

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

**მამუკა ჯორბენაძე**

**მობილურ ქსელებში პაკეტის დაყოვნების შემცირების მეთოდის  
კვლევა**

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად წარდგენილი  
დისერტაციის

**ა ვ ტ ო რ ე ფ ე რ ა ტ ი**

სადოქტორო პროგრამა - “ტელეკომუნიკაცია”

შიფრი - 0402

თბილისი

2019

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში  
ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტი  
ტელეკომუნიკაციის დეპარტამენტი

ხელმძღვანელი: პროფესორით. კუპატაძე

რეცენზენტები:

დაცვა შედგება 2019 წლის "-----" "-----" "-----" საათზე  
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკისა და  
ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის სადისერტაციო კოლეგიის სხდომაზე,  
კორპუსი VIII, აუდიტორია  
მისამართი: 0175, თბილისი, კოსტავას 77.

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ის ბიბლიოთეკაში,  
ხოლო ავტორეფერატისა - ფაკულტეტის ვებგვერდზე

სადისერტაციო საბჭოს მდივანი,  
ასოცირებული პროფესორი

გ. გიგინეიშვილი

## ნაშრომის ზოგადი დახასიათება

**თემის აქტუალურობა.** ბოლო წლების განმავლობაში სწრაფად იზრდება ინტერესი რადიოკავშირის სისტემებისადმი და მათ მიერ უზრუნველყოფილი უსადენო მომსახურების სერვისებისადმი – იქნება ეს ხმა, მონაცემები თუ მულტიმედია. ასევე გაზრდილი IoT (Internet of Things) დატვირთვა, დიდი მოცულობის მონაცემთა (Big Data) და ე.წ. Cloud-based სერვისების არსებობა ახალ მოთხოვნებს უყენებს თანამედროვე და მომავალი თაობების 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 დამაკმაყოფილებელისერვისის 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 დაყოფნა. ახალი თაობების ქსელები უნდა ითვალისწინებდნენ განსხვავებულ (მცირე) დაყოფნების სიდიდეს კრიტიკული მანქანათშორისი კომუნიკაციისთვის. ყოველივე ეს მიიღწევა დაყოფნების შემცირების მეთოდების მეშვეობით.

უკვე მოახლოებული, მომავლის მეხუთე თაობის - 5G მობილური ქსელი, რადიკალურად შეცვლის ადამიანების ცხოვრებას, მათ ყოველდღიურ საქმიანობას. მისი მიზანია მომხმარებლებისთვის მონაცემთა გადაცემის უფრო მაღალი 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 დაყოფნა. ამიტომაც, 5G ქსელმა უნდა უზრუნველყოს დაყოფნა 1 მილიწამამდე ავტომატური მოწყობილობებისთვის, სადაც უმნიშვნელოვანესი როლი მიენიჭება პაკეტის დაყოფნების შემცირების მეთოდებს. ასეთი ტიპის მომსახურების ერთ-ერთ ძალიან კარგ მაგალითს წარმოადგენს, თვითმართვადი ავტომობილები, რომელთა გამართული ფუნქციონირება დამოკიდებული იქნება რამდენიმე მაჩვენებელზე, სახელდობრ მონაცემების დაყოფნაზე, კავშირის საიმედოობასა და ხელმისაწვდომობაზე.

LTE გახდა ყველაზე წარმატებული მობილური უსადენო ფართოზოლოვანი ტექნოლოგია, რომელიც 2016 წლის დასაწყისისთვის ემსახურებოდა ერთ მილიარდზე მეტ მომხმარებელს და უზრუნველყოფს 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.

**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. მობილური კავშირის MIMO-სისტემების დაგეგმვა/მოდელირება გადამცემი და მიმღები ანტენების მასივების კონფიგურაციებისა და კორელაციების მხედველობაში მიღებით;
2. ქსელის მაჩვენებლების ურთიერთდამოკიდებულების კვლევა ჩატარებული ექსპერიმენტის შედეგად მიღებული მონაცემების ანალიზის საფუძველზე;
3. აღნიშნული ანალიზის საფუძველზე, წარმოდგენილია დაყოვნების შესამცირებლად შესწავლილი მეთოდები;
4. შემუშავებულია პაკეტის დაყოვნების განსაზღვრის პრაქტიკული მეთოდები;
5. დაყოვნების გაზომვის შემუშავებული მეთოდი შემოწმებულია არსებულ ქსელებზე;

გამახვილებულია ყურადღება აღნიშნული კვლევის პრაქტიკულ გამოყენებაზე, უნივერსიტეტის სასწავლო ლაბორატორიებსა და მოქმედ კომერციულ ქსელში.

**კვლევის მეთოდოლოგია.** სადისერტაციო ნაშრომში დასმული პრობლემის გადასაწყვეტად 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 მანქანათმშორისი 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.

**ნაშრომის ძირითადი შედეგები.** 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 გადაწყობილი იქნება შესაბამისი ტექნიკური ბაზა.

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

**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;
- საქართველოს ეროვნული უნივერსიტეტში გამართულ კონფერენციაზე „საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია სეუ 2017“. თბილისი, 2017 წელი;
- ევრორეგიონული სასწავლო უნივერსიტეტის საერთაშორისო სამეცნიერო-პრაქტიკულ კონფერენციაზე „თანამედროვეობის აქტუალური მეცნიერული საკითხები“. 2017 წელი. გორი, ცხინვალისქუჩა N9;
- თემატურ სემინარებსა და თეორიულ/ექსპერიმენტულ კვლევა/კოლოქვიუმებზე;
- დისერტაციის წინასწარ დაცვაზე 2019 წლის 3 მაისი;

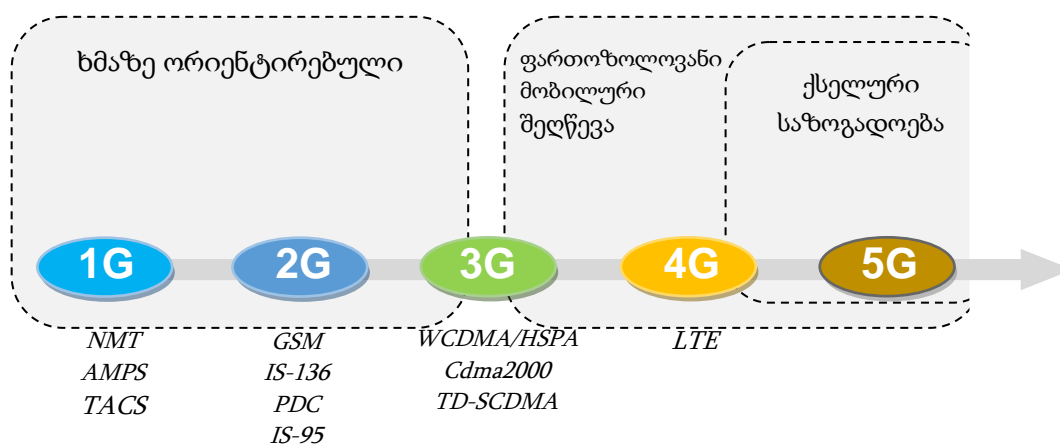
**ცნობები დისერტაციის მოცულობისა და სტრუქტურის შესახებ.**

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, ექვსი თავისაგან შესაბამისი ქვეთავებითა და პარაგრაფებით, დასკვნისაგან, ექვსი დანართისგან და ბოლოს გამოყენებული ლიტერატურის ნუსხისაგან. საერთო მოცულობა შეადგენს 103 გვერდს.

## ნაშრომის მოკლე შინაარსი

შესავალში განხილულია თემის აქტუალურობა, შესრულებული სამუშაოს მიზანი და კვლევის ამოცანები, კვლავის დროს გამოყენებული მეთოდოლოგია, რა არის მთავარი მეცნიერული სიახლე, მოკლედ არის აღწერილი ნაშრომის ძირითადი შედეგები, ასევე აპრობაცია და ნაშრომის სტრუქტურა.

პირველ თავში - მოკლედ არის აღწერილი მობილური კავშირის ფიჭური ქსელების განვითარების ეტაპები თაობების მიხედვით. რომელი თაობის ქსელისთვის რა იყო ყველაზე მნიშვნელოვანი ტექნოლოგიური სიახლე, რა მომსახურებების უზრუნველყოფა შეეძლოთ და რა იყო გამოწვევა მომდევნო თაობების ქსელებისთვის. აქვე აღნიშნულია თუ რა მომსახურებების მიწოდება უნდა გახდეს შესაძლებელი მეხუთე თაობის ქსელებში.



ნახ. 1. ფიჭური კავშირის თაობები

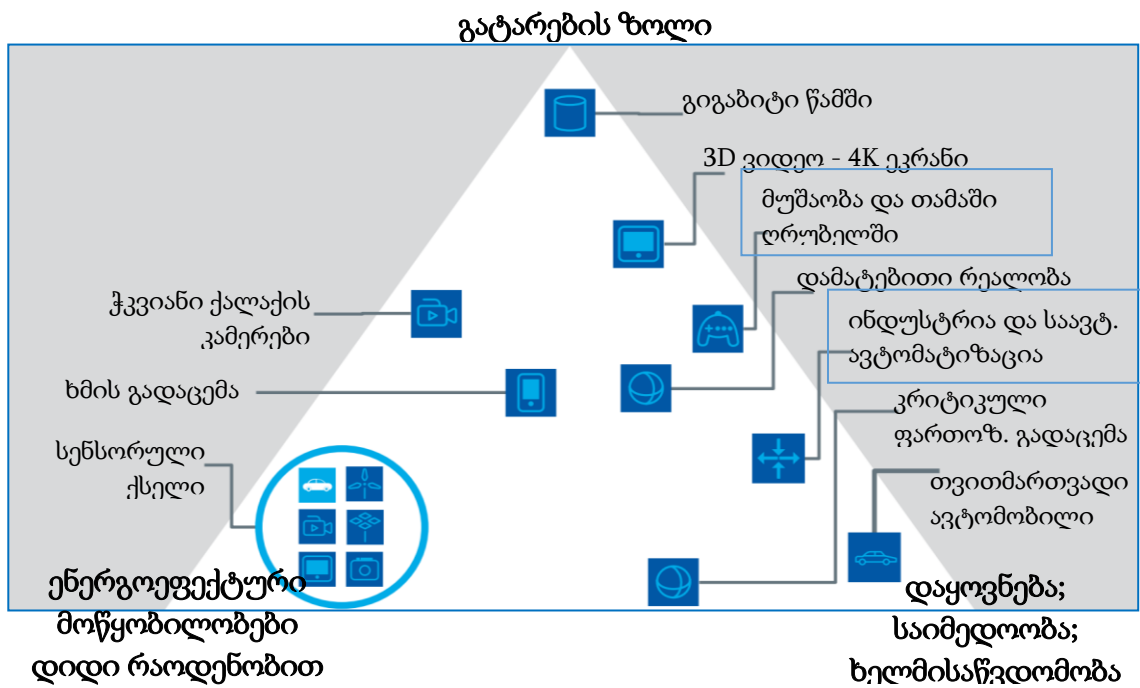
მსოფლიოს მოევლინა მობილური კომუნიკაციათა სისტემის ოთხი თაობა, რომელთაგან თითოეული ასოცირებული იყო ტექნოლოგიების განსაზღვრულ ნაკრებთან და მათ მიერ მხარდაჭერილ კონკრეტულ გამოყენების ვარიანტებთან ნახ. 1. თაობები და მათ შორის ნაბიჯები ამ ნაშრომში გამოიყენება დისერტაციის შინაარსის წარმოსადგენად როგორც საერთო 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.

**მეორე თავში** - მეტი სიზუსტით არის აღწერილი მომსახურების ახალი სახეები რომელიც უნდა უზრუნველყოს მომავალი ულტრასაიმიდო მობილური კავშირის ფიჭურმა ქსელებმა. ასევე აღწერილია კრიტიკული მანქანათმშორისი კომუნიკაციების მთავარი საზომი პარამეტრები:

- დაყოვნების მნიშვნელობა 1 მილიწამამდე;
- ულტრასაიმიდობა- პაკეტის დაკარგვის ალბათობა  $10^{-9}$ ;
- ხემისაწვდომობა - 99,999 %.



**ნახ. 2. მომსახურებების მრავალფეროვნება, გამოყენების ვარიანტები და მოთხოვნები**

ნახ. 2-ზე ილუსტრირებულია მოსალოდნელი 5G მომსახურებების მრავალფეროვნება. პოტენციური 5G გამოყენების ვარიანტები და მათთან ასოცირებული ქსელის მოთხოვნები აღწერილია ქვემოთ.

კონკრეტული მომსახურების, კერძოდ ავტოპილოტი / დაკავშირებული ავტომობილები მაგალითზე აღწერილია თუ რატომ უნდა იყოს დაყოვნების სიდიდე 1 მილიწამი ან ნაკლები.

ავტომობილის დამუხრუჭებისთვის 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-საჭიროება მძღოლს ფიქრისა და გადაწყვეტილების მისაღებად, ხოლო  $3/4 \approx 1500 \div 2250$  მლწმ-საჭიროა მოქმედებისთვის (მუხრუჭზე დაჭერა - ავტომობილის გაჩერება), ხოლო იმ შემთხვევაში თუ ვერ მოხერხდა ავტომობილის შეჩერება და მოხდა ინციდენტი  $15 \div 30$  მლწმ სჭირდება უსაფრთხოების ბალიშების მოქმედებაში მოსვლას, ბალიშები ბოლომდე იბერება  $60 \div 80$  მილიწამისშემდეგ. [13, 14]

თვითმართვად ავტომობილებში დაყოვნების 1 მლწმ-მდე შემცირებით მიიღწევა:

1. უსაფრთხოების მაღალი დონე, როგორც ავტომობილის მძღოლისთვის ასევე მის სიახლოვეს მოძრავი და გაჩერებული ავტომობილებისა და ქვეითებისთვის;
2. 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.

მესამე თავში - დაყოვნების შესაფასებლად წარმოდგენილია მობილური კავშირის ქსელების რადიოარხების მოდელირება, სადაც აღწერილია არხები მრავალსიხვიანი გავრცელებით.

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

$$h(\tau, t) = \sum_n a_n(t) e^{-j2\pi f_i \tau_n(t)} \delta(\tau - \tau_n(t)) \quad (1)$$

სადაც  $a_n(t)$  სიგნალის  $n$ -ური სხივის მიღევის 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- $\tau$ ;  $\delta(\tau - \tau_n(t))$ - დელტა ფუნქციაა.

ნაჩვენებია 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 - სიმძლავრის დაყოვნების პროფილი) ეს ფუნქცია შეიძლება გარდაისახოს ალბათობის სიმკვრივედ  $P(\tau)$  და ნორმალიზების შემდეგ მიიღებს სახეს

$$P(\tau) = \frac{R_h(\tau)}{\int_{-\infty}^{\infty} R_h(\tau) d\tau} = \frac{P_h(\tau)}{\int_{-\infty}^{\infty} P_h(\tau) d\tau} \quad (2)$$

ნახ. 3-ზე ნაჩვენებია დაყოვნებების სიდიდის პროფილი მრავალსხივიანი გავრცელების რადიოარხისათვის.

ამ განაწილების საშუალო კვადრატული გადახრა

$$\tau_{rms} = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} (\tau - D_\tau)^2 P(\tau) d\tau} \quad (3)$$

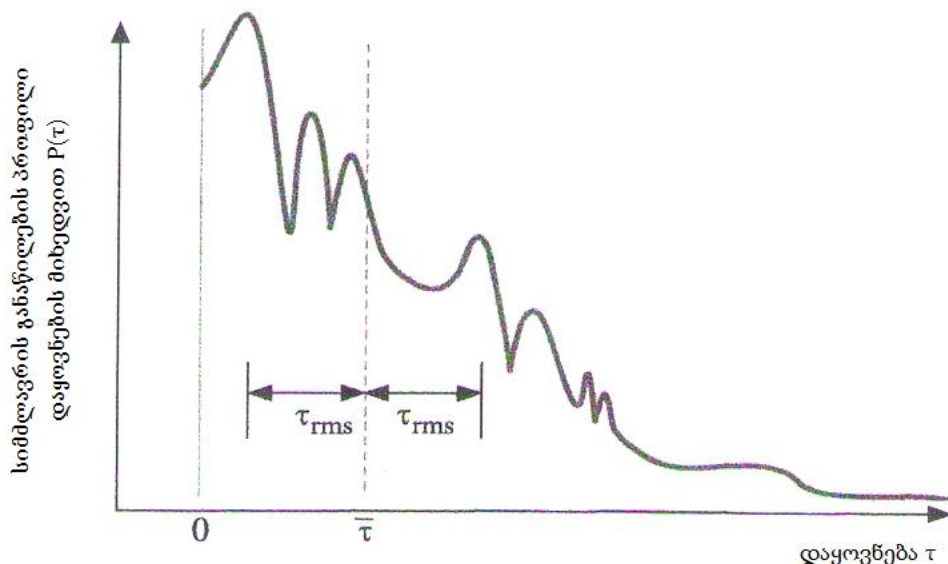
ახასიათებს დაყოვნების გაფანტვას, გამოწვეულს მრავალსხივიანი გავრცელებით. საშუალო დაყოვნება გამოითვლება, როგორც

$$D_\tau = E[\tau] = \int_{-\infty}^{\infty} \tau P(\tau) d\tau \quad (4)$$

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

$$P(f_D) = \frac{R_H(f_D)}{\int_{-\infty}^{\infty} R_H(f_D)} = \frac{S(f_D)}{\int_{-\infty}^{\infty} S(f_D)df_D} \quad (5)$$

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



ნახ. 3. მრავალსხივიანი არხის დაყოვნების ტიპური პროტოკოლი

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.

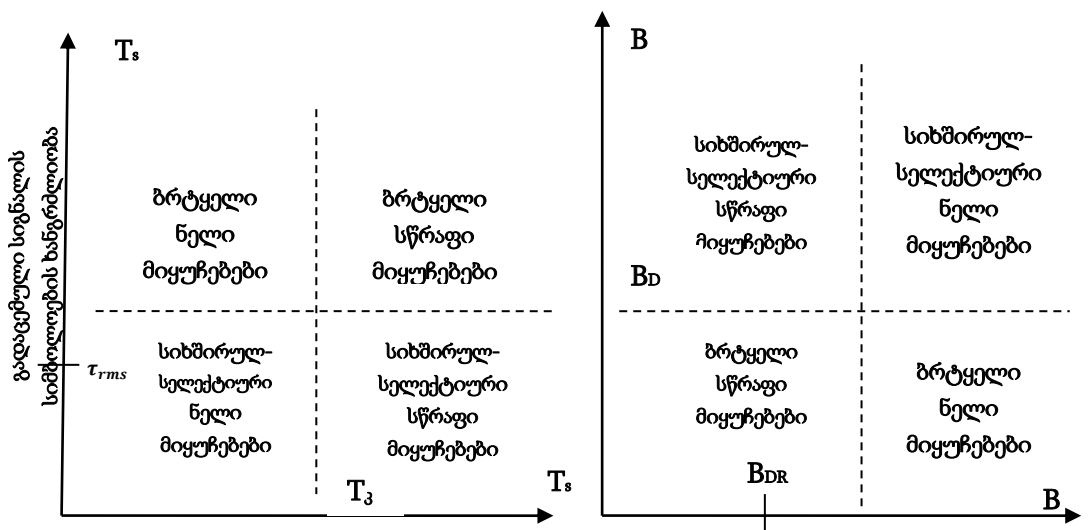
არხის კოჰერენტულობის დროს  $T_j$  და კოჰერენტულობის დიაპაზონი  $B_s - B_s = \frac{1}{T_s}$  ერთმნიშვნელოვნად განსაზღვრავენ არხს და გამოიყენება მიმღებ-გადამცემი მოწყობილობების დამუშავების პროცესში. აქ ყურადღება უნდა მიიქცეს ორ ძირითად მიდგომას, კერძოდ.

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

თუ  $T_j \ll T_s$ , მაშინ მიმღებში სიმბოლო მიიღება დიდი დამახინჯებით რასაც მივეყვართ 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 ხანგრძლიობის განმავლობაში და სიგნალი დროზე დამოუკიდებელია.

2) გადასაცემი სიგნალის სიხშირული სპექტრის სიგანეს, B:



ა) სიმბოლოს ხანგრძლიობის მიხედვით      ბ) საბაზო სიგნალის სპექტრი სიგანის მიხედვით

ნახ. 4. არხების კლასიფიკაცია

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

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

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

ზემოაღნიშნული მსჯელობების საილუსტრაციოდ ნახ. 4-ზე მოყვანილია არხების კლასიფიკაციის გრაფიკი.

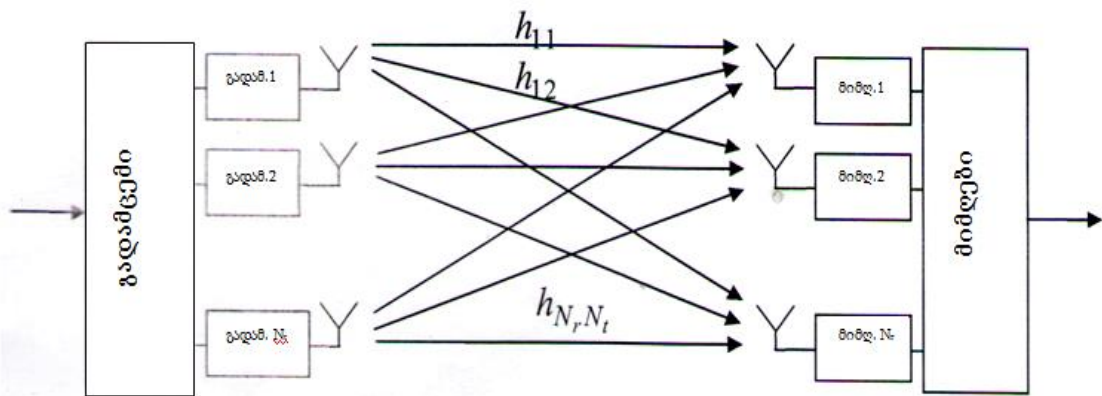
**მობილური კავშირის MIMO-სისტემების რადიოარხების მათემატიკური მოდელი:** ინფორმაციის გადაცემის მეთოდების თეორიული კვლევებისათვის საკვანძო საკითხს წარმოადგენს სატელეკომუნიკაციო არხების, მათ შორის რადიოარხების მათემატიკური მოდელირება. მობილური კავშირის სიტემები და ქსელების განვითარების ძირითადი მიმართულებები 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

შევეხებით მხოლოდ MIMO-არხების განზოგადებული მათემატიკური მოდელების შექმნის პროცედურებს.

MIMO-ტექნოლოგიის რეალიზაციის სქემა მოყვანილია ნახ. 5. გადამცემი ბლოკი შეიცავს  $N_t$  გადამცემსა და ანტენას, მიმღები კი  $N_r$  მიმღებ ანტენას. ნებისმიერი გადამცემიდან სიგნალი შეიძლება მიიღოს მიმღების ნებისმიერმა ანტენამ.



ნახ. 5. MIMO-სისტემის სტრუქტურული სქემა

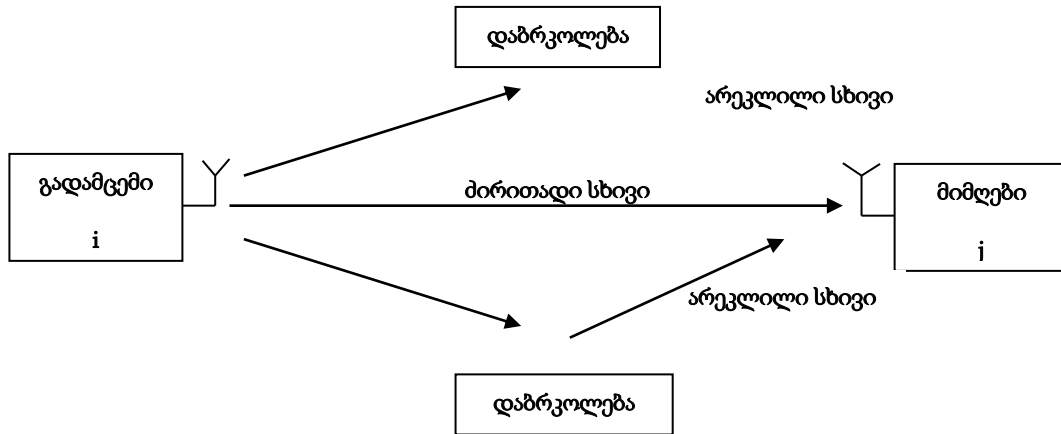
არხის გადამცემის კოეფიციენტების მატრიცა ასე ჩაიწერება

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & \dots & h_{1N_t} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & \dots & h_{2N_t} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} & \dots & h_{3N_t} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ h_{N_r1} & h_{N_r2} & h_{N_r3} & \dots & h_{N_rN_t} \end{bmatrix} \quad (6)$$

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

(6) მატრიცის თითოეული  $h_{ij}$  კოეფიციენტი შეიძლება შედგებოდეს რამოდენიმე სხივისაგან.

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



ნახ. 6. რადიოსიგნალის მრავალსხივიანი გავრცელება

ზოგადად მიმღებში შემოსული სხივები მიიღებიან ანტენებით, რომელიც წარმოადგენს ვიბრატორების მესერს (ნახ. 7). მასზე ეცემა ბრტყელი რადიოტალღა ერთ-ერთი სხივის სახით. ზოგად შემთხვევაში ეს სხივი ეცემა ვიბრატორების მესერს  $\varphi$  კუთხით. ვიბრატორებს შორის მანძილი აღვნიშნოთ  $d$ -თი. საწყისად მივიღოთ პირველი ვიბრატორი (მარცხნიდან პირველი ნახ. 7-ზე)  $t=0$  მომენტში ამ ვიბრატორის მიღებული სიგნალი აღიწერება, როგორც

$$s_1(t) = \exp(j\omega_0 t) \tag{7}$$

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. 7-დან

$$\tau = \frac{d \sin \varphi}{c} \tag{8}$$

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



$$s_2(t) = \exp(j\omega_0(t + \tau)) = \exp(j2\pi f_0 \tau) \exp(j\omega_0 t) \quad (9)$$

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

$$s_n(t) = \exp(j \frac{2\pi}{\lambda} (n-1) d \sin \varphi) \exp(j\omega_0 t), \quad n = 1, \dots, N \quad (10)$$

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

$$S_n(t) = S_n \exp(j\omega_0 t) \quad (11)$$

აქ შესაძლებელია ყველა  $N$  მიმღები ვიბრატორის სიგნალის აღწერა მატრიცით:

$$\vec{S} = \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ \exp(j \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \varphi) \\ \vdots \\ \exp(j \frac{2\pi}{\lambda} (N-1) d \sin \varphi) \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$\vec{s}(t) = \begin{pmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \\ \vdots \\ s_N(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_N \end{pmatrix} \exp(j\omega_0 t) = \vec{S} \exp(j\omega_0 t) \quad (13)$$

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

$$z_r(t) = \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^{N_t} [h_{cln} u_x(t - (n-1)T - \tau_l) + h_{sln} u_x(t - (n-1)T - \tau_l) + \xi(t)], \quad 0 < t < \infty, \quad (14)$$

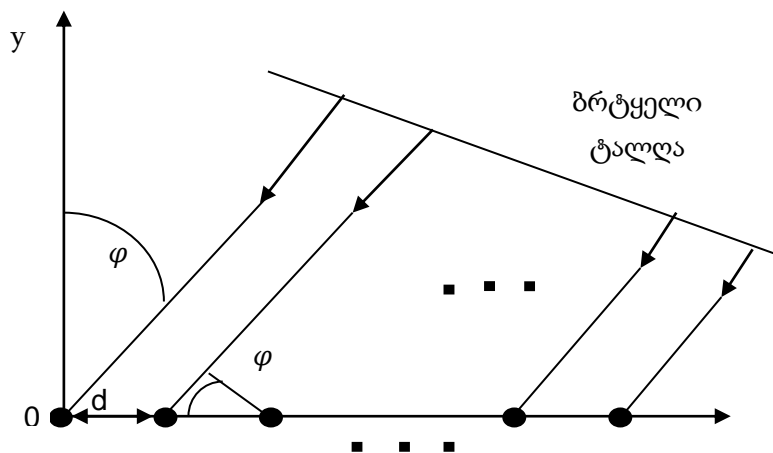
სადაც  $L$ -არხში სხვივების სრული რაოდენობაა;  $\tau_l - l$  სხვივის დაყოვნების დროა;  $u_x$ -სიგნალის ცნობილი რეალიზაციაა მიმღებში;  $T$ -გაადასაცემი სიმბოლოების ხანგრძლიობაა;  $h_{cin}$  და  $h_{cln} - l$  სხვივის გადაცემის შემთხვევითი სიმფაზური და კვადრატურული შემადგენლებია:  $\xi(t)$ - გაუსის შემთხვევითი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

თუ მხედველობაში მივიღებთ, რომ გადამცემსა და მიმღებს შორის მანძილი მრავალჯერ აღემატება რადიოტალის 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

$$h_{rn} = \sum_{l=1}^L (1 + \alpha A_{ul}) \exp(j\pi \frac{d}{\lambda} (r-1)(\varphi_{cl} + \beta \varphi_{\phi l})) \quad (15)$$

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



ნახ. 7. ვიბრატორების მესერი

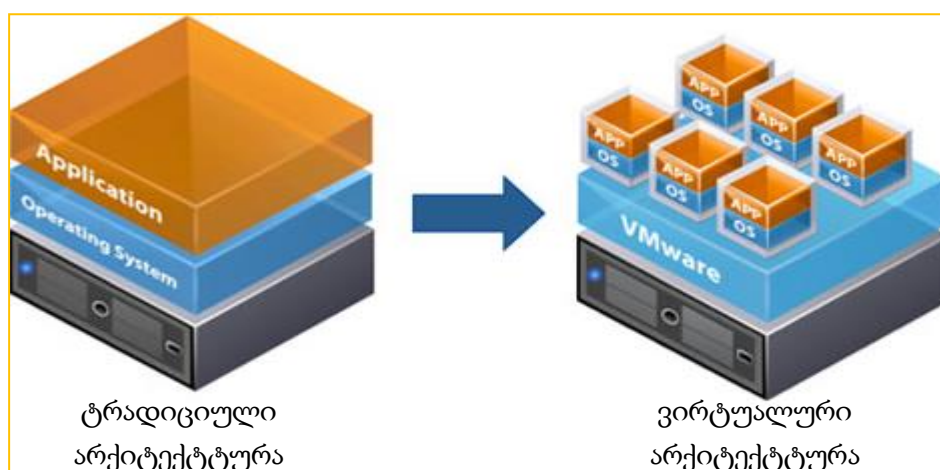
მესამე თავში მიღებული შედეგების მიხედვით შეიძლება დავასკვნათ, რომ მობილური კავშირის MIMO-სისტემების მოდელირების დროს მხედველობაში უნდა იქნას მიღებული გადამცემი და მიმღები ანტენების მასივების კონფიგურაციები და კორელაციები.  $\alpha$  და  $\beta$  კოეფიციენტების შერჩევით (15) გამოსახულებაში შეიძლება შევარჩიოთ როგორც სრულად კოლერირებული ( $\alpha = 0$  და  $\beta = 0$ ), ან არაკოლერირებული.

**მეოთხე თავში** - მოცემულია დაყოვნების შემცირების აქამდე არსებული მექანიზმები, კერძოდ ეს არის საარხო დონის აგებულების გამარტივება HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request) პროტოკოლის გამოყენება და გადაცემის დროის ინტერვალის TTI (Transmission Time

Interval) შემცირება. ასევე ქსელის ფუნქციების ვირტუალიზაციის, ქსელის არქიტექტურის და პროგრამულად განსაზღვრული ქსელების გავლენა დაყოვნების სიდიდეზე.

**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.

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 უკვე შესაძლებელია რომ კომპიუტერის მაუსის რამოდენიმე დაწკაპებით შეიქმნას მაგ: მონაცემთა ცენტრი (Data Center). ნახ. 8-ზე ნაჩვენებია ტრადიციული და ვირტუალიზებული არქიტექტურების შედარება.



ნახ. 8. ტრადიციული და ვირტუალური არქიტექტურების შედარება

ნახ. 10-ზე 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.

**მეხუთე თავი** - ეძღვნება დისერტაციაში მოცემულ მთავარ სამეცნიერო სიახლეს. ამ თავში აღწერილია უსადენო ქსელში დაყოვნების შემცირების ჰიბრიდულ-ადაპტური ალგორითმი. შედარებულია არხებისა და პაკეტების კომუტაციის უპირატესობების და ნაკლოვანებები.

ეს ორი ტექნოლოგია შეიძლება ასე შევადაროთ.

არხების კომუტაცია:

- გამოყოფილი არხი ორ ტერმინალს 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:

$$D_{\text{არხ}} = \frac{K}{R} \quad (16)$$

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

პაკეტური კომუტაციისთვის დაყოვნება შეიძლება გამოითვალოს გამოსახულებით:

$$D_{კვ} = \frac{P}{R} (N + 1) + \frac{K-P}{R} \quad (17)$$

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.

დისერტაციაში 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  $\delta_i$ -ის, რომლის მიმართაც იძებნება ოპტიმალური მნიშვნელობა.

$$\varphi = (\delta_i) - opt \quad (18)$$

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

$$\varphi = \sum_{i \in L} C_i X_i + \sum P_i(X_i, \dots, X_j) S_k \rightarrow \min \quad (19)$$

სადაც  $S_k$  – არის დაყოვნება ერთ კილომეტრზე.  $P(X_i, X_j)$  მანძილი  $L$  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

$$P(X_i, X_j) = 0, \quad P(X_i, X_j) = P(X_j, X_i) \quad (20)$$

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

მოცემულ სიბრტყეში ვიპოვოთ ისეთი  $X_0$  წერტილი, რომ

$$\varphi(X_0) = \sum_{k=1}^n P(X_0, X_k) C_k \rightarrow \min \quad (21)$$

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  $X_0^1$   $P(X_0^1, X_0)$  მანძილზე  $C(X_0^1)$  და  $C(X_i)$  წონების უკუპროპორციული

$$X_0^{i-1} X_0^1 X_i \quad C(X_i) = 4, \quad C(X_0^{i-1}) = 8 \quad (22)$$

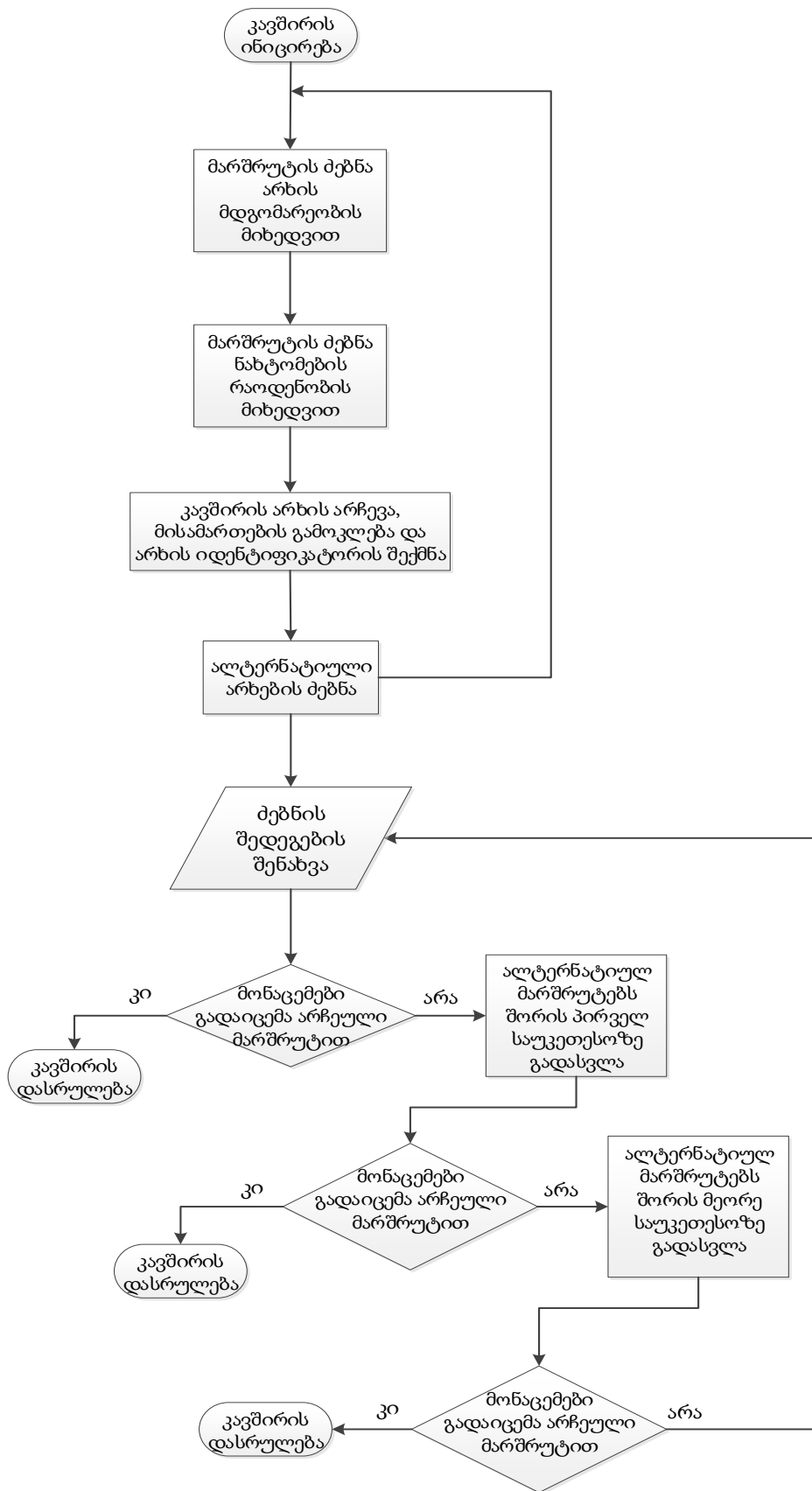
$$X_0^1 \text{ წონა ტოლი იქნება } C(X_0^1) = C(X_0^{i-1}) + C(X_i)$$

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

**ბიჯი 3** - წერტილი  $X_0^1$  ნაპოვნია.

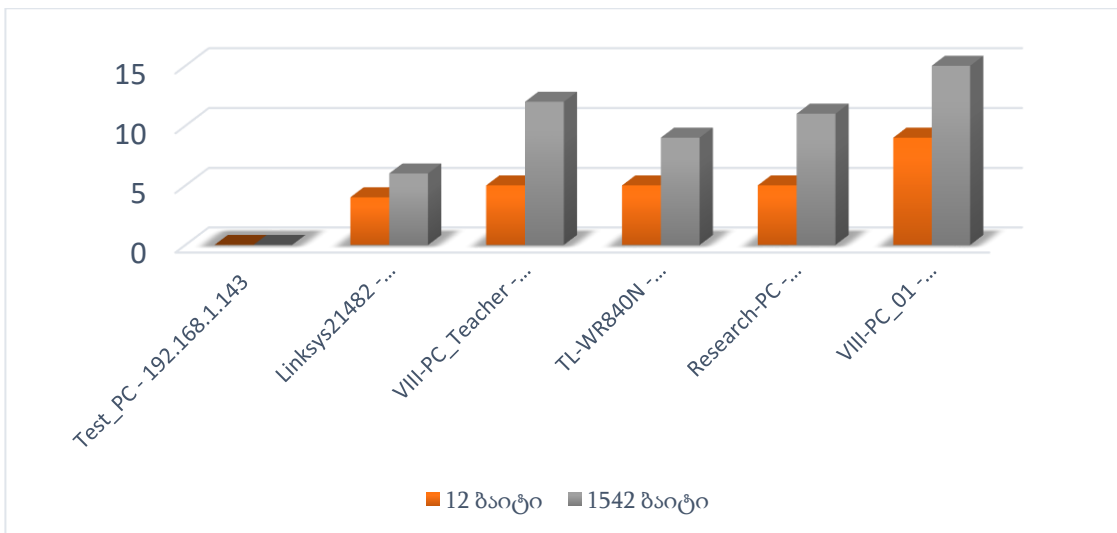
როგორც განხილული ამოცანიდან ჩანს დაყოვნების თვალსაზრისით უფრო ეფექტურია არხების კომუტაციის მეთოდი.

ნახ. 9-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.



ნახ. 9. ჰირიდულ ადაპტური ალგორითმის ბლოკ სქემა

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.

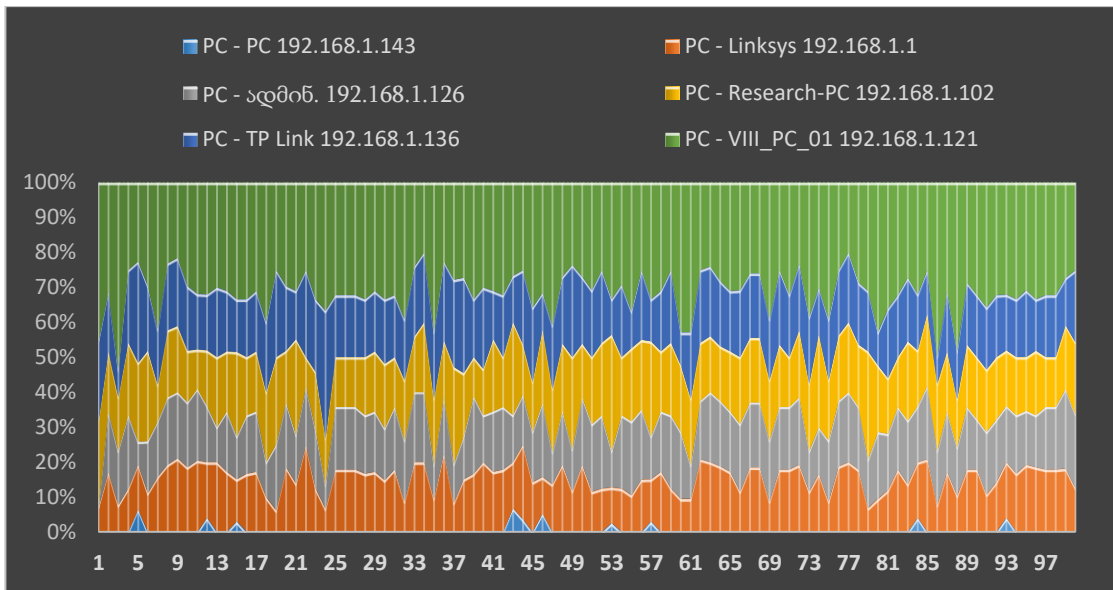


**ნახ. 10. დაყოვნების საშუალო მნიშვნელობა**

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 დაეგზავნოს კავშირის ტრაქტში მონაწილე ყველა კვანძს.

ჩატარებულია შესაბამისი ექსპერიმენტული კვლევა. ნახ. 10-ზე მოცემულია ექსპერიმენტის შედეგად მიღებული დაყოვნების საშუალო მნიშვნელობები 12 და 1542 ბაიტი სიგრძის პაკეტისთვის.





ნახ. 11. კვანძების რაოდენობის (ნახტომების - Hops) გავლენა დაყოვნებაზე

დაკვირვებამ აჩვენა რომ კვანძების რაოდენობა გავლენას ახდენს დაყოვნებაზე ნებისმიერი სიგრძის პაკეტისთვის. ქვემოთ მოცემულ ნახ. 11-ზე ნაჩვენებია ნახტომების (Hops) გავლენა პაკეტის დაყოვნებაზე.

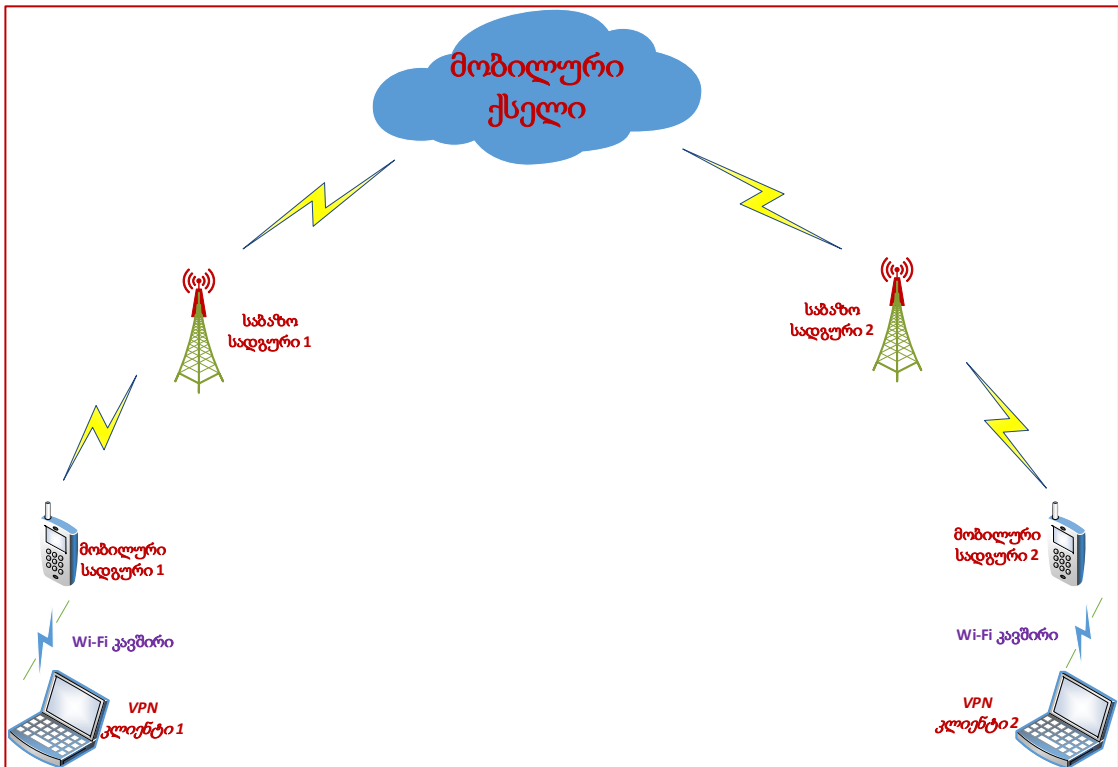
**მეექვსე თავში** - მოცემულია ბოლოდან-ბოლომდე (End-to-End) დაყოვნების გაზომვის ამოცანის საინჟინრო გადაწყვეტა, VPN ტექნოლოგიის გამოყენებით.

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

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;

ჩატარებულია ექსპერიმენტი და მიღებულია დაყოვნების გაზომვის შედეგები. არსებულ ტექნოლოგიებში დაყოვნების უფრო მაღალი სიზუსტით შესაფასებლად მოცემულია გაზომვების ყველა შესაძლო სცენარები.



ნახ. 12. VPN კლიენტების ერთმანეთთან კავშირის სქემა, მობილური ქსელის გამოყენებით

მობილურ სადგურებს შორის ექო მოთხოვნის პაკეტების დაგზავნის უზრუნველსაყოფად განხილული იყო სხვადასხვა მეთოდები. საბოლოოდ მივედით იმ დასკვნამდე რომ ასეთი ექსპერიმენტის ჩასატარებლად, ფინანსურად ყველაზე დაბალბიუჯეტური, 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. 12-ზე.

დადგენილია 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, ეს აისახება ქსელში მონაცემთა გადაცემის სხვადასხვა პარამეტრზე და მათ შორის დაყოვნებაზეც;
3. **ხმაური (ხელშემღები)** - 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.**

## დასკვნები

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

2. აღწერილია მონაცემთა გადაცემის დაყოვნების მაჩვენებლის მნიშვნელობა მომავალი თაობის მობილური ქსელებისთვის და ასევე, გამოკვლეულია ფაქტორები, რომლებიც გავლენას ახდენენ მის სიდიდეზე. განხილულია 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 მეხუთე თაობის მობილური კავშირის ფიჭურ ქსელებში დაყოვნების შესამცირებლად შექმნილი უკვე არსებული და კომერციულ ქსელებში უკვე დანერგილი მექანიზმები: მობილური კავშირის რადიოარხები მრავალსიხვიანი გავრცელებით, სიგნალის ასლების სიმძლავრეების განაწილება მიმღებში, 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 მიმღებამდე. ალგორითმი ითვალისწინებს ალტერნატიული 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.

## დისერტაციის თემაზე გამოქვეყნებული შრომები

1. Беридзе Д., Джорбенадзе М., Квирквелия Ш. Гибридный адаптивный алгоритм для снижения задержек в беспроводной сети. „Научные Горизонты“, 2019, №5(21).
2. კვიციანი შ., ბერიძე ჯ., ჯორბენაძე მ. ჰიბრიდული სახეობის ქსელები და საგნების ინტერნეტი უსადენო ქსელების გამოყენებით. „სეუ და მეცნიერება“, 2017, №6(6), გვ. 404 – 409.
3. კვიციანი შ., ბერიძე ჯ., ჯორბენაძე მ. ფიჭური კავშირის ზოგიერთი პრობლემური საკითხის კვლევა პროგრამირებადი რადიო ტექნოლოგიების გამოყენებით. „სტუ-ის შრომები“, 2017, №3(505), გვ. 41 – 48.
4. კვიციანი შ., ბერიძე ჯ., ჯორბენაძე მ. ფიზიკური პროცესების მონიტორინგი და მართვა სენსორული ქსელების გამოყენებით. ევროპეული სასწავლო უნივერსიტეტის საერთაშორისო სამეცნიერო-პრაქტიკული კონფერენცია. მოხსენებების კრებული. 2017, გვ. 201 – 206.

## Resume

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.