირაბში. ეს ქმნის მარშრუტიზატორების დაშორებული წერტილების ერთმანეთთან ვირტუალურ შეერთებას IP ქსელებს შორის.

ვირტუალური ქსელების ინტეგრაციისათვის აუცილებელია VPN გასასვლელის (Gateway) შექმნა. VPN გასასვლელის ფუნქცია შეიძლება შეასრულოს ადაპტირებული უსაფრთხოების მოწყობილობამ (Adaptive Security Appliance - ASA) ფაიერვოლმა ან მარშრუტიზატორმა. ადაპტირებული უსაფრთხოების მოწყობილობა თავის პროგრამულ უზრუნველყოფაში აერთიანებს ფაიერვოლის, შეტევებისგან დაცვის და VPN კომპუტატორის ფუნქციებს.

ექსპერიმენტისთვის შესაძლებელია ორი ტიპის VPN ქსელის გამოყენება:

- კვანძთაშორისი;
- დაშორებული წვდომის.

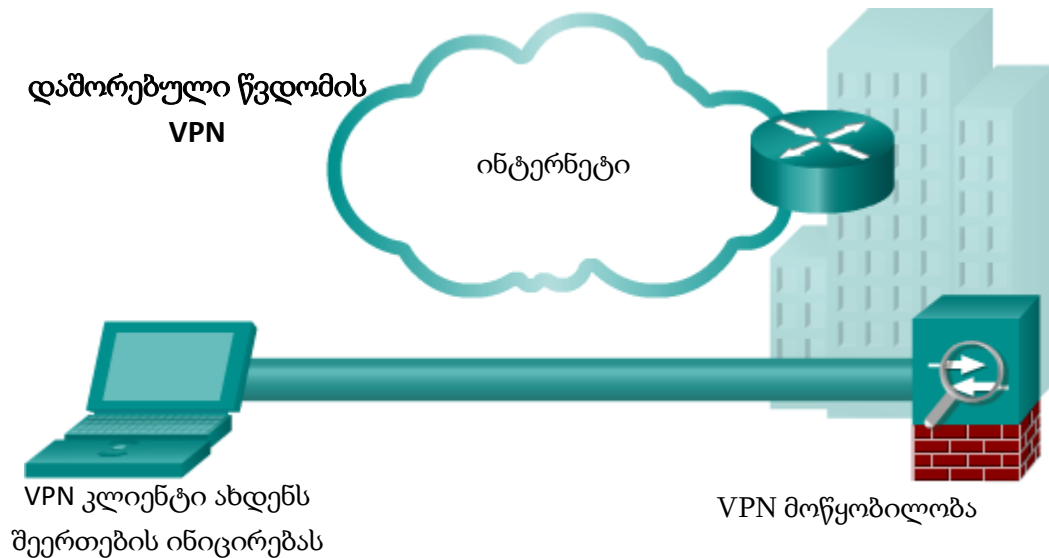
ჩვენს შემთხვევაში გამოყენებულია მეორე ტიპი - დაშორებული წვდომის VPN ქსელი.

დაშორებული წვდომის ვირტუალური ქსელი მხარს უჭერს ბიზნეს-მომხმარებლის, გარე ქსელების და მობილური კავშირის ქსელების მომხმარებლების ტრაფიკს, მაშინ როცა კვანძთაშორისის დანიშნულებაა მთელი ქსელების დაკავშირება. დაშორებული წვდომის ვირტუალური დაცული ქსელი მაშინ იქმნება, როდესაც ასეთი შეერთების კონფიგურაცია არ არის სტატიკურად დაყენებული, მაგრამ სანაცვლოდ გვაძლევს მისი ჩართვა და გამორთვის შესაძლებლობას და ინფორმაციის დინამიურად ცვლილების საშუალებას. დაშორებული წვდომის VPN უზრუნველყოფილია კლიენტ/სერვერული არქიტექტურით, სადაც კლიენტი (დაშორებული ტერმინალი) იღებს წვდომას კომპანიის ქსელთან სერვერ მოწყობილობის მეშვეობით.

დაშორებული წვდომის VPN გამოიყენება მომხმარებლის მოწყობილობების უსაფრთხო წვდომით დასაკავშირებლად, რომელიმე ორგანიზაციის ქსელთან გლობალური ქსელის გავლით. საბოლოო ტერმინალების ინტერნეტთან მიერთება როგორც წესი შეიძლება იყოს: მობილური (UMTS, LTE) ან ფიქსირებული (GPON, DSL) ქსელიდან, სადენიანი ან უსადენო. VPN კლიენტისა და სერვერის კავსირის გამარტივებული სქემა ნაჩვენებია ნახ. 27-ზე.

მობილური ქსელის მომხმარებლების საბოლოო ტერმინალებისთვის როგორც წესი ყველაზე ფართოდ გავრცელებულ Android და IOS ოპერაციულ სისტემებს ინტეგრირებული აქვთ პროგრამული უზრუნველყოფა, რომლითაც შესაძლებელია მათი როგორც კლიენტის მიერთება VPN ქსელთან. ან შესაძლება მათ დასსაჭირდეთ სპეციალური კლიენტ აპლიკაციის დაყენება; როცა მომხმარებელი VPN ქსელთან მიერთებული ტერმინალით ეცდება მონაცემების გადაცემას, ასეთი

(სპეციალური VPN კლიენტი) აპლიკაცია დაშიფრავს და მოახდენს ამ ტრაფიკის ენკაპსულაციას. შემდეგ მონაცემები ინტერნეტის მეშვეობით გადაიცემა მიმღების ქსელის მხარეს ვირტუალური დაცული ქსელის გასასვლელისკენ.



ნახ. 27. დაშორებული წვდომის VPN ქსელი

6.3. ფაქტორები რომლებიც გავლენას ახდენენ დაკვირვების შედეგებზე

ექსპერიმენტის ბოლო ეტაპზე გადასვლამდე შესწავლილია ფაქტორები, რომლებიც ახდენენ ან/და შესაძლოა მოახდინონ გავლენა დაყოვნების სიდიდეზე. ეს საჭიროა გაზომვის საბოლოო შედეგებში ცდომილებების გასათვალისწინებლად.

მობილური ქსელის შემთხვევაში გავლენა შეიძლება მოახდინოს რამდენიმე ფაქტორმა:

1. ჰენდოვერი მაღალი სიჩქარით გადაადგილების დროს - მაღალი სიჩქარით გადაადგილებისას ჰენდოვერის სიხშირე იზრდება, შესაბამისად შესაძლოა ადგილი ქონდეს შეცდომების რაოდენობის მატებას;

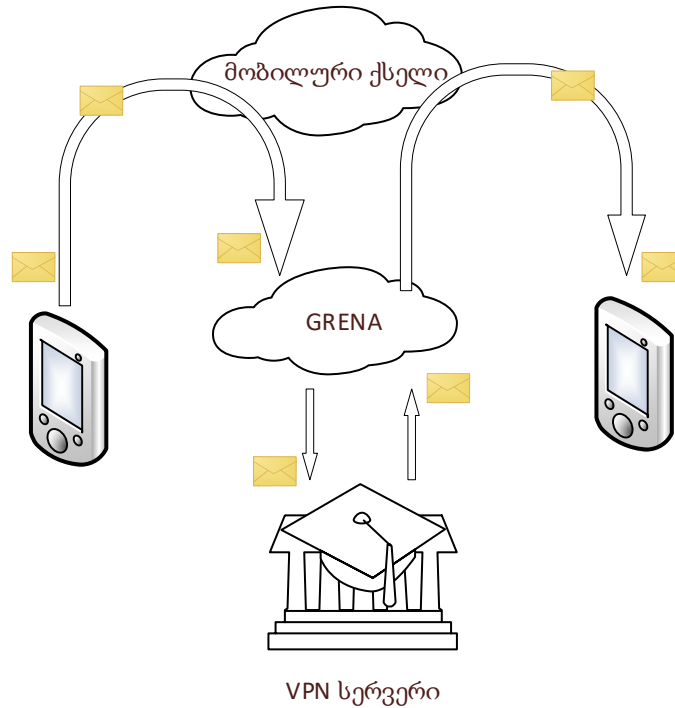
2. ქსელის დატვირთვა - უდიდესი დატვირთვის საათში იზრდება მოთხოვნა ქსელის რესურსებზე, რაც აისახება სხვადასხვა პარამეტრებზე და მათ შორის დაყოვნებაზეც;
3. ხმაური (ხელშემღებები) - ქსელში მისი არსებობა მრავალი მიზეზით შეიძლება იყოს გამოწვეული, რაც ასევე ახდენს გავლენას დაყოვნებაზე;
4. ქსელის ის მონაკვეთი რომელსაც გადის პაკეტი ექსპერიმენტის პროცედურების შესრულების დროს VPN ტექნოლოგიის გამოყენების გამო ნახ. 28.

- a. ექსპერიმენტის ჩატარების არჩეული არქიტექტურაში გამოყენებული VPN ქსელის მოქმედების პრინციპი გულისხმობს მონაცემების შიფრაციას მათი ხელყოფისაგან დაცვის მიზნით, რაც იწვევს მონაცემთა სიჭარბეს;
- b. როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული VPN კლიენტები განსაზღვრულია ტექნიკური უნივერსიტეტის სერვერზე, მისთვის კი ინტერნეტ მომსახურებათა მიწოდებას უზრუნველყოფს საქართველოს სამეცნიერო-საგანმანათლებლო კომპიუტერული ქსელების ასოციაცია - „გრენა“ (GRENA – Georgian Research and Educational Networking Association). ეს იმას ნიშნავს რომ VPN კლიენტებს შორის დაგზავნილი პაკეტები გარდა მობილური ქსელისა გაივლიან იმ ქსელის ინფრასტრუქტურას რომელშიც არის განსაზღვრული VPN სერვისი. [21]
- c. არჩეული ქსელის დიზაინით გამოწვეული კიდევ ერთი ფაქტორია - ორი ნახტომის (Hop) დამატება მობილურ მოწყობილობასა და VPN კლიენტს შორის, რაც გავლენას ახდენს დაყოვნების განსაზღვრის სიზუსტეზე;

შედეგების სწორი ანალიზისთვის განხილული და შესწავლილია ყველა ზემოთ აღნიშნული ფაქტორი ცალკ-ცალკე. ასევე წინასწარ არის

დაზუსტებული თუ რამდენი მილიწამით უნდა დაკორექტირდეს საბოლოო შედეგები.

ექსპერიმენტისთვის გამოყენებული ვებ რესურსები მოცემულია დანართ 6-ში.



ნახ. 28. ქსელის ნაწილები, რომლებსაც გაივლიან პაკეტები მობილური ქსელის გარდა

6.4. ექსპერიმენტის დაგეგმვა და მიღებული შედეგები

შედეგების მრავალფეროვნებისა და უფრო მაღალი სიზუსტის მონაცემების მისაღებად დაიგეგმა ექსპერიმენტის ჩატარების რამდენიმე სცენარი, (შესრულდა მხოლოდ ერთი - ფიქსირებული, აუცილებელი რესურსების არარსებობის გამო).

დაკვირვების ჩატარების ვარიანტები დაიყო სამი ძირითადი ნიშნის მიხედვით:

1. მობილური ტერმინალის ადგილმდებარეობისა და გადაადგილების სიჩქარის მიხედვით;

2. მობილური ოპერატორის ქსელთან მიერთების მიხედვით (გულისხმობს ერთიდაიმავე მობილური ოპერატორის ქსელთან მიერთება ან/და სხვადასხვა მობილური ოპერატორის ქსელთან მიერთება);

3. მობილური ქსელის ტექნოლოგიის მიხედვით.

მობილურობის ფაქტორზე დაკვირვების მიზნით (ჰენდოვერის გავლენა) **გადაადგილების მიხედვით** ექსპერიმენტი დაიყო სამ ნაწილად:

1. ორივე მობილური მოწყობილობის ფიქსირებულ მდგომარეობაში (გადაადგილების გარეშე);
2. ერთი მობილური მოწყობილობის გადაადგილება, ხოლო მეორე ფიქსირებულ მდგომარეობაში;
3. ორივე მობილური მოწყობილობის გადაადგილებისას.

ფიჭების გადართვის გავლენის დასადგენად ექსპერიმენტი დაიგეგმა რუსთავის ავტოდრომზე, გადაადგილების სხვადასხვა სიჩქარის გამოყენებით.

მობილური ოპერატორის ქსელთან მიერთების მიხედვით დაკვირვებისთვის გამოყენებულია „მაგთიკომის“ და „ჯეოსელის“ სიმ ბარათები. ტესტი ამ შემთხვევაშიც დაიყო სამ ვარიანტად:

1. ჯეოსელის ნომრიდან - ჯეოსელის ნომერზე;
2. ჯეოსელიდან - მაგთიკომზე;
3. მაგთიკომიდან - მაგთიკომზე.

სხვადასხვა ოპერატორის ქსლების გამოყენების მიზანია დავაკვირდეთ თუ რა გავლენას ახდენს პაკეტის დაყოვნებაზე სატრანსპორტო ქსელები (Transport Networks), ძირითადი ქსელები (Core Networks) და მათში შემავალი კვანძები: სასაზღვრო კარიბჭეები (Border Gateways), „ფაიერვოლები“ (Firewalls) და ასევე ნახტომების (Hops) რაოდენობა მარშრუტიზატორებს შორის.

ექსპერიმენტში სხვადასხვა ტექნოლოგიის (GSM, UMTS/WCDMA/HSDPA, LTE/VoLTE) მობილურ ქსელებთან მიერთების

მიზანია პაკეტის დაყოვნების შემცირების ტენდენციის შესწავლა და სიგნალების დამუშავება - გადაცემის იმ მეთოდების ეფექტურობაზე დაკვირვება, რომლებიც გამოყენებულია ამა თუ იმ ტექნოლოგიაში. სხვადასხვა ტექნოლოგიების ქსელთან მიერთების მიხედვით მივიღეთ ექსპერიმენტის შემდეგი ვარიანტები:

1. 2G – 2G;
2. 2G – 3G;
3. 2G – 4G;
4. 3G – 3G;
5. 3G – 4G;
6. 4G – 4G.

უფრო ღრმა ანალიზისა და მაღალი სტატისტიკური სანდოობის შედეგების მიღების მიზნით სასურველია ექსპერიმენტის ყველა ვარიანტის მონაცემების აღება სამივე ძირითადი სცენარისთვის. მაგ: ფიქსირებულ მდგომარეობაში VPN კლიენტებს შორის ექვო პაკეტების დაგზავნა მოხდეს ორივე მობილური ოპერატორის ყველა თაობის ქსელის გამოყენებით. ცდების ვარიანტების ჯამური რაოდენობაა:

$$E = N_L \times N_{MNP} \times N_T = 3 \times 3 \times 6 = 54$$

სადაც E ექსპერიმენტების ჯამური რაოდენობაა, $N_L = 3$ - მდებარეობის ვარიანტებია, $N_{MNP} = 3$ - მობილური ოპერატორების ვარიანტები, ხოლო $N_T = 6$ მობილური ტექნოლოგიების ვარიანტები.

დანართ 6-ში ბლოკ სქემის სახით არის მოცემული მომხმარებლის მოწყობილობებს შორის - ბოლოდან-ბოლომდე (E2E) დაყოვნების გაზომვის ყველა შესაძლო ვარიანტი. აქვეა ნაჩვენები ყველა ის ვებ რესურსი რომელიც იქნა გამოყენებული ექსპერიმენტის შესრულების დროს.

არჩეული მეთოდით (VPN-ის გამოყენებით) პაკეტის გადაცემის დროის განსაზღვრისათვის აუცილებელი იყო VPN სერვერისა და კლიენტების შექმნა, რაც აღმოჩნდა ყველაზე რთულად შესასრულებელი ტექნიკური ამოცანა, რაშიც დაგვეხმარა ტექნიკური უნივერსიტეტის

ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტი. ნახ. 29-ზე მოცემულია იმ VPN კლიენტის მონაცემები, რომელიც გამოყენებული იყო ექსპერიმენტის დროს.

Connection properties	
Connection name	GTU-RVPN
Server name or address	rvpn2.gtu.ge
Type of sign-in info	User name and password
User name (optional)	ppp-tempuser1
Password (optional)	*****

ნახ. 29. ექსპერიმენტის დროს გამოყენებული VPN კლიენტის მონაცემები

შემდეგ ეტაპზე მოხდა სატესტო მონაცემების გადაცემა VPN კლიენტებს შორის. ცდა ჩატარდა 3-ჯერ, სამივე შემთხვევასი გადაიკა 4 სატესტო პაკეტი სულ 12. ექსპერიმენტი ჩატარდა დღის 2 საათიდან 3 საათამდე შუალედში, რაც იმას ნიშნავს რომ ქსელები არ იყო გადატვირთული. ცდების შედეგად დადგინდა რომ მობილურ ტერმინალებს შორის საშუალო დაყოვნება მესამე თაობის ქსელში არის 550 მილიწამი. ამასთან უნდა გავითვალისწინოთ რომ მოწყობილობები მიერთებული იყო სხვადასხვა ოპერატორის ქსელთან.

ექსპერიმენტის ჩასატარებლად საჭირო მატერიალურ ტექნიკური საშუალებების სრული ჩამონათვალი და მათი მოკლე დახასიათება იხილეთ ცხრილი 7-ში.

დაკვირვება ჩატარდა ტექნიკური უნივერსიტეტის მერვე კორპუსის მობილური ქსელების ლაბორატორიაში. სატესტო მონაცემები გადაიკა მობილურ ტერმინალებზე რომლებიც არ გადაადგილდებოდნენ, შესაბამისად არ ხდებოდა მათი გადართვა სხვადასხვა ფიჭებზე. პირველ

რიგში სხვადასხვა ვებ რესურსებისა და ოპერაციულ სისტემა ვინდოუსში ინტეგრირებული პროგრამული საშუალებების გამოყენებით დადგენილ იქნა ქსელის საზღვრები თუ სად იწყება პაკეტის გადაადგილების მთელ გზაზე. შედეგად მივიღეთ ორი კვანძის IP მისამართი. ტექნიკური უნივერსიტეტის პროვაიდერის (GRENA) მისამართი - 217.147.237.NN და VPN სერვერის მისამართი 109.205.46.186.

ცხრილი 7. ექსპერიმენტის ჩასატარებლად მოთხოვნილი რესურსები

მობილურ ქსელთან მიერთების საშუალებები			
მოწყობილობის სდასახელება	ოპერაციული სისტემა	მობ. ქსელის ოპერატორი	ქსელების მხარდაჭერა
მობილური ტელეფონი	ანდროიდი/IOS		2G, 3G, 4G
მობილური ტელეფონი	ანდროიდი/IOS		2G, 3G, 4G
სიმბარათი		მაგთიკომი	
სიმბარათი	სიმბარათი	ჯეოსელი	

VPN კლიენტები		
მოწყობილობის სდასახელება	ოპერაციული სისტემა	ქსელების მხარდაჭერა
პორტატული კომპიუტერი	Windows 10	Wi-Fi – 2,4 გჰც
სტაციონალური კომპიუტერი	Windows 7	Wi-Fi – 2,4 გჰც

სამომავლო კვლევითი მიმართულება

სატელეკომუნიკაციო მობილური ქსელის კომერციული ტრაფიკის უდიდესი ნაწილს სამომავლოდ დაიკავებს მანქანათშორის კომუნიკაციების მონაცემები, რომელიც მოითხოვს ახალ პრობლემების გადაჭრის ახალ გზებს. შესაბამისად, ავტორი ამხვილებს ყურადღებას და ამავე დროს, აგრძელებს მუშაობას ე.წ. მონაცემთა დაყოვნების დროის მინიმიზაციის ალგორითმებისა და ტექნოლოგიური გადაწყვეტების კვლევის მიმართულებით, რომლებიც გაითვალისწინებენ არა მარტო რადიო არხის პირობებს, არამედ M2M ნაკადების მახასიათებლებს და ამავდროულად, მობილური სადგურის მიმღების ბუფერის ხანგრძლივობის დონეს და გამოთვლით სიმძლავრეებს.

დასკვნა

1. წინამდებარე დისერტაციაში განხილულია მეხუთე თაობის მობილური კავშირის ფიჭურ ქსელებში მანქანათშორისი კომუნიკაციისათვის აუცილებელი ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი პირობის - გადაცემულ მონაცემთა დაყოვნების 1 მილიწამზე ნაკლები მნიშვნელობის უზრუნველყოფის მექანიზმები. ავტორი გაეცნო დაგროვილ გამოცდილებას და გამოწვევებს დღემდე არსებულ ტექნოლოგიებში.

2. აღწერილია მომსახურების სახეები რომელთა რეალიზაცია მოითხოვს დაყოვნებას 1 მილიწამამდე. მოყვანილია მაგალითები და ერთი კონკრეტული მომსახურებისთვის - ავტოპილოტი/დაკავშირებული ავტომობილები, გაანალიზებულია თუ კონკრეტულად რატომ უნდა იყოს დაყოვნება 1 მილიწამზე ნაკლები;

3. შესწავლილია დაყოვნების შესამცირებლად შექმნილი უკვე არსებული მექანიზმები: მობილური კავშირის რადიოარხები მრავალსხივიანი გავრცელებით, სიგნალის ასლების სიმძლავრეების განაწილება მიმდებში, მობილური ფიჭური კავშირის MIMO სისტემები, არქიტექტურული მიდგომები, პროგრამულად განსაზღვრული ტექნოლოგიების გამოყენება და ქსლების ვირტუალიზაცია.

4. დაყოვნების შემცირების მიზნით შემოთავაზებულია მობილურ ქსელში ჰიბრიდულ ადაპტური ალგორითმის გამოყენება, რაც გულისხმობს ვირტუალური გამჭოლი რადიოარხის შექმნას გადამცემი მოწყობილობიდან მიმდებამდე. ალგორითმი ითვალისწინებს ალტერნეტიული მარშრუტების შესწავლას, დამახსოვრებას და დაკავებული არხის პარამეტრების გაუარესების შემთხვევაში მასზე გადართვას, ასევე პაკეტის ზომის ცვლილებას დინამიკაში გადაცემის ინტერვალის (TTI) შემცირების მიზნით.

5. დაყოვნების სიდიდეზე პაკეტის ზომისა და გადაცემის დროის ინტერვალის ცვლილების გავლენაზე დაკვირვების მიზნით ჩატარებულია შესაბამისი ექსპერიმენტი, ნაჩვენებია შედეგების ანალიზი.

6. შექმნილია ტერმინალების დაკავშირების ისეთი დიზაინი რაც საშუალებას მოგვცემს გავზომოთ დაყოვნება მომხმარებლის მოწყობილობებს შორის - დაყოვნება ბოლოდან-ბოლომდე (E2E). ჩატარებულია შესაბამისი ექსპერიმენტი და მიღებულია შედეგები. შემუშავებულია მსგავსი ექსპერიმენტის ჩატარების სცენარები, რომელიც მოგვცემს უფრო მეტი მოცულობის ინფორმაციას დაყოვნების სიდიდის განსაზღვრისათვის არსებულ და მომავლის ქსელებში.

გამოყენებული ლიტერატურის ნუსხა

1. Dahlman E, Parkvall S, Skold J. 4G, LTE-Advanced Pro and The Road to 5G. Published by Elsevier Ltd., Apr. 2016, p. 587;
2. Бакулин М. Г., Креинделин В. Б., Шлома А. М., Шумов А. П. Технология OFDM. "Горячая линия – Телеком", 2017, Стр. 9 – 56;
3. Попков Г. В., Попков В. К., Величко В. В. Математические основы моделирования сетей связи. "Горячая Линия - Телеком", 2012, Стр. 182;
4. ბერიძე ჯ., კვიციანი შ. ფიჭური მობილური კავშირის ტექნოლოგიები - ლექციების კურსი. თბილისი: საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, 2018, გვ. 102 – 120;
5. ცირამუა ზ, ოთხოზორია ვ, სვანიშნილი შ. ქსელური კავშირები და WAN ტექნოლოგიები, თბილისი: საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, 2015, გვ. 170 - 172;
6. კვიციანი შ., ბერიძე ჯ., ჯორბენაძე მ. ჰიბრიდი სახლები, ქალაქები და საგნების ინტერნეტი უსადენო ქსელების გამოყენებით. "SEU & Science", 2017, №6(6), გვ. 404 - 409;
7. კვიციანი შ., ბერიძე ჯ., ჯორბენაძე მ. ფიჭური მობილური კავშირის ზოგიერთი პრობლემური საკითხის კვლევა პროგრამირებადი რადიო ტექნოლოგიების გამოყენებით. თბილისი "სტუ-ს შრომები 2017", 2017, №3(505), გვ. 41 - 48;
8. კვიციანი შ., ბერიძე ჯ., ჯორბენაძე მ. ფიზიკური პროცესების მონიტორინგი და მართვა სენსორული ქსელების გამოყენებით. ევროპეული სასწავლო უნივერსიტეტის საერთაშორისო სამეცნიერო-პრაქტიკული კონფერენციის მოხსენებების კრებული, 2017, №1, გვ. 201 - 206;
9. Dahlman E., Parkvall S., Joachim S., Mildh G., Selen I., Peisa J. 5G Radio Access. The communications technology journal, Ericsson Review, June 2015, p. 10;
10. Warren D., Dewar C., Understanding 5G: Perspectives on future technological advancements in mobile, "GSMA Intelligence", December 2015, p. 8-10;
11. 5G use cases and requirements. "Nokia White Paper", 2016, p. 4 - 8;
12. Hsu-Chieh H., Jiun-Ren L., Fan B., Tonguz O. K. Performance Enhancement of LTE Internet Access Network in Moving Vehicles. "Carnegie Mellon University Pittsburgh", 2015, p. 6;
13. Беридзе Д., Джорбенадзе М., Квирквелия Ш. Гибридный адаптивный алгоритм для снижения задержек в беспроводной сети. Белгород, РФ, „Научные Горизонты“, №5(21), 2019;

14. Коляденко Ю. Ю., Коляденко А. В. Математическая модель радиоканала для ММО-систем. Проблемы Телекоммуникаций, 2015, Стр. 91 -108;
15. <https://www.ericsson.com/en/blog/2015/5/5g-radio-access-for-ultra-reliable-and-low-latency-communications>, უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული 29.05.2019;
16. <https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte>, უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული 28.05.2019;
17. <https://tools.ietf.org/html/rfc4301#section-3.2>, უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული 28.05.2019;
18. <https://tools.ietf.org/html/rfc792>, უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული 28.05.2019;
19. [https://docs.microsoft.com/en-us/previous-versions/windows/it-pro/windows-2000-server/bb742566\(v=technet.10\)](https://docs.microsoft.com/en-us/previous-versions/windows/it-pro/windows-2000-server/bb742566(v=technet.10)), უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული 28.05.2019;
20. <https://sheamotsme.ge/>, უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული 29.05.2019;
21. https://www.grena.ge/eng/about_us, უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული 28.05.2019;
22. www.speedtest.net, უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული 28.05.2019;
23. <https://www.tesla.com/>, უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული 28.05.2019;
24. <https://www.drivingstarsderby.co.uk/2-second-rule/>, უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული 28.05.2019;
25. <https://www.pakwheels.com/blog/do-you-maintain-safe-distance-while-driving/>, უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული 28.05.2019;
26. <http://www.virtualizationteam.com/certifications/learn-virtualization-vmware-vsphere-from-scratch.html>, უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული 30.05.2019.

დანართები 1. პაკეტის ზომის ცვლილებით გამოწვეულ დაყოვნებაზე დაკვირვებისას გადაცემული სატესტო მონაცემების მაჩვენებლები ორი სცენარის მიხედვით

ცხრილი 1. 12 ბაიტი ზომის პაკეტის გადაცემისას მიღებული დაყოვნებებისა და წარმატებით დაბრუნებული პაკეტების მონაცემები

მოწყობილობა	IP მისამართი	წარმატებით დაბრუნებული პაკეტები	დაკარგული პაკეტები	დაკარგული პაკეტების წილი %	საშუალო დაყოვნება	მინიმალური დაყოვნება	მაქსიმალური დაყოვნება
Linksys21482	192.168.1.1	100	0	0%	4	2	40
Research-PC	192.168.1.102	100	0	0%	5	2	36
VIII-PC_01	192.168.1.121	100	0	0%	9	5	41
VIII-PC_Teacher	192.168.1.126	99	1	1.00%	5	2	36
TL-WR840N	192.168.1.136	100	0	0%	5	2	37
Test_PC	192.168.1.143	100	0	0%	0	0	2

ცხრილი 2. 1542 ბაიტი ზომის პაკეტის გადაცემისას მიღებული დაყოვნებებისა და წარმატებით დაბრუნებული პაკეტების მონაცემები

მოწყობილობა	IP მისამართი	წარმატებით დაბრუნებული პაკეტები	დაკარგული პაკეტები	დაკარგული პაკეტების წილი %	საშუალო დაყოვნება	მინიმალური დაყოვნება	მაქსიმალური დაყოვნება
Linksys21482	192.168.1.1	100	0	0%	6	3	16
Research-PC	192.168.1.102	100	0	0%	11	5	27
VIII-PC_01	192.168.1.121	100	0	0%	15	8	33
VIII-PC_Teacher	192.168.1.126	100	0	0%	12	3	34
TL-WR840N	192.168.1.136	100	0	0%	9	4	27
Test_PC	192.168.1.143	100	0	0%	0	0	2

დანართი 2. გადაცემის დროის ინტერვალზე (TTI) დაკვირვებისას გადაცემული სატესტო მონაცემების მაჩვენებლები სამი სხვადასხვა სცენარის მიხედვით

ცხრილი 3. ექსპერიმენტის შედეგები. სცენარი: პაკეტების გადაცემის სიხშირე 11პაკეტი/3 წამში, პასუხზე ლოდინის დრო - 2 მწმ, სულ გადაცემული პაკეტების რაოდენობა ერთ მოწყობილობაზე -100, პაკეტების ზომა - 3000 ბაიტი.

მოწყობილობა	IP მისამართი	წარმატებით დაბრუნებული პაკეტები	დაკარგული პაკეტები	დაკარგული პაკეტების წილი %	საშუალო დაყოვნება	მინიმალური დაყოვნება	მაქსიმალური დაყოვნება
Linksys21482	192.168.1.1	100	0	0%	65	38	155
VIII-PC_03	192.168.1.101	100	0	0%	62	34	144
VIII-PC_07	192.168.1.103	100	0	0%	38	21	107
android-Sony	192.168.1.106	99	1	1.00%	93	38	213
VIII-PC_01	192.168.1.121	100	0	0%	64	41	159
VIII-PC_Teacher	192.168.1.126	100	0	0%	64	36	142
VIII-PC_05	192.168.1.131	100	0	0%	72	42	650
VIII-PC_08	192.168.1.135	100	0	0%	41	22	110
TL-WR840N	192.168.1.136	100	0	0%	44	21	108
Test_PC	192.168.1.138	100	0	0%	0	0	3
VIII-PC_06	192.168.1.149	100	0	0%	51	23	112

ცხრილი 4. ექსპერიმენტის შედეგები. სცენარი: პაკეტების გადაცემის სიხშირე - 11პაკეტი/1 წამში, პასუხზე ლოდინის დრო - 1 მწმ, სულ გადაცემული პაკეტების რაოდენობა ერთ მოწყობილობაზე -100, პაკეტების ზომა - 3000 ბაიტი.

მოწყობილობა	IP მისამართი	წარმატებით დაბრუნებული პაკეტები	დაკარგული პაკეტები	დაკარგული პაკეტების წილი %	საშუალო დაყოვნება	მინიმალური დაყოვნება	მაქსიმალური დაყოვნება
Linksys21482	192.168.1.1	87	13	12.00%	51	29	95
VIII-PC_03	192.168.1.101	88	12	12.70%	49	28	87
VIII-PC_07	192.168.1.103	92	8	8.00%	29	18	57
android-Sony	192.168.1.114	61	39	37.00%	193	44	352
VIII-PC_01	192.168.1.121	88	12	12.00%	52	37	92
VIII-PC_Teacher	192.168.1.126	89	11	11.00%	52	39	92
VIII-PC_05	192.168.1.131	89	11	11.00%	55	40	93
VIII-PC_08	192.168.1.135	92	8	8.00%	33	13	67
TL-WR840N	192.168.1.136	91	9	10.00%	37	21	80
Test_PC	192.168.1.138	100	0	0%	0	0	2
VIII-PC_06	192.168.1.149	90	10	11.00%	42	21	86

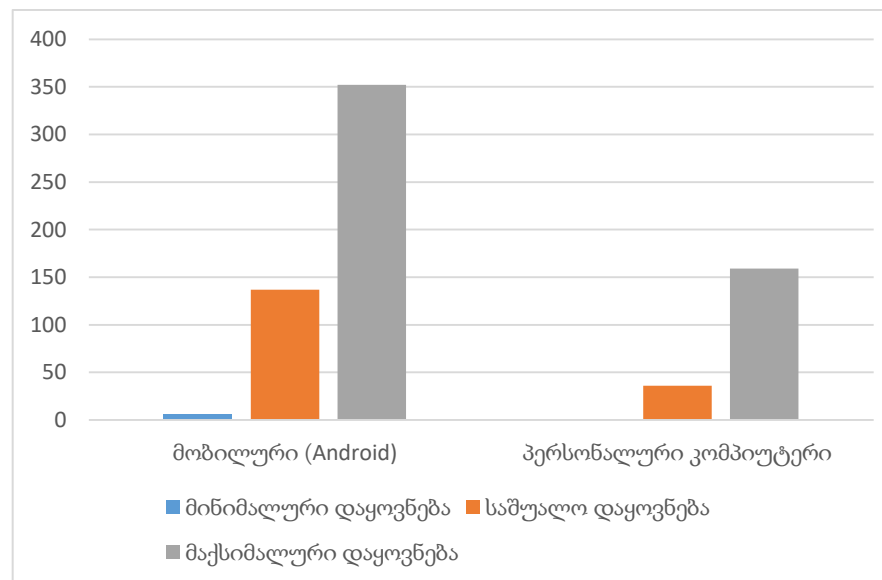
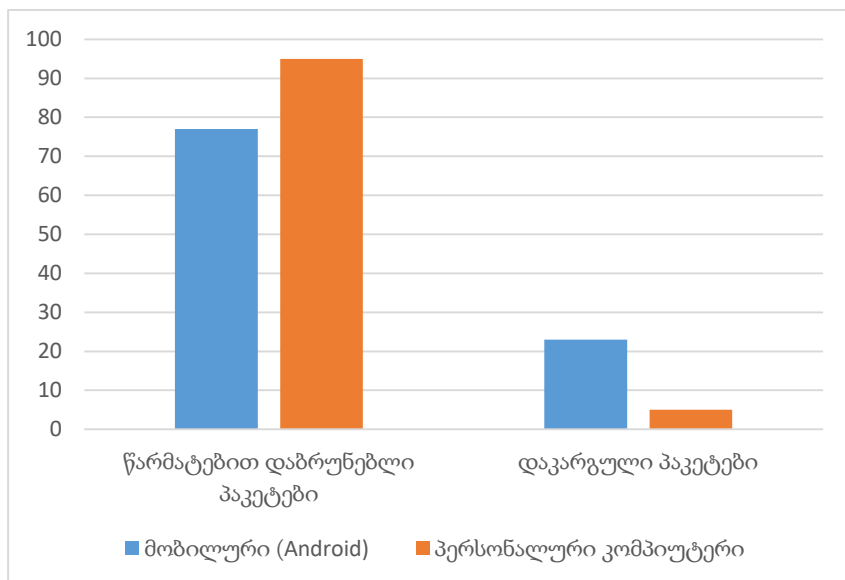
ცხრილი 5. ექსპერიმენტის შედეგები. სცენარი: პაკეტების გადაცემის სიხშირე 11პაკეტი/1 წამში, პასუხზე ლოდინის დრო - 1 მწმ, სულ გადაცემული პაკეტების რაოდენობა ერთ მოწყობილობაზე -100, პაკეტების ზომა - 12 ბაიტი.

მოწყობილობა	IP მისამართი	წარმატებით დაბრუნებული პაკეტები	დაკარგული პაკეტები	დაკარგული პაკეტების წილი %	საშუალო დაყოვნება	მინიმალური დაყოვნება	მაქსიმალური დაყოვნება
Linksys21482	192.168.1.1	96	4	4.00%	7	1	102
VIII-PC_03	192.168.1.101	96	4	4.00%	7	2	102
VIII-PC_07	192.168.1.103	93	7	7.00%	25	2	105
android-Sony	192.168.1.106	72	27	27.27%	125	6	234
VIII-PC_08	192.168.1.117	93	7	7.00%	27	5	103
VIII-PC_01	192.168.1.121	90	10	10.00%	36	9	108
VIII-PC_Teacher	192.168.1.126	96	4	4.00%	8	2	103
VIII-PC_05	192.168.1.131	91	9	9.00%	34	8	103
TL-WR840N	192.168.1.136	92	8	8.00%	28	4	103
Test_PC	192.168.1.138	100	0	0%	0	0	2
VIII-PC_06	192.168.1.149	92	8	8.00%	30	5	102

დანართი 3. მობილური - Android და სტაციონალური პერს. კომპ. - OS Windows ტერმინალური მოწყობილობების ტესტირებისას მიღებული შედეგების შედარება

ცხრილი 6. ტესტირებისას მიღებული დაყოვნების და პაკეტების წარმატებით დაბრუნების/დაკარგვის შედეგების შედარება

მოწყობილობის ტიპი	წარმატებით დაბრუნებული პაკეტები	დაკარგული პაკეტები	დაკარგული პაკეტების წილი %	საშუალო დაყოვნება	მინიმალური დაყოვნება	მაქსიმალური დაყოვნება
მობილური (Android)	77	23	0.23	137	6	352
პერს. კომპიუტერი	95	5	0.05	36	0	159



ნახ. 1. წარმატებით დაბრუნებული და დაკარგული პაკეტები

ნახ. 2. დაყოვნებები მინ. საშუალო და მაქს.

დანართი 4. ექსპერიმენტში გამოყენებული პროგრამული უზრუნველყოფის ინტერფეისი

Host Name	IP Address	Reply IP Address	Succeed Cou...	Failed Count	Consecutive F...	Max C...
10.8.131.1	10.8.131.1	10.8.131.1	3	0		
VIII-PC_Teacher	10.8.131.52	10.8.131.52	3	0		
B08A409WA001	10.8.131.53	10.8.131.53	3	0		
10.8.131.54	10.8.131.54		0	3	3	3
VIII-PC810-2	10.8.131.55	10.8.131.55	3	0		

Sent On	Reply IP Address	Ping Time	Ping TTL	Ping Status
30-May-19 12:33...	10.8.131.1	0	255	Succeeded
30-May-19 12:34...	10.8.131.1	1	255	Succeeded
30-May-19 12:34...	10.8.131.1	1	255	Succeeded

Properties

Host Name: B08A409WA001

IP Address: 10.8.131.53

Reply IP Address: 10.8.131.53

Succeed Count: 5

Failed Count: 0

Consecutive Failed Count:

Max Consecutive Failed Count:

Max Consecutive Failed Time:

% Failed: 0%

Last Ping Status: Succeeded

Last Ping Time: 0

Last Ping TTL: 128

Average Ping Time: 1

Description:

Last Succeed On: 30-May-19 12:35:34 PM

Last Failed On:

Minimum Ping Time: 0

Maximum Ping Time: 1

Order: 3

OK

დანართი 5. დაყოვნების გაზომვის ყველა შესაძლო სცენარი საქართველოში გამოყენებული ყველა მობილურ ტექნოლოგიის გათვალისწინებით



ნახ. 3. ექსპერიმენტის ჩატარების ძირითადი სცენარები და მათი ვარიანტები

დანართი 6. ექსპერიმენტის პროცედურების დროს გამოყენებული ვებ რესურსები

<https://www.iplocation.net/> - ვებ გვერდი tracert ბრძანების შემდეგ საერთო (სახალხო, საჯარო - Public) IP მისამართის მფლობელის გასარკვევად ქსელის საზღვრების დადგენის მიზნით;

<https://sheamotsme.ge/> - საქართველოს კომუნიკაციების ეროვნული კომისიის მიერ შექმნილი ინტერნეტის ხარისხის და სიჩქარის შემოწმებისთვის შექმნილი გვერდი;

<https://www.speedtest.net/> - გვერდი რომლითაც შესაძლებელია ინტერნეტის სიჩქარის და სხვა მონაცემების შემოწმება.