

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

გრიგოლ ბასილაშვილი

მომსახურების ხარისხის (QoS) უზრუნველყოფის მეთოდების
კვლევა მობილური კავშირის ქსელებში

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

წარდგენილი დისერტაციის

ავტორეფერატი

სადოქტორო პროგრამა: "ტელეკომუნიკაცია"

შიფრი: 0402

თბილისი

2018 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში
ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტი
ტელეკომუნიკაციის დეპარტამენტი

ხელმძღვანელი: პროფესორი ჯ. ბერიძე

რეცენზენტები:

დაცვა შედგება 2018 წლის "-----" ----- "-----" საათზე
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკისა და
ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოს 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

სამუშაოს ზოგადი დახასიათება

პრობლემის აქტუალურობა. 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 მომსახურების ხარისხის მოთხოვნებს უყენებს თანამედროვე და მომავალი თაობის მობილურ ქსელებს. მობილური ოპერატორებისთვის უმნიშვნელოვანესია მინიმალური მისაღები ქსელის ოპერირების ხარისხის უზრუნველყოფა. კერძოდ, ეს არის ფუნდამენტური მოთხოვნა მომხმარებელთათვის დამაკმაყოფილებელი სერვისის ხარისხის მიწოდების, რადიო ქსელის რესურსის ეფექტური მართვისა და სპექტრული ეფექტურობის უზრუნველყოფისა.

განსაკუთრებით მობილური ქსელის აქტიურმა ათვისებამ მსოფლიოს მასშტაბით განაპირობა უპრეცედენტო მოთხოვნასოციალური მედიისა და გასართობი პროგრამების მიმართ ნებისმიერ ადგილას და ნებისმიერ დროს. შედაგად, გაიზარდა არა მხოლოდ მოცულობა მობილური ფართოზოლოვანი მონაცემების, არამედ გარდაიქმა მობილური ქსელების შემადგენლობა და სტრუქტურა - მობილური ტრაფიკი რომელიც ტრადიციულად ხმოვან სერვის წარმოადგენდა ეხლა უკვე დომინირებს ვიდეო და მონაცემების სტრიმინგი(DirectTV, Hulu, HBO, Netflix, Youtube, Facebook) და ზოგადად, მულტიმედიური მონაცემების მომხმარებლამდე მიწოდება. ეს ტენდენცია ზრდადია რადგან, მატულობს როგორც პროგრამებისა და აპლიკაციების მრავალფეროვნება ისე მობილური აბონენტების რაოდენობა. ჰეტეროგენულ, მულტიმედიურ მონაცემებს გააჩნიათ განსხვავებული სიხშირული ზოლის, დაყოვნებისა და სინქრონიზაციის (Jitter) მოთხოვნები. ახალი თაობის ქსელები უნდა ითვალისწინებდნენ განსხვავებული ტიპის მონაცემების ინტელექტუალურ

გადაცემას რათა უზრუნველყოს საუკეთესო ხარისხი მომხმარებელთათვის და ასევე მაქსიმალური შემოსავალ–უნარიანობა თითოეული აბონენტისგან. ეს ყოველივე მიიღწევა მომსახურების ხარისხის უზრუნველყოფის (QoS – Quality of Service) მეთოდების მეშვეობით, რომელიც საშუალებას აძლევს მობილურ ქსელებს მართონ ტრაფიკი სხვადასხვა ატრიბუტების და სერვისის კლასების მეხედვით.

უკვე მოახლოებული, მომავლის 5G მეხუთე თაობის მობილური ქსელი, რომლის კომერციული გაშვებაც დაგეგმილია 2018 წლის მეორე ნახევარში, რადიკალურად შეცვლის ადამიანების ცხოვრებას და მუშაობას. მისი მიზანია მომხმარებლებისთვის უფრო მაღალი მონაცემთა გადაცემის სიჩქარის, საიმედოობის, უსაფრთხოების და QoS-ის უზრუნველყოფა. მომავალი მობილური სერვისები დაჯგუფდება ვიდეო დამასიური გამოყენების M2M (Machine to Machine) სერვისის კლასების ირგვლივ. ამიტომაც, 5G ქსელმა უდნა უზრუნველყოს ჰოლისტიკური QoS-ი, მასიური მოხმარების ავტომატური მოწყობილობებისთვის, სადაც უმნიშვნელოვანესი როლი მიენიჭება რადიო რესურსების დროულ და ოპტიმალურ განაწილებას. ერთ–ერთ ასეთ ძალიან კარგ მაგალითს წარმოადგენს, თვით მართვადი ავტომობილები, რომელთა გამართული ფუნქციონირება დამოკიდებული იქნება QoS-ის ყველა მაჩვენებლის, სახელდობრ სისტემის გამტარუნარიანობის, პაკეტების დანაკარგის და დაყოვნების, სინქრონიზაციის მაღალი საიმედოობით მიწოდებაზე.

რადიო შეღწევის ქსელისთვის (RAN), მომსახურების ხარისხის უზრუნველყოფა (QoS) განისაზღვრება, როგორც უნარი მომხმარებლისთვის სერვისის მიწოდების განსაზღვრული მომსახურების დონით. მარტივი მაგალითი QoS-ის არის უნარი მობილური ქსელისა მიაწოდოს უწყვეტი ვიდეო მონაცემთა ნაკადი (Streaming) მომხმარებელს ისე, რომ შესაძლებელი იყოს ვიდეო კონტენტის კომფორტულად და შეუფერხებლად ყურება. რადიო რესურსის მართვა (RRM – Radio Resource Management) არის რიგი

კომპონენტებისა რადიო შეღწევის ქსელში, რომელიც უზრუნველყოფს QoS-ს რადიო რესურსების ეფექტური გამოყენების გზით.

სადისერტაციო ნაშრომში აქცენტი კეთდება QoS-ის უზრუნველყოფაზე ე.წ. რადიო პაკეტების / რესურსების დამგეგმავის (PS – PacketScheduler) და რადიო შეღწევის კონტროლის მექანიზმების მეშვეობით (RAC – Radio Access Control), ძირითადად მეოთხე თაობის LTE (Long Term Evolution) მობილური ქსელის მაგალითზე.

QoS-ის ეფექტური და ზედმეტი დანახარჯების გარეშე უზრუნველყოფა LTE ქსელის ოპტიმიზაციისას, საკმაოდ რთულ ამოცანას წარმოადგენს. შესაბამისად, რადიო რესურსების ეფექტური დაგეგმვა ერთ-ერთ ყველაზე მნიშვნელოვან გამოწვევას წარმოადგენს მობილურ ფართოზოლოვან ქსელში. რადიო რესურსების დამგეგმავს უკაბელო ქსელში დასახული აქვს რამდენიმე მიზანი, რომლებიც უნდა შესრულდეს. მან უნდა უზრუნველყოს სპექტრული ეფექტურობის გაუმჯობესება და ამასთანავე, სერვისის მაქსიმალური ხარისხი შეზღუდული რადიო რესურსების ეფექტური განაწილებისა და დაგეგმარების საფუძველზე, რაზეც მობილური ოპერატორის შემოსავალი და ზოგადად, მისი წარმატებული ოპერირებაა დამოკიდებული. გარდა ამისა, მან ასევე უნდა უზრუნველყოს მომხმარებლის მოთხოვნები QoS-ის გათვალისწინებით. აქედან გამომდინარე ეფექტური რადიო რესურსების დამგეგმავის დიზაინის შემუშავება საკმაოდ რთული ამოცანაა.

სადისერტაციო ნაშრომში, შესწავლილი იქნება სპექტრული ეფექტურობა და მისი გაუმჯობესების გზები, გამოკვლეული იქნება QoS-ის უზრუნველყოფაზე და ქსელის ოპტიმიზირებულ ფუნქციონირებაზე ორიენტირებული რადიო რესურსების სხვადასხვა დამგეგმავების ალგორითმები, რომლებიც იქნება ერთმანეთთან შედარებული, ტესტირებული და გაანალიზებული სხვადასხვა სცენარებისა და სიმულაციების საფუძველზე. და ბოლოს, იქნება შემუშავებული ახალიფსევდო შემთხვევითი განაწილების დაადაპტური რადიო პაკეტების

დამგეგმავის ალგორითმები, რომელიც იქნება გამოკვლეული სისტემის სიმულაციის შედეგების ანალიზის საფუძველზე.

სამუშაოს მიზანი და კვლევის ობიექტი და ამოცანები. დისერტაციის მიზანს წარმოადგენს სატელეკომუნიკაციო მობილური LTE ქსელის სპექტრული ეფექტურობის კვლევა, ფაქტორების შესწავლა, რომლებიც გავლენას ახდენენ სპექტრის ეფექტურ გამოყენებაზე, მის გასაუმჯობესებლად შესწავლილი მეთოდების კვლევა, მომსახურების ხარისხის მცოდნე რადიო რესურსის დამგეგმავის სხვადასხვა ალგორითმების ანალიზი, ახალი ფსევდო შემთხვევითი განაწილების და ადაპტური რადიო პაკეტების დამგეგმავის ალგორითმების შემუშავება და მათი ფუნქციონირების კვლევა.

დასახული მიზნის მიღწევისათვის გადაწყვეტილი იქნა შემდეგი ამოცანები:

1. ძირითადი რადიო არხის ხარისხის მაჩვენებლების ურთიერთ დამოკიდებულების კვლევა, ჩრდილოეთ ამერიკის ერთ-ერთი უმსხვილესი მობილური ოპერატორის, ე.წ. Drive Test-ის მონაცემების ანალიზის საფუძველზე.
2. ზემოთ აღნიშნული ანალიზის საფუძველზე, წარმოდგენილია სპექტრული ეფექტურობის გასაუმჯობესებლად შესწავლილი მეთოდები.
3. გაანალიზებულია სხვადასხვა მომსახურების ხარისხის მცოდნე რადიო რესურსის დამგეგმავის ალგორითმები სისტემური სიმულაციის საფუძველზე.
4. შემუშავებულია ფსევდო შემთხვევითი განაწილების PRA ალგორითმი და სიმულაციის მეშვეობით გამოკვლეულია მისი მუშაობის ეფექტურობა.
5. შემუშავებულია ახალი ადაპტური რადიო პაკეტების დამგეგმავის APF ალგორითმი.

6. გამოკვლეულია APF ალგორითმის ფუნქციონირება სისტემური დონის სიმულაციის მეშვეობით მობილური ქსელის რამდენიმე ძირითადი მაჩვენებლის შეფასების საფუძველზე.
7. გამახვილებულია ყურადღება აღნიშნული ალგორითმის პრაქტიკულ გამოყენებაზე ცოცხალ კომერციულ ქსელში.

კვლევის მეთოდოლოგია. დისერტაციაში დასმული ამოცანების გადაჭრისათვის გამოყენებულ იქნა Drive Test-ის მონაცემების ჩამწერი, წამკითხავიდა ვიზუალიზაციის პროგრამული უზრუნველყოფები – Toms Investigation, Actix Analyzer და MicroStrategy. ასევე გამოყენებულია მათემატიკური ანალიზი, მათემატიკური სტატისტიკის მეთოდები და სისტემური სიმულაციის მრავალფუნქციური პროგრამები – Matlab, LTE Simulator და NESI-ი.

მეცნიერული სიახლე. შემუშავებულ იქნა ახალი ფსევდო შემთხვევითი განაწილების და ადაპტური რადიო პაკეტების დამგეგმავის ალგორითმები.

პრაქტიკული ღირებულება და სამუშაოს შედეგების გამოყენების სფერო. სამუშაოს პრაქტიკულ ღირებულებას წარმოადგენს მიღებული კვლევის შედეგების გამოყენება შრდილოეთ ამერიკის ერთ-ერთი წამყვანი მობილური ოპერატორის ქსელის ოპტიმიზაციის პროცესში სპექტრული ეფექტურობის და ზოგადად, სისტემის მუშაობის გაუმჯობესების მიზნით. ასევე, მიმდინარეობს ნაშრომში შემუშავებული ახალი ადაპტური ალგორითმის დანერგვა ზემოთ აღნიშნულ მობილურ ქსელში ე.წ. თვით ოპტიმიზირებად SON (Self-Organizing Network) ქსელის ფუნქციის გამოყენებით.

სამუშაოს აპრობაცია. სადისერტაციო ნაშრომის ძირითადი შედეგები განიხილებოდა და მოხსენებული იქნა საერთაშორისო სემინარზე და კონფერენციაზე: 1. „მომსახურების ხარისხის უზრუნველყოფის მეთოდების მიმოხილვა მობილურ ქსელში“ (T-Mobile-ის დასავლეთ სანაპიროს რეგიონალური დეპარტამენტი, 7 აპრილი, 2016, სან-ფრანცისკო ა.შ.შ.); 2.

“LTE - ქსელების დაგეგმარების სიმულაციური მეთოდები”. „ენერგეტიკა და ტელეკომუნიკაცია: რეგიონალური პრობლემები და განვითარების პერსპექტივები“ საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია (ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის დეპარტამენტი, საინჟინრო ფაკულტეტი, აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი, 23-25 ოქტომბერი 2015, ქუთაისი);

პუბლიკაციები. დისერტაციის თემაზე 3 სტატია გამოქვეყნებულია რეფერირებად ჟურნალებში.

დისერტაციის სტრუქტურა და მოცულობა. დისერტაცია შედგება: შესავლის, ოთხი თავის, ქვეთავების, დასკვნის და გამოყენებული ლიტერატურის სიისგან. დისერტაციის საერთო მოცულობა შეადგენს 135 გვერდს.

ნაშრომის ძირითადი შინაარსი

პირველ თავში აღწერილია სპექტრული ეფექტურობის მაჩვენებელი მეოთხე თაობის მობილური ქსელისთვის და ასევე, გამოკვლეულია ფაქტორები, რომლებიც გავლენას ახდენენ მის ეფექტურობაზე. ასევე დამუშავებული და გაანალიზებულია ჩრდილოეთ ამერიკის ერთ-ერთი წამყვანი მობილური ოპერატორის ცოცხალი ქსელის ხარისხის სხვადასხვა მაჩვენებლები, რის საფუძველზეც დადგინდა, რომ SINR, MIMOსაანტენო სისტემადა საბაზო სადგურის ლინკის ადაპტაციის მექანიზმის ოპტიმალური ფუნქციონირება უმნიშვნელოვანესი ელემენტებია მომსახურების ხარისხისა და სპექტრული ეფექტურობის გასაუმჯობესებლად.

სპექტრული ეფექტურობა არის უსადენო ქსელის ტევადობის მარტივი მაჩვენებელი. მისი ზოგარი განსაზღვრება არის ბიტური სიჩქარე - გადაცემული ბიტის თანაფარდობა წამზე და სიხშირული ზოლის ერთეულზე, ჰერცზე – Bit / s / Hz ანუ გამტარუნარიანობის თანაფარდობა სიხშირულ ზოლზე. მნიშვნელოვანია გვახსოვდეს, რომ შენონ-ჰარტლის თეორემის (Shannon's Law) მიხედვით, არსებობს ლიმიტი თუ რამდენი ბიტის გადაცემა არის შესაძლებელი კონკრეტულ სიხშირულ ზოლში:

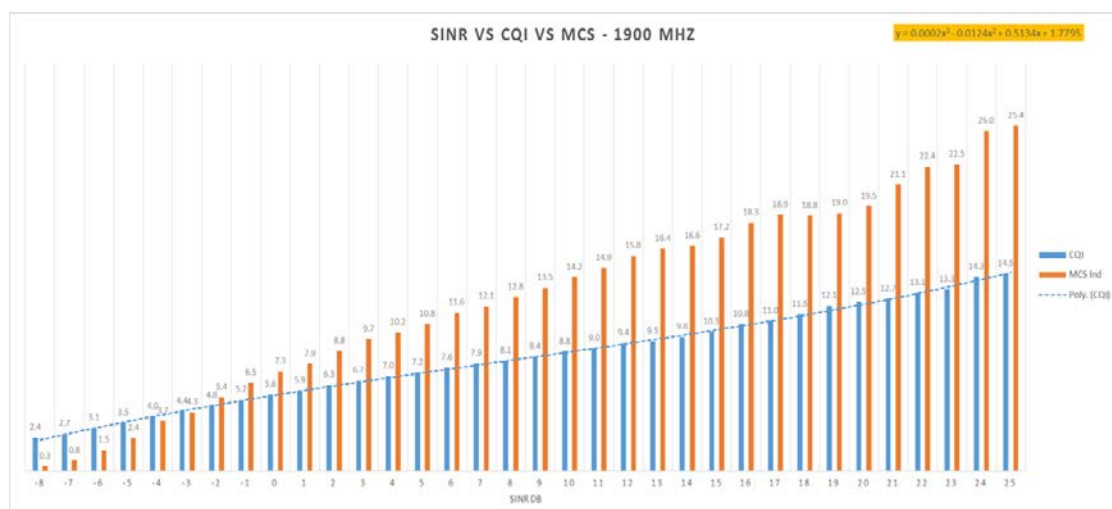
$$C \approx n * B * \text{Log}_2 (1 + S / N)$$

C - არის არხის ტევადობა (ბიტი / წმ.); n - გადამცემი ანტენების რაოდენობა;
B - სიხშირული ზოლი (Hz); S / N - სიგნალის ხმაურთან თანაფარდობა.

ზემოთ აღნიშნული თეორემა განსაზღვრავს მაქსიმალურ მაჩვენებელს, რა სიჩქარითაც ინფორმაცია შეიძლება გადაიცეს საკომუნიკაციო არხში, ჩვენს შემთხვევაში საჰაერო ინტერფეისით, კონკრეტულ სიხშირულ ზოლში ხმაურის არსებობის პირობებში. იგი განსაზღვრავს შეცდომების გარეშე მაქსიმალურ ინფორმაციას დროის ერთეულში, რომელიც შეიძლება გადაიცეს კონკრეტულ სიხშირულ ზოლში, ხმაურის ინტერფერენციის არსებობისას, იმის გათვალისწინებით, რომ

სიგნალის სიმძლავრე შეზღუდილია და რომ გაუსის ხმაურის პროცესი ხასიათდება წინასწარ ცნობილი სიმძლავრის სპექტრული სიმკვრივით (PSD).

ზემოთ ნახსენები კომერციული ქსელის ხარისხის მაჩვენებლების კორელაცია შემდეგნაირად შეიძლება შევაჯამოთ რამდენიმე ძირითადი გრაფიკის წარდგენის საფუძველზე. ქვემოთ მოცემულ გრაფიკზე ნაჩვენებია SINR, CQI და MCS (Modulation and Coding Scheme) მაჩვენებლების კორელაცია 1900MHz-იან სიხშირულ ზოლში გამოყოფილი 20 MHz-ნი არხის მაგალითზე. წყვეტილი მრუდი კი ასახავს SINR და CQI-ზე დამოკიდებულების ფუნქციას მესამე ხარისხის პოლინომიური განტოლების გამოყენებით, საიდანაც კარგად ჩანს თუ როგორ მატულობს CQI ინდექსი, დაღმავალ არხზე მობილური სადგურის მიერ გაზომილი SINR მაჩვენებლის ზრდასთან ერთად. შესაბამისად, იზრდება საბაზო სადგურის ლინკის ადაპტაციის მექანიზმის მიერ შერჩეული მოდულაციისა და კორიდეების სქემის ინდექსიც. MCS ინდექსი კი, თავის მხრივ განაპირობებს 1 მ.წმ.-ანი სატრანსპორტო ბლოკის (TBS – Transport Block Size) სიდიდეს და შესაბამისად, გადასაცემი ბიტების რაოდენობას, რაც აისახება ფიჭის გამტარუნარიანობასა და სპექტრულ ეფექტურობაზე.



ნახ.1. SINR – CQI – MCS-ის ურთიერთ დამოკიდებულების გრაფიკი 1900MHz სიხშირული ზოლის შემთხვევაში

როგორც ბუნებრივი გაგრძელება აღნიშნული თემატიკისა, ქვემოთ მოცემულია გრაფიკები სადაც ნაჩვენებია SINR, MCS და დაღმავალ არზე მობილური სადგურის გამტარუნარიანობის (DL UE Throughput in Kbps) მაჩვენებლების კორელაცია 1900 MHz-ანი სიხშირული ზოლის მაგალითზე. საიდანაც, კარგად ჩანს თუ როგორ მატულობს დროის ერთეულში (1 წმ.-ში) გადაცემული ბიტების რაოდენობა მომხმარებლის მიმართულებით მოდულაციისა და კოდირების სქემის ხარისხის ზრდასთან ერთად:

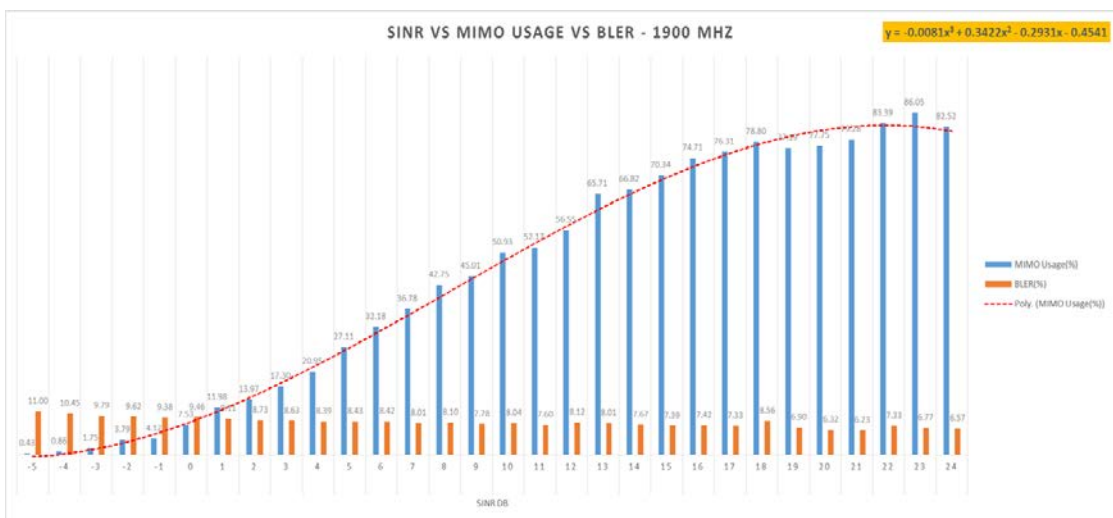


ნახ.2. SINR – MCS – UE Throughput ურთიერთ დამოკიდებულების გრაფიკი 1900MHz სიხშირული ზოლის შემთხვევაში

მომდევნო ქვემოთ მოცემულ გრაფიკზე ნაჩვენებია SINR, BLER და MIMO (Multiple Input Multiple Output) სივრცული მულტიპლექსირების უტილიზაციის

მაჩვენებლების კორელაცია 1900 MHz-იან სიხშირული ზოლის მაგალითზე. საიდანაც, ნათლად ჩანს საბაზო სადგურის ლინკის ადაპტაციის მექანიზმის კონსერვატიულია დამცავი ოპერირება (აღნიშნული eNB-ის ფუნქცია მის მწარმოებელზეა დამოკიდებული და უმეტეს შემთხვევაში ოპერატორის მიერ მასზე პარამეტრების ცვლილებით ზემოქმედება არ არის შესაძლებელი). რაც გამოიხატება BLER მაჩვენებლის სიდიდით, რომელიც 10%-ზე ნაკლებია (აღნიშნული ზღვარი აღებულია

LTE სისტემის შემუშავების პროცესში როგორც ოპტიმალური ნიშნული შეცდომის ალბათობისა გადაცემის ფიზიკურ და MAC ანუ პირველ და მეორე დონეზე), უფრო მეტიც 6.2%-მდეც კი ჩამოდის 21 დბ SINR ნიშნულზე. შესაბამისად, ეს მეტყველებს არხის კოდირების პროცესში არასაჭირო სიჭარბის - ბიტების არსებობაზე, რაც ამცირებს ეფექტური კოდირების ფარდობის (Coding Rate) სიდიდეს და გადაცემული სასარგებლო ინფორმაციული ბიტების რაოდენობას. რაც, თავისმხრივ ნეგატიურად აისახება ე.წ. სიხშირული სპექტრის ეფექტურობის მაჩვენებელზე. ხოლო, წყვეტილი მრუდი კი ასახავს SINR-ის MIMO უტილიზაციაზე (Rank Indicator-2) დამოკიდებულების ფუნქციას მესამე ხარისხის პოლინომიური განტოლების გამოყენებით, საიდანაც კარგად ჩანს თუ როგორ მატულობს ე.წ. MIMO-ს სივრცითი შრეების მექანიზმის გამოყენება, დადმავალ არხზე მობილური სადგურის მიერ გაზომილი SINR მაჩვენებლის ზრდასთან ერთად. აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ MIMO-ს ორი ან მეტი სივრცითი შრის მულტიპლექსირების გამოყენებით საგრძნობლად ვზრდით გადაცემული სასარგებლო ინფორმაციული ბიტების რაოდენობას, შესაბამისად იზრდება სისტემის გამტარუნარიანობა და სიხშირული სპექტრის ეფექტურობის მაჩვენებელიც.



ნახ.3. SINR – MIMO – BLER ურთიერთ დამოკიდებულების გრაფიკი 1900MHz სიხშირული ზოლის შემთხვევაში

მეორე თავში აღწერილი და გამოკვლეულია დროით სივრცეში მომუშავე რადიო პაკეტების დამგეგმავის სხვადასხვა ალგორითმების ფუნქციონირება. სიმულაციის შედეგებზე დაყრდნობით, შედარებული და გაანალიზებულია RR, PF და DPS სქემების ეფექტური მუშაობა რეალურ დროში მომუშავე სერვისებისთვის. მათი ეფექტური მუშაობა შეფასდა ოთხი ძირითადი სისტემის მაჩვენებლის გამოყენებით – კერძოდ, სისტემის გამტარუნარიანობა, პაკეტების დანაკარგის თანაფარდობა (PLR), რესურსების სამართლიანი განაწილება და სისტემის საშუალო დაყოვნება. შესაბამისად, სიმულაციის შედეგებმა გვიჩვენა, DPS ალგორითმის გამოყენება უფრო ეფექტურია, სისტემის მაქსიმალური გამტარუნარიანობის, მინიმალური პაკეტების დანაკარგის თანაფარდობისა და სისტემის საშუალო დაყოვნების თვალსაზრისით. ასევე, DPS ალგორითმის გამოყენებით შესაძლებელია უკეთესი კომპრომისის მიღწევა სისტემის ეფექტურობის გაზრდასა და სამართლიანობას შორის.

აღნიშნულ სიმულაციაში შემდეგი პირობებია დაშვებული: სისტემას საზღვრის ბოლო არ გააჩნია; მობილური სადგური თანაბარი და მუდმივი სიჩქარით გადაადგილდება – 30 კმ/სთ; მყისიერი SINR სიდიდე კონკრეტულ PRB-ზე დაანგარიშებულია ცენტრალურ ქვე გადამზიდ სიხშირეზე, რადგანაც არსებობს მინიმალური განსხვავებები მრავალსიხვიური მილევის გამო PRB-ის ქვე გადამზიდ სიხშირეებს შორის; სელთა შორის ინტერფერენცია მუდმივია; სიხშირის გამეორების კოეფიციენტი 1 ტოლია; CQI მაჩვენებელი ეგზავნება საბაზო სადგურს თითოეულ PRB-ზე ყოველ დაგეგმვის ინტერვალში დაყოვნების და შეცდომების გარეშე; ასევე აღსანიშნავია, როდესაც ახალი CQI მაჩვენებელი მიუწვდომელია, საბაზო სადგური იყენებს ყველაზე ბოლოს მიღებულ მონაცემებს; ყველა გადაცემული პაკეტი სწორედ არის მიღებული და დეკოდირებული მობილური სადგურის მიერ.

აღნიშნული სიმულაციის დეტალური პარამეტრებია:

ცხრილი. 1. სიმულაციის პარამეტრები

<i>Simulation Parameters</i>	<i>Values</i>
Cellular layout	7 hexagonal cells
Radius	100 m
Bandwidth	5 MHz
Carrier frequency	2 GHz
Mode of operation	FDD
Number of PRBs	25
Number of sub-carriers per PRB	12
Total number of Sub-carriers	300
Sub-carrier spacing	15 kHz
Scheduling interval (TTI)	1 ms
Number of OFDMA symbols per TTI	14 (Normal CP)
Total eNB transmit power	43.01 dBm
Path Loss	Cost 231 Hata model
Shadow Fading	Gaussian lognormal distribution
Multi-path	Rayleigh fading
Modulation and Coding Scheme	QPSK, 16QAM, and 64QAM
Data Traffic	1 Mbps Constant Rate Real time
Packet Scheduling Algorithm	The DPS, PF, and RR Algorithm
User's velocity	30 km/h
Simulation Time	100 ms
Erroneous CQI type	Perfect CQI knowledge at eNB
Buffer Threshold	20 ms

მესამე თავში გაანალიზებულია მცირე გამოთვლითი სირთულის მქონე ეფექტურ სქემებზე დაფუძნებული QOGS პაკეტების დაგეგმვის ალგორითმები. ერთ-ერთი ასეთი ე.წ. კომბინირებული PGS ალგორითმის მუშაობის ეფექტურობა შეფასდა სიმულაციის შედეგების ანალიზის საფუძველზე ორ კარგად ცნობილ Max-Rate და M-LWDF სქემებთან შედარებით LTE სისტემისთვის. სიმულაციის შედეგებმა გვიჩვენა, რომ აღნიშნული PGS ალგორითმი ინარჩუნებს კარგ და სტაბილურ პაკეტების დაგეგმვის უნარს, მაშინ როდესაც Max-Rate და M-LWDF ალგორითმების

მუშაობის ეფექტურობა მნიშვნელოვნად უარესდება მომხმარებლების მობილურობის და CQI მაჩვენებლის უკუკავშირის დაყოვნებასთან ერთად.

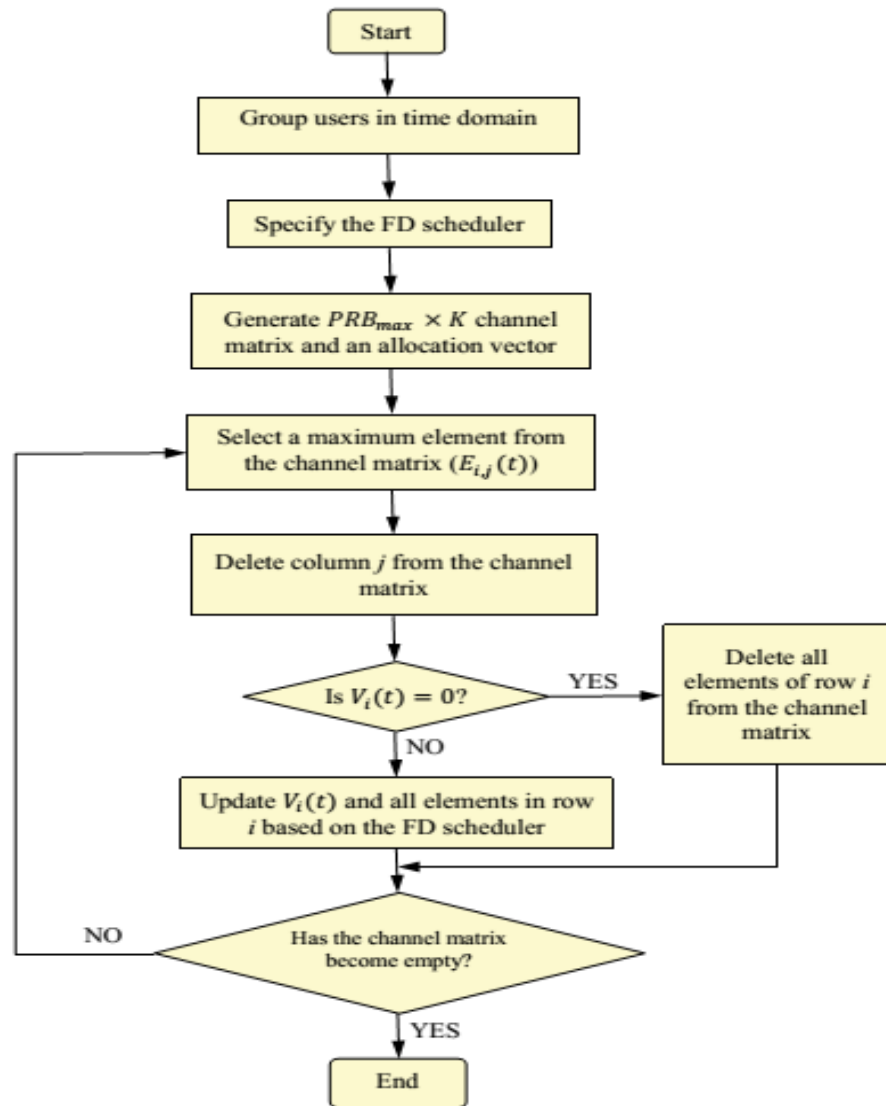
PGS ალგორითმი შემუშავებული იქნა დროითი სივრცის დაჯგუფების დამგეგმავის სქემაზე დაყრდნობით. იგი იყენებსორ კარგად ცნობილ და ზემოთ ხსენებულ პაკეტების დაგეგმვის ალგორითმს: Max-Rate და M-LWDF ალგორითმებს, იმ მიზნით რომ მაქსიმალურად ეფექტური გახადოს სისტემის მუშაობა QoS მოთხოვნებზე კომპრომისის გაკეთების გარეშე. აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ Max-Rate და M-LWDF ალგორითმები მოდიფიცირებულ იქნა მრავალ ქვე-სიხშირულ LTE სისტემასთან სამუშაოდ. M-LWDF ალგორითმი გეგმავს მომხმარებელს $\mu(t)$ -ის მაქსიმუმ მაჩვენებლის მიხედვით:

$$\mu_{i,j}(t) = \alpha_i * W_i(t) * \frac{r_{i,j}(t)}{R_i(t)}$$

$$\alpha_i = -\frac{(\log \delta_i)}{T_i}$$

სადაც $\mu(t)$ i მომხმარებლის პრიორიტეტია j PRB-ზე; α – QoS მოთხოვნა; $W(t)$ – HoL პაკეტის დაყოვნება; $r(t)$ – მყისიერი მონაცემთა გადაცემის სიჩქარე; $R(t)$ – მომხმარებლის საშუალო გამტარუნარიანობა; δ – PLR ზღვარი, ხოლო T კი ბუფერის დაყოვნების ზღვარია.

Max-Rate ალგორითმი მოსალოდნელია, რომ იყოს ეფექტური მაღალი გამტარუნარიანობის მისაღწევად, იმის გამო, რომ იგი ყოველთვის უმაღლეს პრიორიტეტს ანიჭებს საუკეთესო რადიო არხის მქონე მობილურ სადგურს. Max-Rate ალგორითმთან შედარებით კი M-LWDF ალგორითმი უფრო სრულყოფილად უზრუნველყოფს QoS მოთხოვნებს რეალური დროის სერვისებისთვის, რადგან იგი სრულფასოვნად ითვალისწინებს პაკეტის დაყოვნების ინფორმაციას, მყისიერ მონაცემთა გადაცემის სიჩქარეს და მომხმარებელთა QoS პარამეტრებს. PGS ალგორითმის მუშაობის სქემა მოცემულია ნახაზზე:



ნახ.4. PGS ალგორითმის მუშაობის სქემა თითოეულ TTI-ზე

PGS ალგორითმის მუშაობა თითოეული დაგეგმვის ინტერვალში სამი საფეხურისგან შედგება.

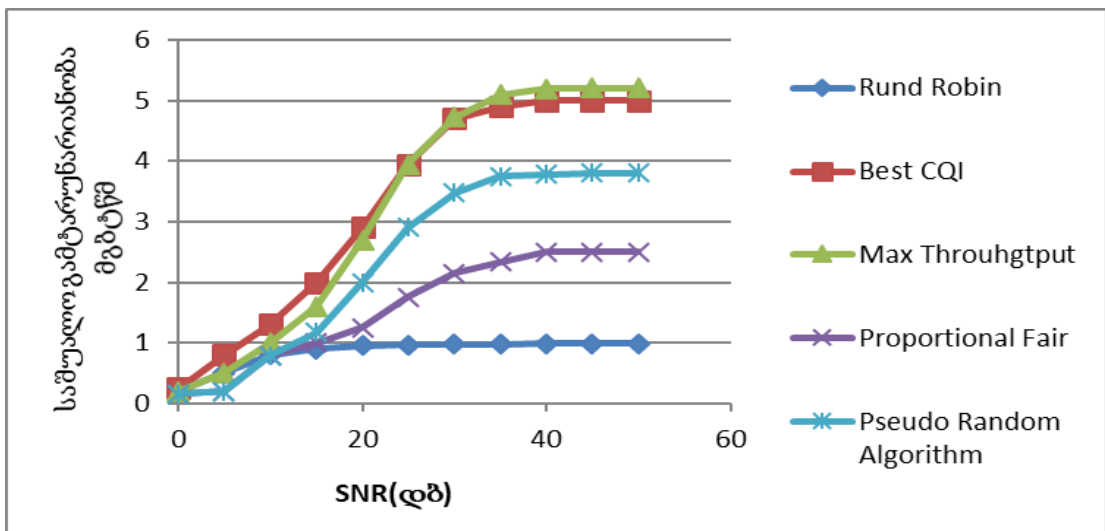
1. t TTI-ში, თუ t კენტი რიცხვია, მაშინ M-LWDF ალგორითმი იქნება არჩეული როგორც სიხშირული სივრცის (FD) დამგეგმავი, წინააღმდეგ შემთხვევაში, Max-Rate ალგორითმი აირჩევა. ერთზე მეტი დაგეგმვის ალგორითმი მომიჯანვე TTI-ში მონაცვლეობით ავსებენ ერთმანეთს. მხოლოდ ერთი დაგეგმვის ალგორითმი გამოიყენება თითოეულ TTI-ში, რათა გამოთვლითი სირთულე არ გაიზარდოს.

2. კონკრეტული FD დაგეგმვის ალგორითმის მიხედვით გამოითვლება თითოეული მომხმარებლის პრიორიტეტი ყოველ PRB-ზე და გენერირდება $PRB_{max} * K$ არხის მატრიცა. ამ მატრიცის თითოეული ელემენტი წარმოადგენს პრიორიტეტს ყოველი მომხმარებლისათვის თითოეულ PRB-ზე. ამასობაში, ყოველი მომხმარებლისთვის საჭირო რაოდენობის PRB-ები გამოითვლება და ეს ინფორმაცია ინახება შესაბამის რესურსების გამოყოფის ვექტორში $V(t)$.
3. არხის მატრიციდან აირჩევა მაქსიმალური მნიშვნელობის მქონე ელემენტი $E(t)$. რაც ნიშნავს იმას, რომ i მომხმარებელს ექნება უმაღლესი პრიორიტეტი j PRB-ზე და სისტემის ეფექტურობა იქნება გაზრდილი j PRB-ის i მომხმარებლისთვის მინიჭების საფუძველზე. შესაბამისად, ყველა j სვეტის ელემენტი იქნება წაშლილი და რიგი i იქნება ამოღებული არხის მატრიციდან, იმ პირობით თუ რესურსების გამოყოფის ვექტორის მიხედვით გათვალისწინებული საჭირო რაოდენობის PRB-ები მინიჭებული იქნა i მომხმარებლისთვის. ამის შემდეგ, კონკრეტული FD დაგეგმვის ალგორითმის მიხედვით, არხის მატრიცაში ხდება ელემენტების განახლება, ხოლო რესურსების გამოყოფის ვექტორი k_i განახლდება თითოეული მობილური სადგურის ბუფერის ინფორმაციაზე დაყრდნობით. აღნიშნული ბოლო საფეხური მეორდება, მანამდე სანამ ყველა მომხმარებელს არ მიენიჭება საჭირო რაოდენობის PRB ან ყველა დარჩენილი ხელმისაწვდომი PRB არ მიენიჭებათ მომხმარებლებს.

მეთხე თავში შემუშავებულია ახალი რადიო პაკეტების დაგეგმვის ალგორითმები, რომლებიც ადაპტურად შეცვლის ლინკის ადაპტაციის პარამეტრებს და პაკეტების დაგეგმვის სქემებს, სხვადასხვა შესავალი ცვლადების გათვალისწინებით, რათა მაქსიმალურად გაზარდოს სპექტრული ეფექტურობა და ასევე, გააუმჯობესოს ზოგადად სისტემის ეფექტური მუშაობა. პირველი ასეთი ალგორითმია ფსევდო შემთხვევითი

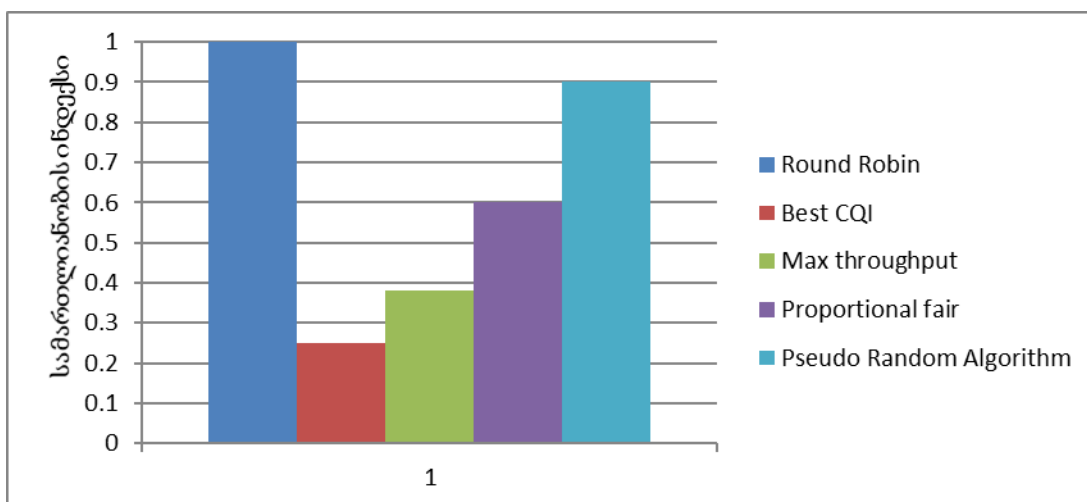
განაწილების PRA სქემა. მისი მეშვეობით მაღალი SNR-ის შემთხვევაში საჭირო მონაცემთა გადაცემის სიჩქარის უზრუნველყოფა მიიღწევა მოდულაციის მაღალი რიგის და დაბალი სიჩქარის ხელშემშლამდგრადი კოდირების გამოყენებით, ხოლო დაზოგილი სიხშირული რესურსი გადაეცემა დაბალი SNR-ის მქონე აბონენტებს. ამით მიიღწევა ასეთი აბონენტებისათვის გადაცემის სიჩქარის გაზრდა ფიქსში არსებულ, მიწოდებულ ნორმალიზებულ საშუალო სიჩქარემდე. აღნიშნული ფსევდო შემთხვევითი განაწილების ალგორითმი საშუალებას იძლევა ფიქსის დატვირთულობის პირობებში მომხმარებლები ჩაყენებული იქნან თანაბარ პირობებში - ფიქსის ნებისმიერ წერტილში მყოფი აბონენტი მიიღებს სიჩქარეს არანაკლებ ნორმალიზებულ საშუალო სიჩქარისა.

ალგორითმის მოსალოდნელი შედეგები და სხვა ალგორითმებთან შედარება მოცემულია ქვემოთ ნაჩვენებ გრაფიკზე. სისტემის საშუალო გამტარუნარიანობის დამოკიდებულება სიგნალ/ხმაურის ფარდობაზე სხვადასხვა ალგორითმებისათვის:



ნახ.5. საშუალო გამტარუნარიანობის დამოკიდებულება სიგნალ/ხმაურის ფარდობაზე სხვადასხვა ალგორითმებისათვის

ხოლო ქვემოთ მოცემულია სისტემის სამართლიანობის ინდექსი სხვადასხვა ალგორითმებისთვის:



ნახ.6. სისტემის სამართლიანობის ინდექსი სხვადასხვა ალგორითმებისთვის

შედეგების ანალიზიდან ჩანს, რომ ნაშრომში შემოთავაზებული ფსევდო შემთხვევითი განაწილების ალგორითმი PRA უზრუნველყოფს პროპორციული განაწილების ალგორითმზე უფრო მაღალ საშუალო სიჩქარეს და სამართლიანობის ინდექსით უახლოვდება რაუნდ-რობინის ალგორითმის მაჩვენებელს.

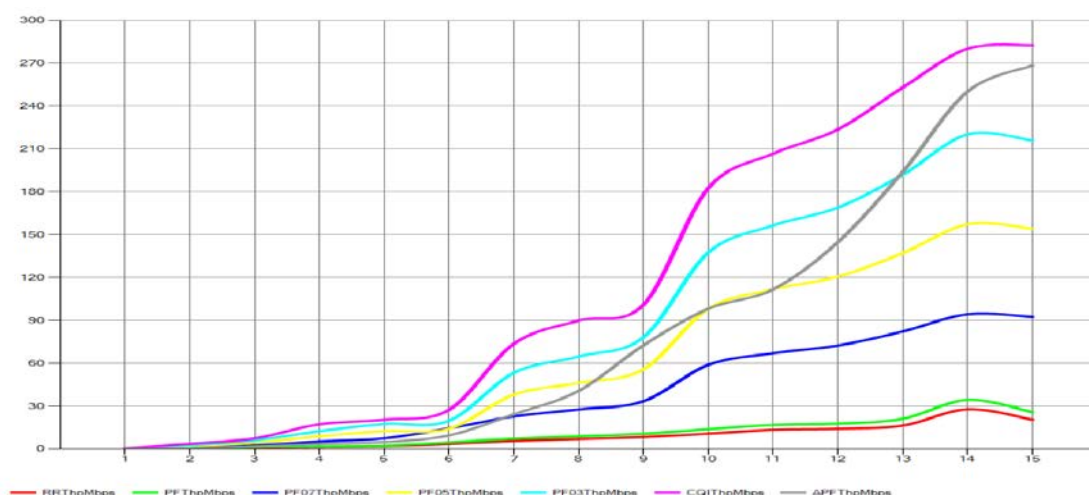
ასევე შემუშავებულ იქნა ახალი ადაპტური რადიო პაკეტების დაგეგმვის ალგორითმი, იმ მიზნით რომ მაქსიმალურად გაზრდილიყო სისტემის ტევადობა, გაუმჯობესებულიყო სპექტრული ეფექტურობა და ასევე, ზოგადად სისტემის ეფექტური მუშაობა. მოცემული ამოცანა მიიღწევა პაკეტების დაგეგმვის სქემების ადაპტური შეცვლით სხვადასხვა შესავალი ცვლადების გათვალისწინებით. აღნიშნული შესავალი ცვლადებია: მობილური სადგურის მიერ გამოგზავნილი CQI მაჩვენებელი, მანძილი მობილურ და საბაზო სადგურს შორის დაფიჭისდატვირთვა, რომელთა მიხედვითაც ნაშრომში შემუშავებული დამგეგმავი ადაპტურად შეცვლის პაკეტების დამგეგმავ სქემებს, რათა ოპტიმალურად მოახდინოს რადიო რესურსების განაწილება უაღრესად არაპროგნოზირება დუსადენო მობილური ქსელის ფარგლებში. ალგორითმის ლოგიკური ფუნქციონირება შემდეგნაირად შეიძლება გამოისახოს:

$$\alpha = \begin{cases} 1 & \text{if } T_{Cell} < 1.5 \text{ and } N_{UE} < 90, \\ 0.9 & \text{if } T_{Cell} > 1.5 \text{ and } N_{UE} > 90, \\ 1 & \text{if } Q_{Avg} < 4, \\ 0.9 & \text{if } 4 < Q_{Avg} \leq 5, \\ 0.7 & \text{if } 5 < Q_{Avg} \leq 6, \\ 0.5 & \text{if } 6 < Q_{Avg} \leq 7, \\ 0.3 & \text{if } 7 < Q_{Avg} \leq 8, \\ 0.1 & \text{if } 8 < Q_{Avg} \leq 10, \\ 0 & \text{if } 10 < Q_{Avg}. \end{cases}$$

სადაც T_{Cell} სისტემის გამტარუნარიანობაა გამოხატულია მეგა ბიტ/წმ-ში(Mbps), Q_{Avg} - რადიო არხის ხარისხის მაჩვენებელი, რომელიც გამოხატულია ინდექსის ერთეულით, ხოლო N_{UE} - მობილური სადგურების რაოდენობაა.

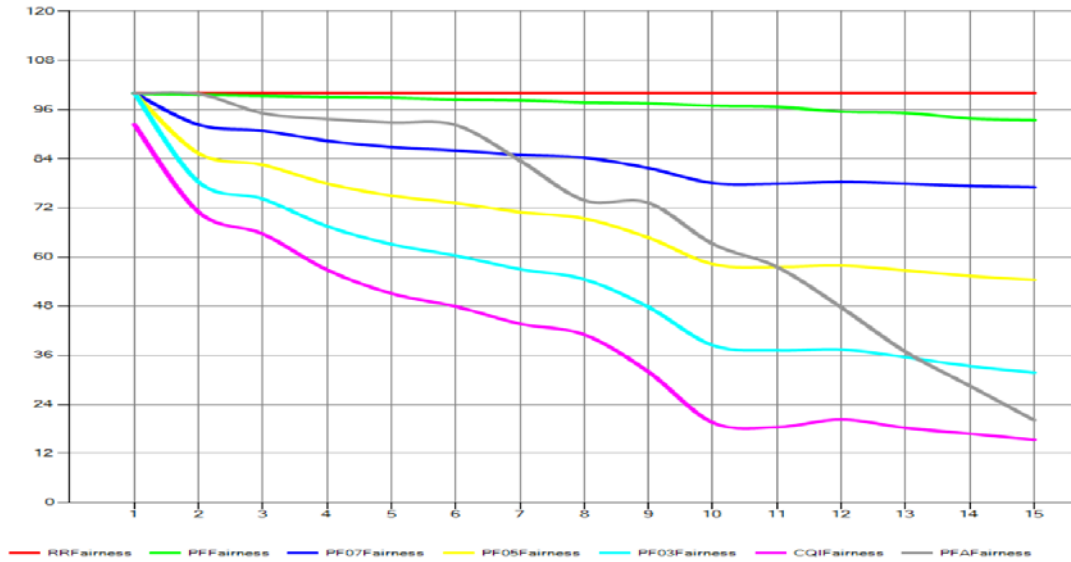
ამ საკითხთან დაკავშირებით ჩატარდა სისტემური დონის სიმულაცია, სადაც გამოკვლეულ იქნა შვიდი სხვადასხვა ალგორითმის - RR, PF, PF07, PF05, PF03, საუკეთესო CQI და APF - ფუნქციონირება ოთხი მნიშვნელოვანი ქსელის მაჩვენებლის - სისტემის გამტარუნარიანობის, სამართლიანობის, სისტემის დაყოვნების და რადიო რესურსის ეფექტური განაწილების შეფასების საფუძველზე.

ქვემოთ მოცემულ გრაფიკებზე კი ნაჩვენებია აღნიშნული სისტემის მაჩვენებლების შეფასების მრუდები. გამტარუნარიანობის (Mbps) CQI (Ind.) მაჩვენებელთან დამოკიდებულების მრუდი:



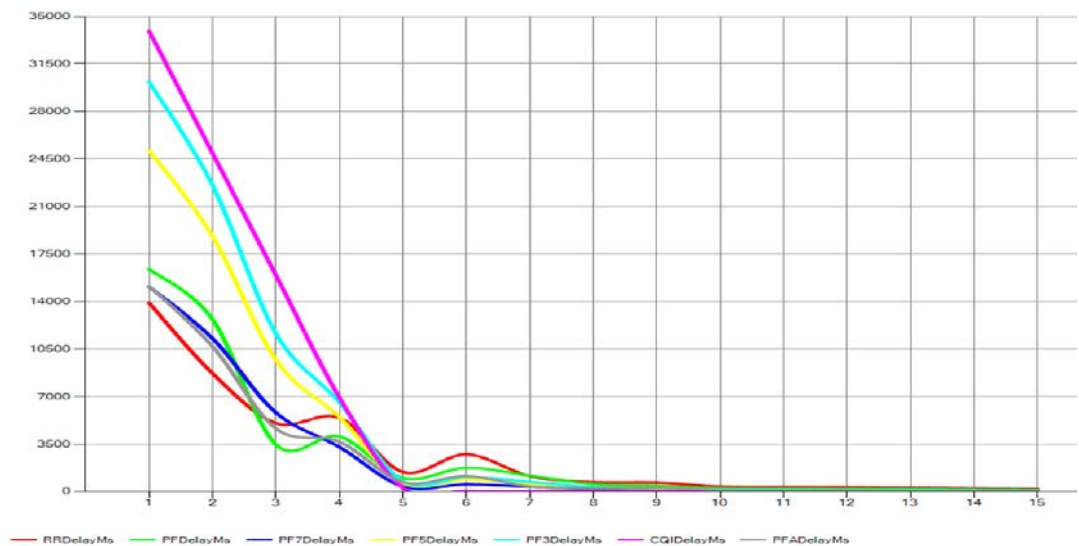
ნახ.7. სისტემის გამტარუნარიანობის (Mbps) CQI (Ind.) მაჩვენებელთან დამოკიდებულების მრუდი

სისტემის სამართლიანობის CQI (Ind.) მაჩვენებელთან დამოკიდებულების მრუდი:



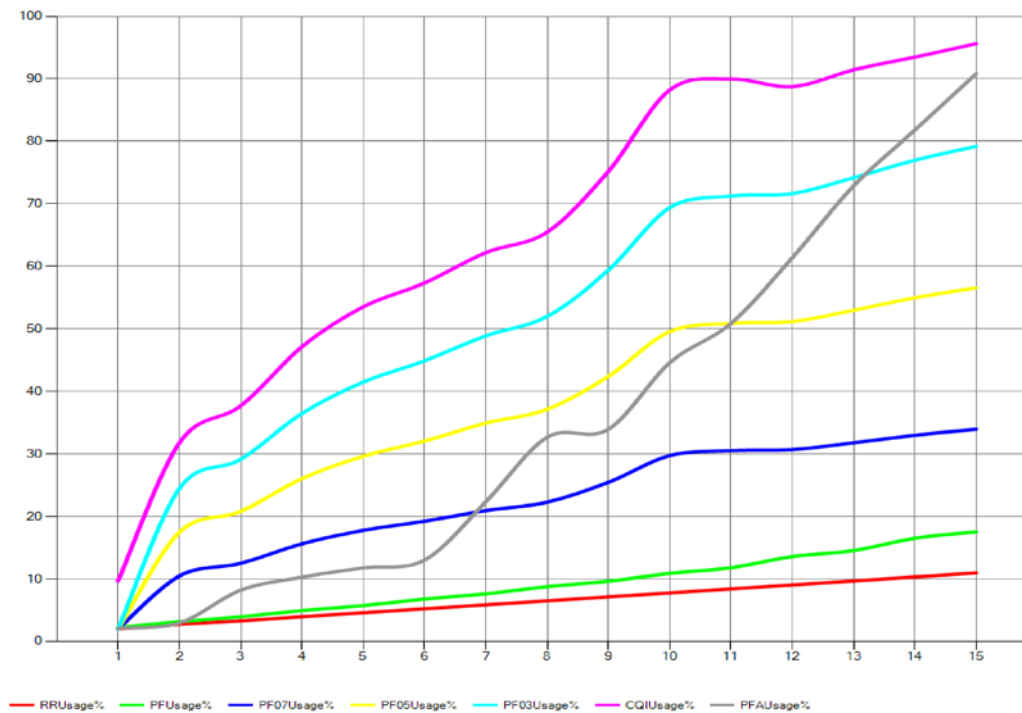
ნახ.8. სისტემის სამართლიანობის CQI (Ind.) მაჩვენებელთან დამოკიდებულების მრუდი

სისტემის დაყოვნების (მ.წმ.) CQI (Ind.) მაჩვენებელთან დამოკიდებულების მრუდი:



ნახ.9. სისტემის დაყოვნების (მ.წმ.) CQI (Ind.) მაჩვენებელთან დამოკიდებულების მრუდი

და ბოლოს რადიო რესურსის ეფექტური განაწილების CQI (Ind.) მაჩვენებელთან დამოკიდებულების მრუდი:



ნახ.10. რადიო რესურსის ეფექტური განაწილების CQI (Ind.) მაჩვენებელთან დამოკიდებულების მრუდი

სიმულაციის შედეგებმა გვიჩვენა, რომ ნაშრომში შემუშავებული ადაპტური პროპორციულ სამართლიანი (APF) რადიო პაკეტების დაგეგმვის ალგორითმი უზრუნველყოფს უკეთეს ბალანს სისტემის ტევადობასა და სამართლიანობას შორის. ასევე აღსანიშნავია, რომ APF ალგორითმის გამოყენებით საგრძნობლად ვაუმჯობესებთ სპექტრულ ეფექტურობას, ზოგადად სისტემის ეფექტურ მუშაობას და ამავდროულად, ვინარჩუნებთ სისტემის სამართლიანობის მისაღებ დონეს.

დეტალური სიმულაციის პარამეტრები მოცემულია ცხრილში 2:

ცხრილი.2. სიმულაციის პარამეტრები

Simulation Parameters	Values
Cellular layout	1 Cell
Radius (Range)	0 - 15 km
Bandwidth	20 MHz
Carrier frequency	1900 MHz
Mode of operation	FDD
MIMO Mode	4x4
Number of PRBs	100
Number of sub-carriers per PRB	12
Total number of Sub-carriers	1200
Sub-carrier spacing	15 kHz
Scheduling interval (TTI)	1 ms
Number of OFDMA symbols per TTI	14 (Normal CP)
Total eNB transmit power	52.04 dBm
Path Loss	Cost 231 Hata model
Shadow Fading	Gaussian lognormal distribution
Multi-path	Rayleigh fading
Modulation and Coding Scheme	QPSK, 16QAM, and 64QAM
Packet Scheduling Algorithm	RR, PF, PF07, PF05, PF03, Best CQI and APF
Simulation Frequency	1 sec
Simulation Duration	3 hours
Erroneous CQI type	Perfect CQI knowledge at eNB

დასკვნა

1. ნაშრომში აღწერილია სპექტრული ეფექტურობის მაჩვენებელი მეოთხე თაობის მობილური ქსელისთვის და ასევე, გამოკვლეულია ფაქტორები, რომლებიც გავლენას ახდენენ მის ეფექტურობაზე.
2. დამუშავებული და გაანალიზებულია ჩრდილოეთ ამერიკის ერთ-ერთი წამყვანი მობილური ოპერატორის ცოცხალი ქსელის ხარისხის სხვადასხვა მაჩვენებლები, რის საფუძველზეც დადგინდა, რომ SINR, MIMO საანტენო სისტემა და საბაზო სადგურის ლინკის ადაპტაციის მექანიზმის ოპტიმალური ფუნქციონირება უმნიშვნელოვანესი ელემენტებია მომსახურების ხარისხისა და სპექტრული ეფექტურობის გასაუმჯობესებლად.
3. აღწერილი და გამოკვლეულია დროით სივრცეში მომუშავე რადიო პაკეტების დამგეგმავის სხვადასხვა ალგორითმების ფუნქციონირება.
4. სიმულაციის შედეგებზე დაყრდნობით, შედარებული და გაანალიზებულია RR, PF და DPS სქემების ეფექტური მუშაობა რეალურ დროში მომუშავე სერვისებისთვის. მათი ეფექტური მუშაობა შეფასდა ოთხი ძირითადი სისტემის მაჩვენებლის გამოყენებით – კერძოდ, სისტემის გამტარუნარიანობა, პაკეტების დანაკარგის თანაფარდობა (PLR), რესურსების სამართლიანი განაწილება და სისტემის საშუალო დაყოვნება. შესაბამისად, სიმულაციის შედეგებმა გვიჩვენა, DPS ალგორითმის გამოყენება უფრო ეფექტურია, სისტემის მაქსიმალური გამტარუნარიანობის, მინიმალური პაკეტების დანაკარგის თანაფარდობისა და სისტემის საშუალო დაყოვნების თვალსაზრისით. ასევე, DPS ალგორითმის გამოყენებით შესაძლებელია უკეთესი კომპრომისის მიღწევა სისტემის ეფექტურობის გაზრდასა და სამართლიანობას შორის.
5. გაანალიზებულია მცირე გამოთვლითი სირთულის მქონე ეფექტურ სქემებზე დაფუძნებული QOQS პაკეტების დაგეგმვის ალგორითმები.

ერთ–ერთი ასეთი PGS ალგორითმის მუშაობის ეფექტურობა შეფასდა სიმულაციის შედეგების ანალიზის საფუძველზე ორ კარგად ცნობილ Max-Rate და M-LWDF სქემებთან შედარებით LTE სისტემისთვის. სიმულაციის შედეგებმა გვიჩვენა, რომ აღნიშნული PGS ალგორითმი ინარჩუნებს კარგ და სტაბილურ პაკეტების დაგეგმვის უნარს, მაშინ როდესაც Max-Rate და M-LWDF ალგორითმების მუშაობის ეფექტურობა მნიშვნელოვნად უარესდება მომხმარებლების მობილურობის და CQI მაჩვენებლის უკუკავშირის დაყოვნებასთან ერთად.

6. შემუშავებულია ფსევდო შემთხვევითი განაწილების PRA ალგორითმი. მისი მეშვეობით მაღალი SNR-ის შემთხვევაში საჭირო მონაცემთა გადაცემის სიჩქარის უზრუნველყოფა მიიღწევა მოდულაციის მაღალი რიგის და დაბალი სიჩქარის ხელშეშლამდგრადი კოდირების გამოყენებით, ხოლო დაზოგილი სიხშირული რესურსი გადაეცემა დაბალი SNR-ის მქონე აბონენტებს. ამით მიიღწევა ასეთი აბონენტებისათვის გადაცემის სიჩქარის გაზრდა ფიქსში არსებულ, მიწოდებულ ნორმალიზებულ საშუალო სიჩქარემდე.
7. აღნიშნული ფსევდო შემთხვევითი განაწილების ალგორითმი საშუალებას იძლევა ფიქსის დატვირთულობის პირობებში მომხმარებლები ჩაყენებული იქნან თანაბარ პირობებში - ფიქსის ნებისმიერ წერტილში მყოფი აბონენტი მიიღებს სიჩქარეს არანაკლებ ნორმალიზებული საშუალო სიჩქარისა.
8. შემუშავებულ იქნა ადაპტური რადიო პაკეტების დაგეგმვის ალგორითმი, იმ მიზნით რომ მაქსიმალურად გაზრდილიყო სისტემის ტევადობა, გაუმჯობესებულიყო სპექტრული ეფექტურობა და ასევე, ზოგადად სისტემის წარმადობა.
9. ამ საკითხთან დაკავშირებით ჩატარდა სისტემური დონის სიმულაცია, სადაც გამოკვლეულ იქნა შვიდი სხვადასხვა

ალგორითმის - RR, PF, PF07, PF05, PF03, საუკეთესო CQI და APF - ფუნქციონირებაოთხი მნიშვნელოვანი ქსელის მაჩვენებლის – სისტემის გამტარუნარიანობის, სამართლიანობის, სისტემის დაყოვნების და რადიო რესურსის ეფექტური განაწილების შეფასების საფუძველზე.

10. სიმულაციის შედეგებმა გვიჩვენა, რომ ნაშრომში შემუშავებული ადაპტური პროპორციულ სამართლიანი (APF) რადიო პაკეტების დაგეგმვის ალგორითმი უზრუნველყოფს უკეთეს ბალანს სისტემის ტევადობასა და სამართლიანობას შორის. ასევე აღსანიშნავია, რომ APF ალგორითმის გამოყენებით ვაუმჯობესებთ სპექტრულ ეფექტურობას, სისტემის ეფექტურ მუშაობას და ამავდროულად, ვინარჩუნებთ სისტემის სამართლიანობის მისაღებ დონეს.

დისერტაციის თემაზე გამოქვეყნებული შრომები

1. Basilashvili G. Study of Spectral Efficiency for LTE Network. "American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences", 2017, № 1, v. 29, pp. 21-32.

2. კვიციანი შ., ბერიძე ჯ., ბასილაშვილი გ. რადიო რესურსების სამართლიანი განაწილების ფსევდო შემთხვევითი ალგორითმები მობილური კავშირის LTE ქსელებში. "ინტელექტუალი", 2018, №35, გვ. 157-163.

3. Basilashvili G., Gogokhia S. Customized Packet Scheduling Algorithm for LTE Network. "American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences", 2018, №1, v. 40, pp. 203-216

4. ბასილაშვილი გ. მომსახურების ხარისხის უზრუნველყოფის მეთოდების მიმოხილვა მობილურ ქსელში. T-Mobile-ის დასავლეთ სანაპიროს რეგიონალური დეპარტამენტი, 7 აპრილი, 2016 წ., სან-ფრანცისკო, ა.შ.შ. მოხსენება.

5. ბასილაშვილი გ., ცქვიტინიძე ი. LTE ქსელების დაგეგმარების სიმულაციური მეთოდები. - საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია - „ენერჯეტიკა და ტელეკომუნიკაცია: რეგიონალური პრობლემები და განვითარების პერსპექტივები“. 23-25 ოქტომბერი 2015 წ., ქუთაისი, საქართველო. გვ. 175-178.

Abstract

The efficiency with which spectrum is used in wireless communication systems is becoming increasingly important as a result of rapidly growing demands for bandwidth-intensive mobile broadband services and the finite nature of usable spectrum. Faced with ever-increasing cost pressures, it is significant for a mobile network operator to make the most of spectrum investments. Therefore, this Ph.D. thesis studies spectral efficiency, the factors that influence the efficient use of spectrum, the ways of measuring it and finally, what can be done to improve this essential wireless network performance metric. The focus of this paper is firstly, to develop a better understanding around Spectral Efficiency for new generation wireless networks. Secondly, to comprehend what are the factors that affect this metric and lastly, how could it be ameliorated. Spectral Efficiency is a simple measure of wireless network Capacity. Common definition thereof is the raw bit rate in bits per second divided by the bandwidth in Hertz and it is expressed in bits/s/Hz, that is, throughput divided by bandwidth. Nonetheless, it is important to keep in mind that there is a hard limit to how much data can be transmitted in a given bandwidth in accord with the Shannon-Hartley theorem.

Advanced mobile networks are expected to provide ubiquitous broadband access to a continuously growing number of mobile users. The key feature of currently deployed LTE/4G and upcoming 5G NR is the adoption of advanced Radio Resource Management procedures in order to increase the system performance up to Shannon's limit. Packet scheduling mechanisms, in particular, play a fundamental role, because they are responsible for choosing, with fine time and frequency resolutions, how to distribute scarce radio resources among different mobile devices and applications, taking into account channel conditions and QoS requirements. This objective should be accomplished by providing an optimal trade-off between spectral efficiency and fairness by assigning the shared radio resources among users in an efficient and optimized manner. In this context, in this Ph.D. thesis, quite a few well known state-of-the-art as well as joint hybrid packet scheduling algorithms were studied, analyzed and compared with each other based on system simulations. Moreover, two new customized packet scheduling algorithms were developed herein. First one which is Pseudo Random Algorithm (PRA) is designed to increase system throughput by assigning radio resources to the users with relatively poor radio conditions while maintaining the level of the metric by deploying higher order of modulation and lower level of protection for the users in better radio conditions. Whereas, another one is designed to adaptively alter scheduling schemas considering multiple input variables in order to maximize spectral efficiency as well as overall system performance. For that matter, system level simulations were conducted in order to compare seven different scheduling schemas - RR, PF, PF07, PF05, PF03, Best CQI

and APF – based upon the evaluation of three important performance management metrics – System Throughput, Fairness and System Delay. The simulation results show that the new Adaptive Proportional Fair (APF) packet scheduling algorithm is capable of delivering a better trade-off between system capacity and fairness. And most importantly, the results also depict that by deploying the algorithm we are enhancing spectral efficiency while maintaining a reasonable level of fairness.