

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

გიორგი გიორგაძე

მეოთხე თაობის მობილური კავშირის რადიოქსელში ხმის
გადაცემის საკითხების გამოკვლევა და დამუშავება

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად
წარდგენილი დისერტაციის

ავტორეფერატი

სადოქტორო პროგრამა: "ტელეკომუნიკაცია"

შიფრი: 0402

თბილისი

2020

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში
ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტი
ტელეკომუნიკაციის დეპარტამენტი

ხელმძღვანელი: ასოცირებული პროფესორი ვ. აბულაძე

რეცენზენტები:

დაცვა შედგება 2020 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

სადისერტაციო ნაშრომში აღწერილია მობილური ქსელების განვითარება, ამ ევოლუციის პერიოდში ხმოვანი გამოძახებებისა და მობილური ინტერნეტის როლი ჩვენს ყოველდღიურ ცხოვრებაში. მეოთხე თაობის ქსელში ხმოვანი გამოძახებების შესრულება გაცილებით რთული და განსხვავებული აღმოჩნდა ვიდრე ეს წინა თაობის ტექნოლოგიებით ხორციელდებოდა. ამ დროს ისეთი ტექნოლოგიის დანერგვა, როგორცაა გრძელვადიანი ევოლუციით ხმის გადაცემა (VoLTE – Voice over Long Term Evolution), უზრუნველყოფს მეოთხე თაობის ქსელის სრული რესურსის გამოყენებას და აღარ ხდის საჭიროს შემთხვევითი დაშვების ტექნოლოგიის (RAT – Random Access Technology) ცვლილებას. რაც ნიშნავს იმას რომ ზარი დამუშავებული იქნება უშალოდ 4G ქსელში 2G ან 3G ქსელში გადართვის გარეშე. გამოიყენება პაკეტური კოუტაცია ნაცვლად არხების კომუაციისა და გვეძლევა საშუალება ვისარგებლოთ ხმის უმაღლესი ხარისხით (HD Voice)

VoLTE ტექნოლოგიის გამოყენებისას ერთ-ერთ უმნიშვნელოვანეს ელემენტს წარმოადგენს IP მულტიმედიური ქვესისტემა (IMS – IP Multimedia Subsystem), რომელიც არის პროგრამულ-აპარატიული კომპლექსი და წარმოადგენს ძირითად კომპონენტს პრაქტიკულად ყველა შემდეგი თაობის IP ქსელებისათვის.

IMS ესა არის ქვესისტემა რომელიც აერთიანებს სალაპარაკო სიგნალების გადაცემის ისეთ ფუნქციებს როგორცაა: აუტენტიფიკაცია, მომსახურებათა ავტორიზაცია, გამოძახებების მართვა, მარშრუტიზაცია, საერთო სარგებლობის სატელეფონო ქსელთან (PSTN - Public Switch Telephony Network) ურთიერთქმედება, ბილინგი, დამატებითი სერვისები და სხვა ისეთ ფუნქციებს რომლებიც არ გვხვდება გაუმჯობესებულ პაკეტურ ბირთვში (EPC – Evolved Packet Core).

თემის აქტუალურობა. თანამედროვე კომუნიკაციის ეპოქაში არსებობს მრავალი აპლიკაცია რომლის საშუალებითაც შეგვიძლია მივიღოთ ხმოვანი სერვისები. თუმცა, მობილური ოპერატორების

თვალსაზრისით ეს აპლიკაციები არ არის მიმზიდველი, რადგან ამ შემთხვევაში ხმა წარმოდგენილია, როგორც ჩვეულებრივი მონაცემები. აბონენტს ეკისრება გადასახადი მხოლოდ გადაცემული მონაცემების მოცულობის, რომლებიც ტარიფიცირდება საგრძნობლად დაბალი ფასით, ვიდრე სტანდარტული ხმოვანი კავშირი. ვინაიდან GSMA-ის (GSM Association) გათვლების მიხედვით, ფიჭური ოპერატორების შემოსავლების საკმაოდ დიდ ნაწილს წარმოადგენს ხმის სერვისის საშუალებით მიღებული შემოსავლები, შესაბამისად LTE ქსელის ამ სერვისით უზრუნველყოფა ძალიან მნიშვნელოვანი ხდება.

VoLTE საშუალებას იძლევა მნიშვნელოვნად შემცირდეს კავშირის დამყარების დრო და თუ გამოძახების მონაწილე ორივე ტელეფონს გააჩნია ეს ტექნოლოგია, კავშირის დამყარების დრო შეადგენს ორ წამზე ნაკლებს. ამრიგად, თუ წინა შემთხვევაში ზარის განხორციელებისათვის საჭირო იყო 4G-დან 3G-ში გადართვა, ახლა არავითარი გადართვა საჭირო არ არის და მოწყობილობა ახორციელებს ზარს მაშინვე. VoLTE ტექნოლოგია განსხვავდება არა მხოლოდ კავშირის სიჩქარით, არამედ ხმის მაღალი ხარისხით. ამავე დროს, ქსელში მომხმარებელთა რაოდენობის მიუხედავად, მონაცემთა გადაცემის სიჩქარე არ იცვლება.

სადისერტაციო ნაშრომის მიზანი. ზემოთ თქმულიდან გამომდინარე, ნაშრომის ძირითადი მიზანია VoLTE ტექნოლოგიის უპირატესობების წინა პლანზე გამოტანა. ამ ტექნოლოგიის დანერგვისას არსებულ მობილურ ქსელში აპარატურული და პროგრამული განახლების მიმოხილვა. სილქნეტის მფლობელობაში არსებული ჯეოსელის მობიური ქსელის მაგალითზე 4G დაფარვის გაუმჯობესება, რათა აბონენტებს შევთავაზოთ უწყვეტი VoLTE მომსახურება.

კვლევის ამოცანები. დასახული მიზნის მიღწევისთვის ნაშრომში გადაწყვეტილი იქნა შემდეგი ამოცანები:

1. გამტარუნარიანობის და აქტიურ მომხმარებელთა რაოდენობის გამოთვლა

2. ქსელის გამტარუნარიანობის გამოთვლა PRB-ს გამოყენებით
3. ტრაფიკის ბალანსირება სიხშირულ დონეებს შორის
4. ქსელის გამტარუნარიანობა MIMO-
გამოყენებით და მისი გაზრდის მეთოდები
5. ხმის გადაცემა მაღალი ხარისით
6. რეალური ქსელის მაგალითზე დაფარვის ზონის გაუმჯობესება
7. პოტენციური აბონენტების რაოდენობის გამოთვლა

კვლევის მეთოდოლოგია. დისერტაციაში დასმული ამოცანების გადაჭრისათვის თეორიული და პრაქტიკული საკითხების დამუშავებისას გამოყენებულ იქნა მრავალტექნოლოგიური მობილური ქსელის დაგეგმარების და ოპტიმიზაციის პლატფორმა Atoll, რომლის საშუალებითაც ქალაქ თბილისის მაგალითზე შესრულებულია წინასწარი სიმულიაცია თუ როგორ გაუმჯობესდებოდა ქსელის დაფარვა. ჩატარდა დრაივტესტი თბილისის მასშტაბით, შესრულებული სამუშაოების შესაფასებლად. დრაივ-ტესტის დროს გამოყენებული ავტომობილი აღჭურვილია: პორტატული კომპიუტერი ლიცენზირებული პლატფორმით Tems Investigation, რომლითაც იმართება მონაცემთა გადაცემის გაზომვები და დანარჩენი აპარატურა (მობილური ტერმინალები და სკანერი); სამი ერთეული მობილური ტერმინალით, რომლებითაც დამოუკიდებლად ხორციელდება მომსახურების გაზომვები; პორტატული სკანერით PCTEL Seagull MX, რომლის მეშვეობითაც ხორციელდება GSM/UMTS/LTE სიხშირული დიაპაზონების სკანირება.

მეცნიერული სიახლე. ნაშრომში შემუშავებულია ფორმულები რომლითაც შეგვიძლია გამოვთვალოთ ქსელის გამტარუნარიანობა და პოტენციური აბონენტების რაოდენობა რომლის მომსახურებასაც შეძლებს საბაზო სადგური. ფორმულები დამყარებულია შემდეგ ელემენტებზე: სასაბაზო სადგურის სექტორების რაოდენობაა, არხების საერთო რიცხვი, ერთი ფიჭაში სააბონენტო არხების რიცხვი, ფიჭაში ტრაფიკის არხების

რაოდენობა, აბონენტის მიერ მომხარებული ტრაფიკი თვის განმავლობაში, ქსელის საშუალო გეგმიური გამტარუნარიანობა.

პრაქტიკული ღირებულება და სამუშაოს შედეგების გამოყენების სფერო. ნაშრომში წარმოდგენილი ინფორმაცია, ქსელის დაფარვის გაუმჯობესების მაგალითები, საუბრის ხარისხის გაუმჯობესების საშუალებები, შემუშავებული ანალიზის ფორმულები, შეიძლება გამოიყენონ როგორც ბაზარზე ასრებულმა ოპერატორებმა ასევე ახალი მობილური ქსელის მშენებლობისას.

აპრობაცია. სადისერტაციო ნაშრომის ძირითადი შედეგები მოხსენებული და განხილული იქნა: სტუ-ს ტელეკომუნიკაციის დეპარტამენტში პირველ, მეორე და მესამე კოლოქვიუმებზე 2017-2020 წლებში; სტუ-სა და ფოჯას უნივერსიტეტის პირველ ერთობლივ R&D საერთაშორისო კონფერენციაზე “მრეწველობის დარგების დინამიკა და თანამედროვე ტენდენციები საქართველოსა და ევროკავშირში: საინფორმაციო-საკომუნიკაციო ტექნოლოგიები მიწოდების ჯაჭვის მენეჯმენტში” (17-19 ოქტომბერი, 2018 წელი, თბილისი, საქართველო).

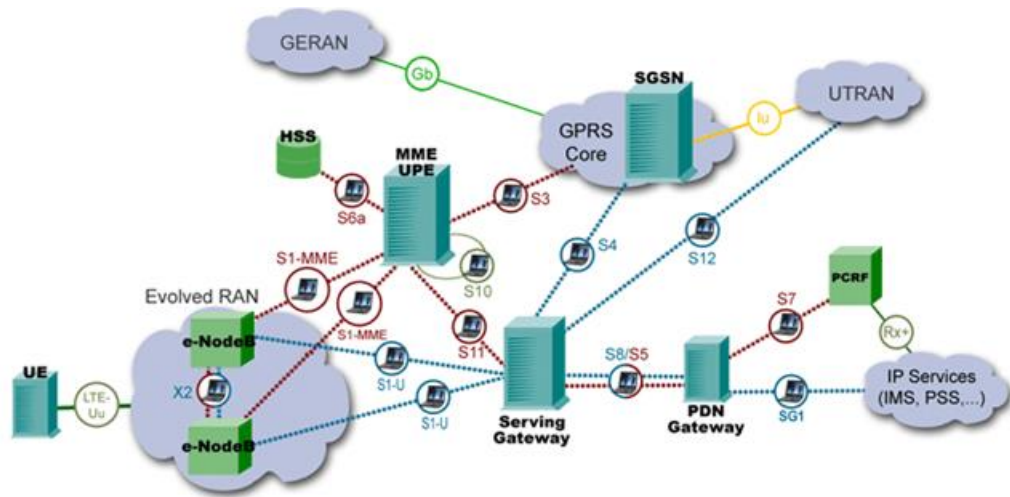
გარდა ამისა, მიღებული შედეგები აისახა სამეცნიერო-ტექნიკურ რეფერირებად ჟურნალებში გამოქვეყნებულ სამ სტატიაში.

ცნობები დისერტაციის მოცულობისა და სტრუქტურის შესახებ. ნაშრომი შედგება შესავლისაგან, ცხრა თავისაგან, დასკვნისაგან და გამოყენებული ლიტერატურის ნუსხისაგან. სამუშაოს მოცულობა შეადგენს 129 გვერდს, რომელიც შეიცავს 31 ნახაზს და 11 ცხრილს.

ნაშრომის შინაარსი

ნაშრომის პირველ თავში განხილულია LTE ქსელის არქიტექტურა რომელიც შემუშავებულია ისეთნაირად, რომ უზრუნველყოს პაკეტების მიწოდება მინიმალური დაყოვნებით და მომსახურების მაღალი მახასიათებლებით. სტანდარტის შემუშავების ძირითადი მიზანი იყო ქსელის სტრუქტურის გამარტივების მაქსიმალური შესაძლებლობა და ქსელური პროტოკოლების დუბლირებული ფუნქციების გამორიცხვა, რომელიც დამახასიათებელი იყო 3G ქსელისათვის. LTE სტანდარტის არქიტექტურაში ყველა ქსელური ურთიერთშეთანხმებები ხორციელდება ორ კვანძს შორის: საბაზო სადგურსა (eNB) და მობილურობის მართვის ბლოკს (MME- Mobility Management Entity) შორის, რომელიც თავისთავში შეიცავს ქსელურ გეითვეის. ფიზიკურ დონეზე LTE ქსელი შედგება ორი კომპონენტისაგან: რადიომეღწევის ქსელი E-UTRAN(Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network) და საბაზო ქსელი SAE (System Architecture Evolution) – სისტემური არქიტექტურის ევოლუცია.

განხილულია E-UTRAN ქსელი, რომელიც შედგება მხოლოდ eNB საბაზო სადგურებისაგან. საბაზო სადგურები წარმოადგენენ სრულადდაკავშირებული ქსელის ელემენტებს და შეერთებულნი არიან ერთმანეთთან პრინციპით „თითოეული–თითოეულთან“ X2 ინტერფეისის საშუალებით. თითოეულ საბაზო სადგურს გააჩნია S1 ინტერფეისი SAE საბაზო ქსელთან, რომელიც აგებულია პაკეტების კომუტაციის პრინციპით. LTE ქსელებში eNB ასრულებს შემდეგ ფუნქციებს: რადიორესურსების მართვა, მომხმარებელთა მონაცემების ნაკადების გაშიფრვა, მონაცემთა პაკეტების მარშრუტიზაცია მომსახურებად გეითვეების მიმართულებებით, გამოსაძახებელი და სამაუწყებლო ინფორმაციის დისპეტჩირება და გადაცემა, მობილურობის მართვისათვის ანათვლების გაზომვა და შედგენა.



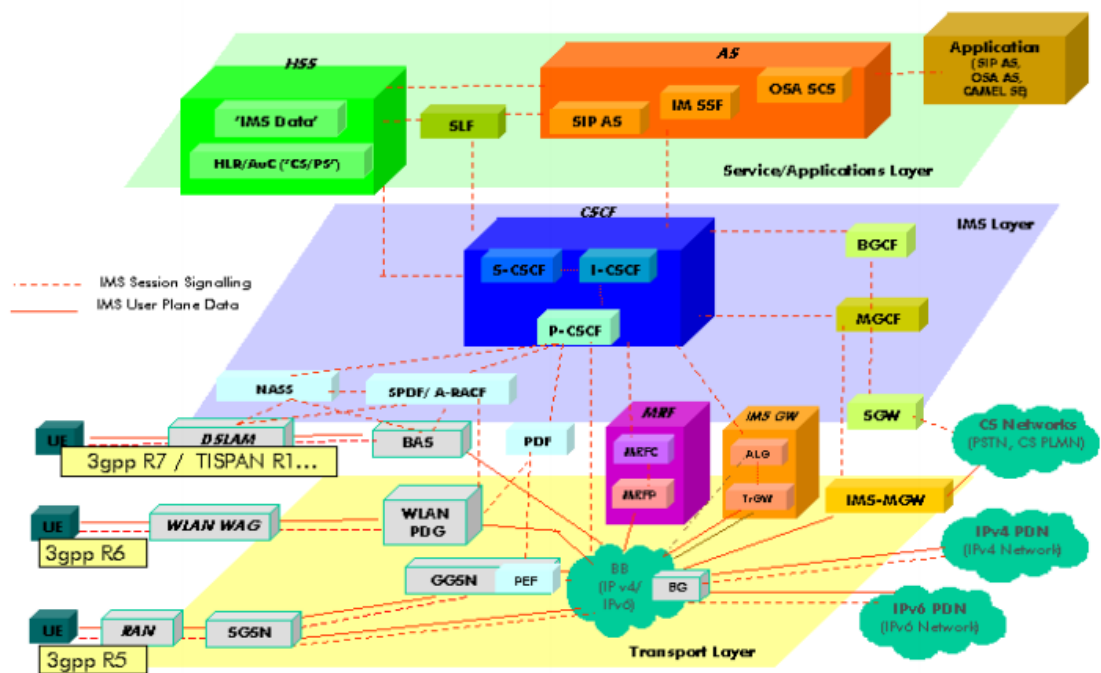
ნახ. 1. LTE სტანდარტის ქსელის სტრუქტურა

საბაზო ქსელ SAE-ს საფუძველს წარმოადგენს გაუმჯობესებული პაკეტური ბირთვი EPC (Evolved Packet Core). პაკეტების ქვეშ გაგებული უნდა იქნას მონაცემის პაკეტები – ინფორმაციის უმცირესი ფრაგმენტები, რომლებიც გადაიცემიან LTE-ს ციფრულ ქსელში. მონაცემთა პაკეტები გადაიცემიან მკაცრი წესით, რომელთა ერთობლიობას პროტოკოლი ეწოდება. LTE ქსელებში გამოიყენება ტრადიციული IP-პროტოკოლი, რომლის ბაზაზეც ფუნქციონირებს სრულიად განსხვავებული კავშირის ქსელები მთელ მსოფლიოში. IP-პროტოკოლის უნივერსალობა საშუალებას აძლევს LTE-ს ოპერატორებს, გაუწიონ ერთსა და იმავე კლიენტს მომსახურების მთელი სპექტრი (ხმა, მონაცემები, ვიდეო).

LTE სტანდარტის ქსელის სტრუქტურა ნაჩვენებია ნახ.1-ზე. რომლის შემადგენელი ნაწილია ლოგიკური ელემენტი - მობილურობის მართვის ბლოკი MME (Mobility Management Entity). ის პასუხისმგებელია სააბონენტო ტერმინალის მობილურობის მართვის ამოცანის გადაწყვეტაზე და ურთიერთქმედებს საბაზო სადგურებთან C-plane მართვის პროტოკოლით. გარდა ამისა ანაწილებს გამოძახებების შეტყობინებებს eNB-თან, აკონტროლებს მართვის პროტოკოლებს, უნიშნავს იდენტიფიკატორებს სააბონენტო ტერმინალებს, უზრუნველყოფს ქსელის უსაფრთხოებას, ამოწმებს აბონენტთა შეტყობინების სინამდვილეს და მართავს როუმინგს.

მეოთხე თაობის LTE ქსელის მშენებლობის პროცესი შეიძლება დაიყოს რამდენიმე ეტაპად. სადაც ძირითადი ეტაპი არის ქსელის აღჭურვა IMS (IP Multimedia Subsystem) პლატფორმით, რომელიც გვაძლევს VoLTE ტექნოლოგიის რეალიზების შესაძლებლობას. რათა მინიმუმამდე დავიყვანოთ წინა თაობის ქსელი რესურსების გამოყენება. IMS ესაა პროგრამულ-აპარატიულ კომპლექსი, რომელიც წარმოადგენს ძირითად კომპონენტს პრაქტიკულად ყველა შემდეგი თაობის IP ქსელებისათვის.

IMS არქიტექტურა, როგორც წესი იყოფა სამ ჰორიზონტალურ დონედ: სატრანსპორტო და სააბონენტო მოწყობილობები; გამოძახებებისა და სესიების მართვა; მომსახურებისა და დანართების დონე. ნახ.2-ზე ნაჩვენებია IMS-ის არქიტექტურა.



ნახ. 2. IMS-ის არქიტექტურა

სატრანსპორტო დონე (Transport Layer) ინტეგრირებულია სხვადასხვა ტიპის შეღწევადობის ქსელებთან. ეს შეიძლება იყოს რადიოდაშვების პაკეტური ქსელი, ფართოზოლოვანი საკაბელო ან ტრადიციული სატელეფონო ქსელი არხების კომუტაციით. აბონენტების მიერთება IMS-

ინფრასტრუქტურასთან ხორციელდება სატრანსპორტო დონეზე მობილური ტერმინალის ან გეითვეის საშუალებით. სატრანსპორტო დონის ფარგლებში განსაზღვრულია გეითვეის რამოდენიმე ფუნქცია. პირელ რიგში მათ უნდა უზრინველონ ურთიერთქმედება ქსელთან მიერთების წერტილში.

LTE ქსელის რადიონტერფეისი მუშაობს არხების დაყოფის ორივე დუპლექსური მეთოდით: სიხშირული FDD(Frequency Division Duplex) და დროითი TDD(Time Division Duplex). LTE ქსელის ფუნქციონირება შესაძლებელია განხორციელდეს სხვადასხვა სიგანის სიხშირულ დიაპაზონში. აღმავალი და დაღმავალი მიმართულების სიგნალებს შეუძლიათ დაიკავონ ზოლი 1,4–დან 20 მჰც–მდე აქტიური რესურს ბლოკების რაოდენობების მიხედვით. აღმავალ და დაღმავალ მიმართულებებში ინფორმაციის გადაცემა ორგანიზებულია კადრებში, რომელთა ხანგრძლივობა შეადგენს 10 მლწმ–ს. კადრები იყოფიან უფრო მცირე დროით სტრუქტურებად – სლოტებად.

სიხშირული დაყოფის რეჟიმში FDD კადრი იყოფა 20 სლოტად, რომლებიც ინომრება ნულიდან 19–მდე და თითოეულს გააჩნია ხანგრძლივობა 0,5 მლწმ. FDD რეჟიმში დროითი რესურსი კადრის ფარგლებში იყოფა თანაბრად საპირისპირო მიმართულებებში გადასაცემად. FDD რეჟიმში ფიზიკურ არხებს საპირისპირო მიმართულებაში გააჩნიათ აუცილებლად დუპლექსური გამიჯნვა.

არხების დროითი დაყოფის TDD რეჟიმს გააჩნია ასინქრონული ბუნება. მონაცემთა გადაცემა TDD რეჟიმში ხორციელდება ერთდროულად ორივე მიმართულებაში სიხშირეთა ერთ დიაპაზონში.

E-UTRAN ქსელის რადიონტერფეისის თავისებურებას წარმოადგენს დაღმავალ არხებში მრავალმხრივი შეღწევადობის OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) ტექნოლოგიის გამოყენება. OFDMA ესაა მულტიპლექსირება ორთოგონალური სიხშირული დაყოფით და ამ ტექნოლოგიის გამოყენების ერთ-ერთი ძირითად მიზანს წარმოადგენს ხელშეშლებთან ბრძოლა, რომლებიც წარმოიქმნებიან სიგნალების

მრავალსიხვიანი გავრცელებისას, რადგანაც OFDM–სიგნალი განიხილება, როგორც მრავალი ნელა მოდულირებული ვიწროხოლოვანი სიგნალი და არა, როგორც ერთი სწრაფად მოდულირებული ფართოხოლოვანი სიგნალი. OFDM ტექნოლოგია დაფუძნებულია მრავალსიხვიანი სიგნალის ფორმირებაზე, რომელიც შედგება მრავალი გადამტანი სიხვირებისაგან. OFDM-სიგნალის ფორმირებისას T_0/N ხანგრძლივობის ინფორმაციული სიმბოლოების თანმიმდევრობის ნაკადი იყოფა ბლოკებად, რომლებიც შეიცავს N სიმბოლოს, T_0 – ერთი სიმბოლოს ხანგრძლივობაა. ინფორმაციული სიმბოლოების თანმიმდევრობის ბლოკი გარდაიქმნება პარალელური სიმბოლოების ბლოკში, რომელშიც თითოეული ინფორმაციული სიმბოლო შეესაბამება მრავალსიხვიანი სიგნალის განსაზღვრულ სიხვირს.

E-UTRAN ქსელის დადმავალ არხებში გამოიყენება შემდეგი მოდულაციის სახეები: QPSK, 16 QAM, 64 QAM. OFDM/კვადრატულ ამპლიტუდური მოდულაცია QAM(Quadrature Amplitude Modulation) სიგნალის ფორმირებისას გამოიყენება ფურიეს დისკრეტული უკუ სწრაფი გარდაქმნა.

რადიო ქსელის დაგეგმარებისას ძირითად ნაწილს წრმოადგენს სტატისტიკების შედარება, რომლებიც აიღება რადიოქსელის დონეზე მომხმარებელთა მუშობის შედეგებით. პრაქტიკული რეალიზებისას ხშირად ისმება კითხვა დაგეგმარებისა და მიმდინარე პირობების შესახებ თუ „რამდენი უნდა იყოს VoLTE რადიოკავშირის მაქსიმალური დატვირთვა, რათა მომხმარებლის გამტარუნარიანობა კვლავ დარჩეს მოცემულ დონეზე?“. სამეცნიერო ლიტერატურაში პრაქტიკულად არ არის სასარგებლო ტექნიკური ანალიზი ამ საკითხთან დაკავშირებით და ეს წარმოადგენს ამ თემის მოტივაციას.

ნაშრომში განხილულია VoLTE რადიოინტერფეისის მომხმარებელთა საშუალო გამტარუნარიანობა. კერძოდ ეგრეთწოდებული M/G/1 პროცეორების განაწილების Processor Sharing (PS) მიდგომა გამოიყენება

მომხმარებელთა გამტარუნარიანობის გამოსახატავად VoLTE რადიონტერფეისის ფიზიკური რესურს ბლოკების (Physical Resource Block - PRB) საშუალებით, რომლის სტატისტიკაც ხელმისაწვდომია ყველა კომერციულ VoLTE სისტემაში.

მიღებული შედეგები შესაძლებელია გამოყენებული იქნას LTE-ს როგორც FDD ასევე TDD ვარიანტებისთვის. მიუხედავად იმისა, რომ პრინციპში ზოგადი მიდგომა გამოიყენება როგორც დაღმავალი (downlink) ასევე აღმავალი (uplink) კავშირის ხაზებისათვის, დაღმავალი კავშირის ხაზების შემთხვევაში დამოკიდებულია სიმძლავრის მართვისა და კავშირის ხაზების ადაპტაციის განხორციელებაზე, რაც იძლევა უფრო მეტ თავისუფლებას განხილვისათვის. ამიტომ ჩვენს შემთხვევაში გამტარუნარიანობა მიეკუთვნება დაღმავალი კავშირის ხაზების შემთხვევას.

LTE ქსელში გადაცემულმა ხმამ შეიძლება ვერ გაუწიოს კონკურენცია არხების კომუტაციის 2G/3G თაობის ქსელით გადაცემული ხმის ხარისხს, რადგანაც LTE ქსელში ხმა წარმოადგენს მონაცემთა გადაცემის სერვისს. სულ სხვა მდგომარეობა არის VoLTE-ს შემთხვევაში, როცა მონაცემთა მაღალსიჩქარიან გადაცემასთან ერთად დამატებით ხორციელდება მაღალი ხარისხის ხმოვანი ზარები.

იმისათვის, რომ ოპერატორებმა გამოიყენონ ყველა ის უპირატესობები, რომლებსაც იძლევა VoLTE, ქსელის მომზადება და დაგეგმვა წარმოადგენს გადამწყვეტს. VoLTE-ს წარმატებული გაშვებისა და შენარჩუნებისათვის ოპერატორებმა უნდა განახორციელონ ქსელის გამტარუნარიანობის გარკვეული პრობლემების დაგეგმვა. მობილური ქსელის სწორი დაგეგმვა და ოპტიმიზაცია ასრულებს ცენტრალურ როლს მაღალხარისხიანი VoLTE მომსახურების აბონენტისათვის მიწოდებაში. ამის უზრუნველყოფად საჭიროა ჩატარდეს შემდეგი გამოთვლები:

- VoLTE ხმოვანი პაკეტის ზომის გამოთვლა
- VoLTE პაკეტისათვის რადიორესურსის გამოთვლა

- ფიქაში VoLTE მომხმარებელთა მაქსიმალური თეორული რიცხვის გამოთვლა

VoLTE გამოძახების პაკეტის ზომა არ წარმოადგენს ფიქსირებულს, ის დამოკიდებულია ხმის გადაცემისას გამოყენებული კოდეკის ტიპზე, ფიქაში მომხმარებლების UE(User Equipment) რადიოკავშირის პირობებზე, eNodeB დაგეგმარების ალგორითმზე, გამოყენებულ ალგორითმზე და სხვა. იმისათვის რომ თავიდან ავიცილოთ ამდენი ცვლადები და რთული გამოთვლები, გავიგოთ VoLTE-ს ტევადობის ერთი კონკრეტული ასპექტი, ანუ, რამდენი ფიზიკური რესურს ბლოკია (Physical Resource Block - PRB) საჭირო ერთი VoLTE გამოზახებისთვის.

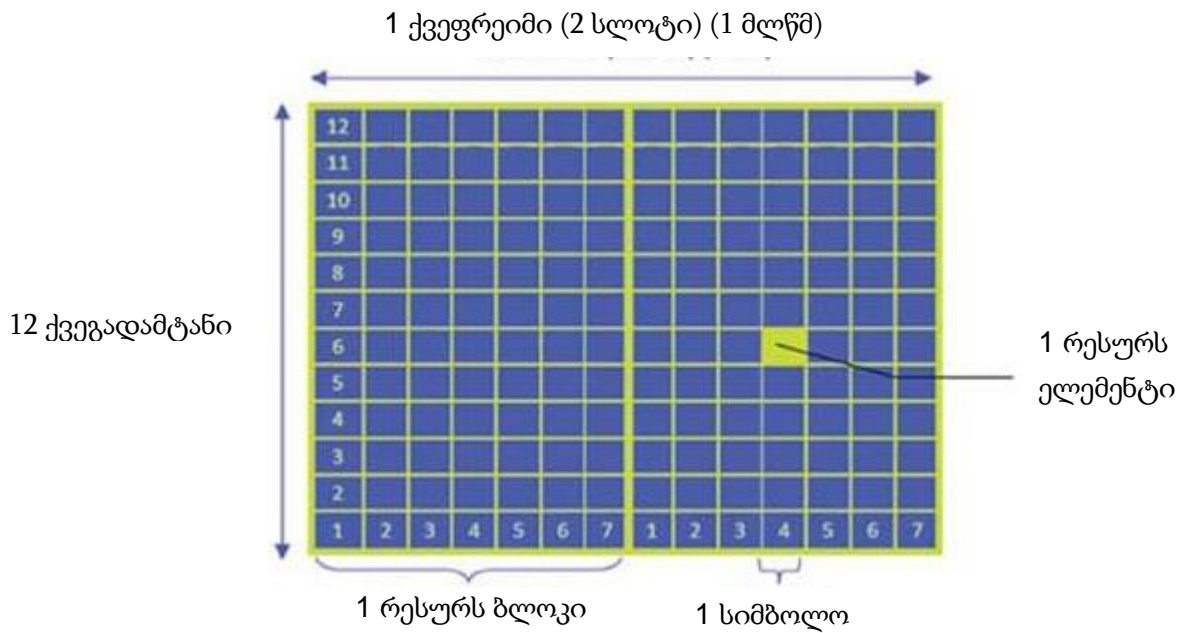
დასაწყისისათვის ავირჩიოთ შემდეგი მონაცემები:

- LTE სისტემის გამტარუნარიანობა 20 მჰც (100 PRB)
- დუბლექს მეთოდი : FDD
- MIMO რეჟიმი : 2×2
- კოდეკი: ადაპტური მრავალსიხარბიანი ფართოზოლოვანი კოდეკი (AMR-WB 12.65)
- სათაური შეკუმშვა ROHC (Robust Header Compression) ჩართულია.

LTE-ში რადიორესურსის ერთეული ცნობილია როგორც ფიზიკური რესურს ბლოკი - PRB და ერთ PRB-ს გააჩნია 12 ქვეგადამტანი და 14 სიმბოლო 1 მილიწამიანი ხანგრძლივობის ანუ $12 \times 14 = 168$ რესურს ელემენტი (Resource Elements - RE). ნახ. 3-ზე ნაჩვენებია PRB-ს სტრუქტურა.

ზოგიერთი RE დაკავებულია მართვის სიგნალებით (PDCCH - Physical Downlink Control Channel) და პილოტ-სიგნალებით (Pilot symbols - RS), რაც უზრუნველყოფს დაახლოებით 120 RE-ს თითოეული PRB მონაცემთა გადაცემისათვის.

LTE დადმავალი კავშირის ხაზები იყენებენ QPSK (Quadrature Phase Shift Keying - კვადრატული ფაზური მოდულაცია), 16 QAM (Quadrature Amplitude Modulation - კვადრატული ამპლიტუდური მოდულაცია) და 64 QAM მოდულაციას



ნახ.3. ფიზიკური რესურს ბლოკის სტრუქტურა

კავშირის დადმავალი არხის ფიზიკურად განაწილებული არხისათვის (Physical downlink shared channel – PDSCH), თითოეულ რესურს შეუძლია გადაიტანოს 2 ბიტი, 4 ბიტი ან 6 ბიტი მოდულაციის სქემაზე დაყრდნობით. ამასთან ამ ბიტებიდან ზოგიერთი გამოიყენება მონაცემებისათვის, ხოლო ზოგიერთი შეცდომების კონტროლის ბიტისთვის. ცხრილ 6.1-ში ნაჩვენებია მოდულაციის სიჩქარე და კოდირება.

ცხრილ.1 მოდულაციის სიჩქარე და კოდირება

CQI ინდექსი	მოდულაცია	კოდური სიჩქარე x 1024	ეფექტურობა
0	მიუწვდომელია		
1	QPSK	78	0.1523
2	QPSK	120	0.2344
3	QPSK	193	0.377
4	QPSK	308	0.6016
5	QPSK	449	0.877
6	QPSK	602	1.1758
7	16 QAM	378	1.4766
8	16 QAM	490	1.9141
9	16 QAM	616	2.4063
10	64 QAM	466	2.7305
11	64 QAM	587	3.3223

12	64 QAM	666	3.9023
13	64 QAM	772	4.5234
14	64 QAM	873	5.1152
15	64 QAM	948	5.5547

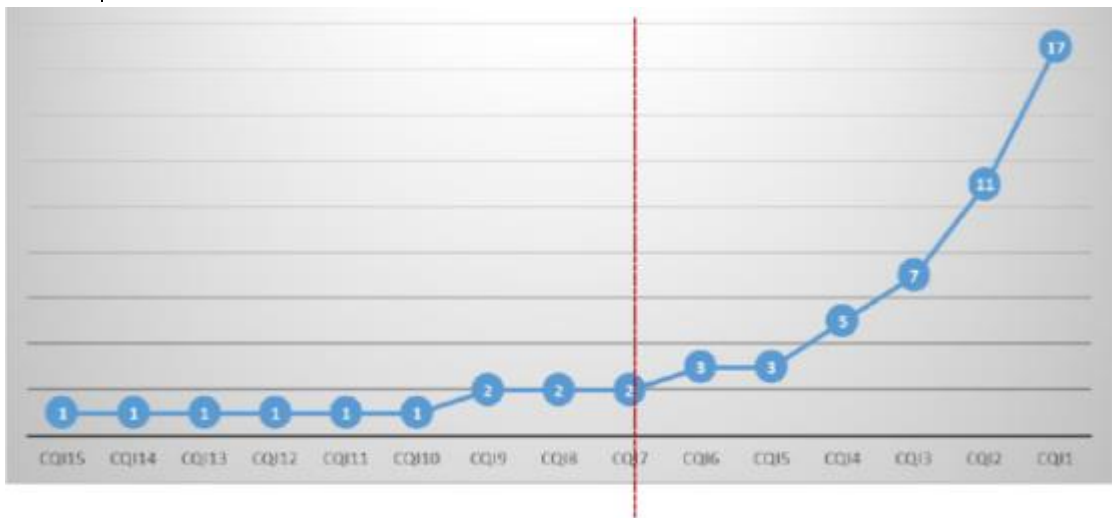
ამრიგად VoLTE პაკეტებისათვის საჭირო რესურს ბლოკების რაოდენობა დამოკიდებულია თუ როგორი მოდულაცია გამოიყენება, ხოლო მოდულაცია დამოკიდებულია UE რადიოკავშირის მდგომარეობაზე. UE რადიოსიხშირის მდგომარეობას გადასცემს eNodeB-ში არხის ხარისხის ინდიკატორის Channel Quality Indicator - CQI) საშუალებით, ამ მიღებული მონაცემის საშუალებით eNodeB იღებს გადაწყვეტილებას მოდულაციის თაობაზე კონკრეტული რესურს ბლოკისათვის. ცხრილში ნაჩვენებია ანათვლების დიაპაზონი CQI 0-15, სადაც 15 არის არხის ყველაზე კარგი მდგომარეობა.

განვიხილოთ სამი სხვადასვა დონის შემთხვევა CQI 15=კარგი, CQI 7=საშუალო და CQI 1=ცუდი, CQI 15 ახორციელებს 64 QAM მოდულაციას, CQI 7 ახორციელებს 16 QAM მოდულაციას და CQI 1 - QPSK მოდულაციას.

- როდესაც UE ატყობინებს CQI 15-ს, eNodeB-ს შეუძლია გამოიყენოს 64 QAM მოდულაცია და კოდირების ეფექტური სიჩქარე $948/1024=0,926$, რაც ნიშნავს, რომ ყოველი RE საშუალოდ შეიცავს $6 \times 0,926=5,55$ ბიტ მონაცემებს. ამის გათვალისწინებით ერთ PRB-ს შეუძლია გადაიტანოს $120 \times 5,55=666$ ბიტ მონაცემი ანუ ექვივალენტურია VoLTE-ს ორი ხმოვანი ფრაგმენტის. მაგრამ LTE-ს დისპეტჩერს არ შეუძლია მომხარებელზე გამოეყოს ერთზე ნაკლები PRB, ამიტომ ითვლება, რომ თითოეული VoLTE გამომძახებისთვის საჭიროა ერთი PRB.
- როდესაც UE ატყობინებს CQI 7-ს, მაშინ eNodeB-ს შეუძლია გამოიყენოს მოდულაცია 16 QAM და კოდირების სიჩქარე $378/1024=0,369$, რის გამოც ვლდებულობთ $4 \times 0,369 \times 120=177$ ბიტ მონაცემებს. ეს ნიშნავს, რომ VoLTE-ს 300 ბიტის მონაცემებისათვის საჭიროა ორი PRB.
- CQI 1 მონაცემისას eNodeB-ს შეუძლია გამოიყენოს QPSK მოდულაცია და კოდირების სიჩქარე $78/1024=0,076$, უზრუნველყოფს $2 \times 0,076 \times 120=18$ ბიტ

მონაცემებს თითოეული PRB-სთვის. ამდენად, VoLTE-ს 300 ბიტანი მონაცემებისათვის საჭირო იქნება დაახლოებით 17 PRB.

VoLTE-ს შემთხვევაში, როდესაც UE არეგისტრირებს CQI 7-ს ან უფრო ნაკლებს, ესელი პასუხად აგზავნის არაპროპორციულად დიდი რაოდენობის PRB-ს, რითაც ზრდის გამტარუნარიანობას. ამას მივყავართ ესელის საერთო ხარისხის დაქვეითებამდე. ნახ 4-ზე ნაჩვენებია PRB რაოდენობის დამოკიდებულება CQI-ზე.



ნახ. 4. PRB რაოდენობის დამოკიდებულება CQI-ზე.

VoLTE-ში ხმოვანი მონაცემები გენერირდება ყოველი 20 მილიწამში, ამიტომ თუ ყველაფერი რიგზე არის ე.ი. არ არის განმეორებითი გადაცემები, მაშინ დაახლოებით 20 VoLTE გამოძახებას შეუძლია ერთდოულად გამოიყენოს ერთი და იგივე PRB ნაკრები ერთმანეთის მიყოლებით.

VoLTE გამოძახებების მაქსიმალური რაოდენობა, რომელიც შეიძლება გადაცემული იქნას განისაზღვრება

$$(\text{მიღწევადი PRB-ს რაოდენობა}) / (\text{VoLTE გამოძახების PRB რაოდენობა}) \times 20$$

ცხრილ 2.-ში მოცემულია VoLTE გამოძახებები CQI-სათვის და გამტარუნარიანობა

ცხრილი 2. რესურსბლოკების რაოდენობა გატარების ზოლის შესაბამისად

არხის გამტარუნარიანობა	1.4 მჰც	3 მჰც	5 მჰც	10 მჰ ც	15 მჰც	20 მჰ ც
ბლოკების რაოდენობა	6	10	25	50	75	100
CQI =15 (1 PRB)	120	200	500	1000	1500	2000
CQI =7 (2 PRB)	60	100	250	500	750	1000
CQI =1 (16 PRB)	8	13	31	63	94	125

შეიძლება გასაკვირი იყოს ამ მნიშვნელობების მაღალი მაჩვენებლები და დაგვებადოს კითხვა, თუ რამდენად რეალურია ეს ციფრები. ეს ციფრები იდეალურია რამოდენიმე პირობების მიხედვით, რომლებიც პრაქტიკაში შეიძლება არ სრულდებოდეს:

- ფიჭაში ყველა მომხმარებელს არ ეძლევა ერთი და იგივე CQI მნიშვნელობა, ხოლო ფიჭა, რომელშიც ყველა UE-ს ეძლევა მნიშვნელობა 1 CQI, ძირითადად უვარგისია.
- VoLTE პაკეტების მოწოდება იდეალურად არ იქნება განაწილებულ კოდირების 20 მლწმ-იანი ინტერვალებით.
- პაკეტების უმეტესობას დაჭირდებათ ერთხელ მაინც განმეორებითი გადაცემა, განსაკუთრებით CQI-ს შედარებით დაბალი მნიშვნელობებისათვის, რაც მოითხოვს დამატებით PRB-ს.
- არცერთ ოპერატურს არ სურს ყველა PRB დაარეზერვოს VoLTE-სთვის, ზოგიერთი PRB დარეზერვებული უნდა იყოს მომხმარებლისათვის, რომელიც არ წარმოადგენს VoLTE-ს, ამიტომ ეს საგრძნობლად ამცირებს VoLTE-ს რაოდენობას ფიჭაში.
- კავშირის აღმავალ ხაზებს გააჩნიათ დაბალი გამტარუნარიანობა, ვიდრე დაღმავალ ხაზებს.
- TDD-ში არ არის დუპლექსური რეჟიმი. VoLTE მომხმარებელზე პირდაპირ დამოკიდებულია TDD კონფიგურაცია.

ყოველივე ეს იძლევა ზოგად წარმოდგენას, თუ რას უნდა ველოდეთ VoLTE-სგან ადგილებზე. LTE რადიოკავშირის კარგი პირობებისას შეიძლება ჩქარა და ეფექტურად მივაწოდოთ VoLTE პაკეტები PRB-ს მცირე

რაოდენობებით და დავიტოვოთ PRB-ს სამარისი რაოდენობები სხვა მომხმარებლებისათვის. ცუდი პირობებისას LTE მოუწევს ბრძოლა რამოდენიმე მომხმარებლის მხარდაჭერისთვისაც კი. რადიოსიხშირების პირობებთან ერთად მომხმარებელთა გამტარუნარიანობა დამოკიდებულია გატარების ზოლის მისაწვდომობაზე. როდესაც ოპერატორს გააჩნია 20მჰც გატარების ზოლი, რა თქმა უნდა ის მოემსახურება უფრო მეტ მომხმარებელს, ცუდი რადიოინტერფეისის ცუდი მდგომარეობის დროსაც კი.

რადიორესურსების გამოყენების თვალსაზრისით განიხილება ორი მოდელი:

- სრული ბუფერული ტრაფიკის მოდელი, სხვა მომხმარებლების არარსებობის შემთხვევაში ერთი მომხმარებლისთვის ხელმისაწვდომი იქნება ყველა არსებული რადიორესურსი. მაგალითად, გადაცემის მუდმივი სიჩქარის ნაკადური ტრაფიკი არ დააკმაყოფილებს ამ მოთხოვნას.
- თუ არსებობს ერთ მომხმარებელზე მეტი, მომხმარებლებს შორის ხორციელდება რადიორესურსების თანაბარი გადანაწილება. სამართლიანი თანაბარი გამოყენების ეს პრინციპი დამახასიათებელია UE რადიოკავშირისათვის, რომელშიც ხორციელდება რესურსების თანაბარი გამოყენება.

"რადიო რესურსის" კონცეფცია შეიძლება განისაზღვროს სხვადასხვა გზით, მაგრამ LTE რადიო ინტერფეისის შემთხვევაში, მოსახერხებელია გამოვიყენოთ ფიზიკური რესურს ბლოკები (Physical Resource Block - PRB), როგორც საერთო გამოყენების რესურსი. LTE downlink-ისთვის, PRB-ის გამოყენება შეიძლება გაუთანაბრდეს გადამცემის სიმძლავრის გამოყენებას, თუ ფიზიკური დონე და საერთო არხის სამომსახურე მონაცემები გარკვეულ წესით მხედველობაში იქნება მიღებული.

ზემოთ მოყვანილი დაშვებების გათვალისწინებით, მომხმარებელთა მყისიერი გამტარუნარიანობა x აქტიური მომხმარებლების ერთდროული

დატვირთვისას შეადგენს მაქსიმალური გამტარუნარიანობის $1/x$. მომხმარებელი და ტერმინი UE ურთიერთშენაცვლებადია და ერთსა და იმავეს აღნიშნავენ. ამბობენ რომ მომხმარებელი არის აქტიური, თუ მისი გადაცემის ბუფერში არის მონაცემები. აქტიური UE-ს რაოდენობა განსვავდება რადიოქსელში ჩართული UE-ს რაოდენობისაგან, რადგან UE შეიძლება ჩართული იყოს რადიოქსელში მაგრამ არ ახორციელებდეს მონაცემების გადაცემას ან მიღებას, რადგანაც სხვადასხვა მომხმარებლები თავისი მონაცემების გადაცემას ახორციელებენ სხვადასხვა დროს, ამიტომ აქტიური UE-ს რაოდენობა (x) და შესაბამისად მყისიერი გამტარუნარიანობა იცვლება დროში, საინტერესო მახასიათებელს წარმოადგენს საშუალო გამტარუნარიანობა.

განვიხილოთ UE, რომელიც იმყოფება სადღაც ფიჭაში და გააჩნია განსაზღვრული რაოდენობის რადიოკავშირი. სხვა რომელიმე მომხმარებლის არარსებობისას UE განაგებს ყველა დასაშვებ PRB და ლეზულობს გარკვეულ გამტარუნარიანობას T_1 , სადაც ინდექსი 1 მიუთითებს, რომ არსებობს ერთი აქტიური მომხმარებელი (ანუ $x = 1$). თუ ფიჭაში იქნებოდა $x > 1$ აქტიური UE, მაშინ მომხმარებლის გამტარუნარიანონა იქნებოდა T_1/x . მომხმარებლის მაქსიმალური მისაწვდომი გამტარუნარიანობა T_1 დამოკიდებულია მომხმარებლის ადგილმდებარეობაზე ფიჭაში, რადიოკავსირის პირობებზე, გადამცემი ანტენების რაოდენობაზე და ა.შ. მომხმარებლის საშუალო გამტარუნარიანობა T_{ue} განისაზღვრება, როგორც T_1/x მოსალოდნელი მნიშვნელობა x -ის დადებითი მთელი რიცხვისთვის

$$T_{ue} = E \left[\frac{T_1}{x} \right], \quad x \geq 1$$

სადაც $E[\cdot]$ აღნიშნავს მოსალოდნელ მნიშვნელობას, მომხმარებლის რადიოკავშირის პირობები და შესაბამისად მაქსიმალური გამტარუნარიანობა T_1 შეიძლება ჩაითვალოს სტატიკურად დამოუკიდებელი ფიჭაში აქტიური UE-ს რაოდენობებზე და ამ შემთხვევაში (4.1) შეიძლება ჩაიწეროს

$$T_{ue} = E[T_1]E\left[\frac{1}{x}\right], \quad x \geq 1$$

$C=E[T_1]$ -ს უწდებენ ფიჭის ტევადობას.

სამწუხაროდ მეორე შემადგენელი $E[1/x]$, რომელიც წარმოადგენს აქტიური UE-ს შებრუნებული რიცხვის საშუალო მნიშვნელობას, ყოველთვის არ შეიძლება გამოითვალოს, ვინაიდან ის ჩვეულებრივ არ არის ხელმისაწვდომი რადიომთვლელის როლში. მეორეს მხრივ საშუალო UE აქტიური $E[x]$, არის სტანდარტიზებული ეფექტიანობის ძირითადი მახასიათებელი (Key Performance Indicators - KPI), რომელიც განსაზღვრულია 3GPP TS 32.425-ში და შესაბამისად, ჩვეულებრივ განხორციელდა კომერციულ პროდუქციაში. უფრო პრაქტიკულ შედეგს მივიღებთ, თუ $E[1/x]$ -ს შევცვლით $1/E[x]$ -ით და ამ შემთხვევაში გვექნება

$$T_{sch} = \frac{E[T_1]}{E[x]}, \quad x \geq 1$$

3GPP TS 32.425-ში ამას ეწოდება დაგეგმილი (scheduled) „IP გამტარუნარიანობა“. უნდა აღინიშნოს, რომ $E[x] \neq E[1/x]$ და ამის გამო T_{ue} და T_{sch} წარმოადგენენ გამტარუნარიანობის სხვადასხვა მაჩვენებლებს და მათი მნიშვნელობები განსხვავებულია.

დაგეგმილი გამტარუნარიანობა შეიძლება გამოისახოს აგრეთვე შემდეგნაირად

$$T_{sch} = \frac{S}{W}, \quad x \geq 1$$

სადაც S - ფაილის საშუალო ზომაა (ბაიტებში), ხოლო W - ფაილის გადაცემის საშუალო დროა.

დაგეგმილი გამტარუნარიანობის ეს ფორმა ხშირად გამოიყენება ფიქსირებული IP-ქსელის გამტარუნარიანობის ანალიზისას და მას უწოდებენ „ნაკადის გამტარუნარიანობას“.

დაგეგმილი გამტარუნარიანობა $Tsch$ ყოველთვის უფრო მცირეა ვიდრე მომხმარებლის გამტარიანობა Tue . ეს არის პირდაპირი შედეგი $1/x$ -

სა და იენსენის უთანასწორობისა (Jensen's inequality): $E[1/x] > 1/E[x]$ და ამის შედეგად $Tue > Tsch$.

VoLTE ქსელის დაგეგმარებისთვის პირველ რიგში უნდა განისაზღვროს, როგორ იქნება რეალიზებული სატრანსპორტო ქსელის აგება და რადიოშეღწევის ქსელი E-UTRA.

ძირითად განიხილება ქსელის ორგანიზების სამი ძირითადი ვარიანტი:

1. ქსელის აგება „სუფთა ფურცლიდან“. ამ შემთხვევაში ხორციელდება ყველა იმ კავშირგაბმულობის ობიექტის მშენებლობას, რომლებიც ჩართული უნდა იქნას ქსელში და კომპანიის საკუთრებას წარმოადგენს ამ ქსელის ყველა შემადგენელი კომპონენტები: საბაზო სადგურები, ანძები და სატრანსპორტო ქსელი;
2. ქსელის აგება უკვე მოქმედი ოპერატორებისაგან არენდით აღების მეთოდით.
3. ქსელის აგება უნივერსალური მეთოდით. ეს ვარიანტი მოიცავს ქსელის აგების ზემოთგანხილულ ორივე მეთოდს.

VoLTE რადიოქსელის დაგეგმარების პროცესში არსებობს განსხვავებები უსადენო რადიოდაშვების სხვა ტექნოლოგიების დაგეგმარების პროცესთან შედარებით. მთავარი განსხვავება ესაა OFDM ტექნოლოგიის ბაზაზე დაფუძნებული ახალი ტიპის მრავალსადგურიანი დაშვების გამოყენება, რის გამოც შემოდის ახალი ცნებები და იცვლება პროექტირების ალგორითმი. რადიოქსელების პროექტირების პროცესი შედგება ორი ეტაპისაგან:

- დაფარვის მაქსიმალური ფართობის ფორმირება;
- საჭირო ტევადობის უზრუნველყოფა.

თუ რადიოქსელის დაგეგმარება ხორციელდება სოფლად, ამ შემთხვევაში აბონენტთა სიმჭიდროვე მცირეა და საბაზო სადგურები უნდა განთავსდეს მაქსიმალური დაშორებით ერთმანეთისაგან, რათა თითოეულმა საბაზო სადგურმა დაფაროს რაც შეიძლება დიდი

ტერიტორია. ამასთან დაკავშირებით საჭიროა შერჩეული იქნას შესაბამისი სიხშირული დიაპაზონი. ამ შემთხვევაში უნდა ვიხელმძღვანელოთ წესით, რომ რაც დაბალია სიხშირე, მით უფრო შორს ვრცელდება რადიოსიგნალი. აღნიშნული ამოცანისთვის სავსებით მისაღებია სიხშირული დიაპაზონი 791-862 მჰც. დუპლექსის ტიპი ავირჩიოთ სიხშირული – FDD.

კავშირის სისტემების გამტარუნარიანობა არის ინფორმაციის გადაცემის მაქსიმალურ სიჩქარე, რომლის დროსაც უზრუნველყოფილია რამდენადაც შესაძლებელია შეცდომების დაბალი ალბათობა.

მონაცემთა გადაცემის სიჩქარის გაზრდის ფიზიკური არსი შეიძლება განსაზღვრული იქნას შენონის ფორმულის საშუალებით. მაგალითად SISO სისტემის ტევადობა განისაზღვრება შენონი-ხარტლის თეორემით

$$C = \log_2 \left(1 + \frac{E_b}{N_0} \right)$$

სადაც E_b/N_0 - სიგნალი/ხმაურის საშუალო თანაფარდობაა

MIMO სისტემის ტევადობის ფორმულა მიღებული იქნა ტელატარის (Telatar) მიერ 1995 წელს

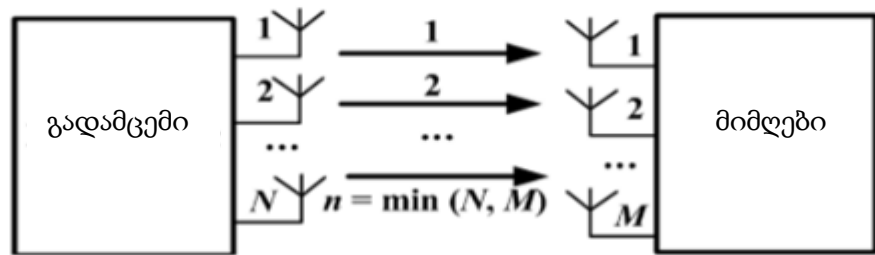
$$C = \log_2 \left[\det \left(I_M + \frac{E_b}{N_0 N_{tr}} \mathbf{H} \mathbf{H}^H \right) \right] = \sum_{i=1}^{\min(N_{tr}, M_r)} \log_2 \left(1 + \frac{E_b}{N_0 N_{tr}} \lambda_i \right)$$

სადაც λ_i – $\mathbf{H} \mathbf{H}^H$ -ს საკუთარი მნიშვნელობაა, $\det ()$ მატრიცის განმსაზღვრელია.

საკუთარი და სინგულარული მნიშვნელობები დაკავშირებულია გამოსახულებით $\lambda_i = \sigma_i^2$. ამრიგად, MIMO ყველაზე უფრო უკეთ მუშაობს მაღალი SNR-ის (სიგნალ/ხმაურის თანაფარდობა) დროს. ასევე უნდა აღინიშნოს, რომ, თუ გადამცემ მხარეს არხი ცნობილია, მან შეიძლება „უკეთეს“ ქვეარხში გააძლიეროს სიგნალი, და ამით გაზარდოს გამტარუნარიანობა.

MIMO არხის გამტარუნარიანობა ტოლია SISO არხების გამტარუნარიანობის, ე.ი. MIMO არხი შეიძლება წარმოდგენილი იქნას SISO არხების ერთობლიობის სახით. მონაცემთა გადაცემის სიჩქარე MIMO ტექნოლოგიისას პირდაპირპროპორციულად იზრდება ანტენების რიცხვის

გაზრდასთან ერთად. ნახ.5-ზე ნაჩვენებია MIMO კავშირის არხები, როგორც რამოდენიმე SISO არხი.



ნახ. 5. MIMO კავშირის არხების წარმოდგენა რამოდენიმე პარალელური SISO არხებით

ძალიან ხშირად, განსაკუთრებით ქალაქის პირობებში, კავშირის არხებში ადგილი აქვს სიგნალის ჩახშობას. ჩახშობის არსებობისას კავშირის არხის H მატრიცა და შესაბამისად კავშირის არხის გამტარუნარიანობა იქნება შემთხვევითი. კავშირის არხის გამტარუნარიანობის განაწილება განისაზღვრება კავშირის არხის H მატრიცის განაწილებით.

უმავეთული კავშირის რიალურ სისტემებში, როგორც წესი, ადგილი აქვს ჩახშობის სივრცით კორელიაციას სხვადასხვა ანტენების სიგნალებს შორის.

ჩახშობის სივრცით კორელიაციას როგორც წესი ადგილი აქვს ერთმანეთის მიმართ ახლოს განლაგებულ (რამდენიმე ათეული ტალღის სიგრძით ახლოს) ანტენებს შორის. სივრცითი კორელიაცია იწვევს არხის გამტარუნარიანობის შემცირებას. საჭირო ხდება არხის კორელიაციის კოეფიციენტის ანალიზი გადამცემი და მიღები ანტენების განლაგებასთან მიმართებაში.

კორელიაციის ინტერვალი დაყოვნებისადმი და კორელიაციის კოეფიციენტი განისაზღვრება სხივის მისვლის სხვაობით გადამცემიდან მიმღების ელემენტამდე.

სხივი, რომელიც მიმღებ ანტენას ეცემა θ კუთხით ყოვანდება ფაზით მეზობელ ელემენტებთან δ სიდიდით

$$\delta = kd \sin\left(\frac{\theta\pi}{180}\right)$$

სადაც $k = 2\pi/\lambda$ (λ - გასხვივების ტალღის სიგრძეა)

d – ანტენის ელემენტებს შორის მანძილია

θ – ვერტიკალური კუთხეა გადამცემ და მიმღებ ანტენებს შორის

ცნობილია MIMO კორრელირებული კავშირის არხის მარტივი მოდელი

$$H = R_r^{1/2} H_\omega R_t^{1/2}$$

სადაც R_t კორრელაციის მატრიცაა $N \times N$ ზომის გადამცემზე

R_r კორრელაციის მატრიცაა $M \times M$ ზომის მიმღებზე

R_r , R_r და R_t კორრელაციის მატრიცებს შორის არსებობს თანაფარდობა

$$R = R_t^T \otimes R_r$$

სადაც \otimes ნიშანი აღნიშნავს მატრიცების გამრავლების ოპერაციას.

R_r და R_t კორრელაციის მატრიცები შეიძლება განსაზღვრულნი იყვნენ მოდელის საფუძველზე, რომელიც საშუალებას გვაძლევს გამოვთვალოთ ეს მატრიცები გადამცემი და მიმღები ანტენების ელემენტებს შორის მანძილის საფუძველზე.

ამასთან, კორრელიაციის კოეფიციენტის მიახლოებითი შეფასება ხდება ფორმულით

$$\rho \approx e^{(-23(\frac{d}{\lambda})^2 \sin^2 \theta)}$$

თუ ანტენები განლაგებულია ერთ სიმაღლეზე, ამ შემთხვევაში მიმღების ელემენტებზე დაყოვნება არ არსებობს და $\rho = 1$. MIMO რეჟიმის რეალიზება პრობლემურია, მაგრამ ამ დროს ხელშეშლები მინიმალურია და სიგნალი/ხმაურის თანაფარდობა მაღალია. პრაქტიკაში ანტენები უნდა იყოს სხვადასხვა სიმაღლეზე, საბაზო სადგურის ანტენები უნდა იყოს არა ნაკლები 40 მეტრ სიმაღლეზე.

უნდა აღინიშნოს, რომ $\rho < 0,4$ შემთხვევაში კორრელიაცია ნაკლებად მოქმედებს არხის გამტარუნარიანობაზე, ხოლო $\rho < 0,2$ შემთხვევაში სიგნალები მიმღები ანტენის მეზობელ ელემენტებზე შეიძლება ჩაითვალოს არაკორელირებულად.

კორელაციის კოეფიციენტი მით უფრო მცირეა, რაც უფრო დიდია გადამცემი ფირფიტების დახრის კუთხე დედამიწის ზედაპირის მიმართ. პრაქტიკაში ყველაზე ხშირად გამოყენებული ($d / \lambda = 0,5$) ანტენების შემთხვევაში დახრის კუთხე არ უნდა იყოს 25 გრადუსზე ნაკლები, რათა რელიეფული იქნას MIMO ტექნოლოგიის უპირატესობა. დახრა ამცირებს მომსახურების ზონის რადიუსს, ამიტომ უფრო მისაღებს წარმოადგენს ფირფიტების გამოყენება გაზრდილი მანძილით მეზობელ ელემენტებს შორის $d / \lambda = 2/3$ მნიშვნელობამდე.

სიგნალების კორელაციის შემთხვევაში ადგილი აქვს დანაკარგებს ΔC , რომელიც მით უფრო მეტია, რაც მეტია კორელაციის კოეფიციენტი. გამტარუნარიანობაში დანაკარგების სიდიდე მიახლოებით შეიძლება შეფასდეს

$$\Delta C(\rho) = -2\log_2(1 - \rho)^2$$

$|\rho| \leq 0,4$ შემთხვევაში გამტარუნარიანობაში დანაკარგები არ აჭარბებს 0,5 ბიტ/წმ/ჰერც მნიშვნელობას, $|\rho| \geq 0,4$ -სას დანაკარგები საგრძნობლად იზრდება. თუ კორელაციის კოეფიციენტი მოდულით უახლოვდება ერთს, ამ შემთხვევაში MIMO კავშირის არხი გარდაიქმნება SISO კავშირის არხად.

ქსელის გამტარუნარიანობას, ან ტევადობას აფასებენ განსაზღვრულ პირობებში ფიჭის სპექტრულ ეფექტიანობის საშუალო მნიშვნელობაზე დაყრდნობით.

მობილური კავშირის სისტემების სპექტრალური ეფექტიანობა წარმოადგენს მაჩვენებელს, რომელიც გამოითვლება როგორც თანაფარდობა მონაცემთა გადაცემის სიჩქარისა გამოყენებული სიხშირეთა ზოლოს 1 ჰც-თან (ბიტ/წმ/ჰც). სპექტრული ეფექტიანობა წარმოადგენს სიხშირული რესურსის გამოყენების ეფექტიანობის მაჩვენებელს, ასევე ახასიათებს ინფორმაციის გადაცემის სიჩქარეს სიხშირეთა გამოყოფილ ზოლში.

სპექტრალური ეფექტიანობა შეიძლება გამოითვალოს, როგორც თანაფარდობა განსაზღვრულ გეოგრაფიულ ოლქში (ფიჭაში, ზონაში)

ქსელის ყველა აბონენტის მონაცემთა გადაცემის სიჩქარისა სიხშირეთა ზოლის 1 ჰც–თან (ბიტ/წმ/ჰც), ასევე როგორც თანაფარდობა ქსელის მაქსიმალური გამტარუნარიანობისა ერთი სიხშირული არხის ზოლის სიგანესთან.

FDD სისტემისთვის eNB საბაზო სადგურის 1 სექტორის საშუალო გამტარუნარიანობა შეიძლება მიღებული იქნას არხის სიგანის პირდაპირი გადამრავლებით არხის საშუალო სპექტრულ ეფექტიანობასთან:

$$R = S \cdot W,$$

სადაც S – საშუალო სპექტრალურ ეფექტიანობა (ბიტ/წმ/ჰც);

W - არხის სიგანე (მჰც) და $W=10$ მჰც.

DL ხაზებისთვის:

$$R_{DL} = 3,43 \cdot 10 = 34,3 \text{ მბიტ/წმ.}$$

UL ხაზებისთვის

$$R_{UL} = 1,829 \cdot 10 = 18,29 \text{ მბიტ/წმ.}$$

საბაზო სადგურის საშუალო გამტარუნარიანობა R_{eNB} გამოითვლება ერთი სექტორის გამტარუნარიანობის გამრავლებით საბაზო სადგურის სექტორების რაოდენობაზე, მაგალითისთვის ავიღოთ, რომ სექტორების რაოდენობა ტოლია 3–ის, მაშინ;

$$R_{eNB} = R_{DL/UL} \cdot 3$$

DL ხაზებისთვის:

$$R_{eNB.DL} = 34,3 \cdot 3 = 102,9 \text{ მბიტ/წმ.}$$

UL ხაზებისთვის

$$R_{eNB.UL} = 18,29 \cdot 3 = 54,87 \text{ მბიტ/წმ.}$$

დასკვნა

ქვემოთ მოყვანილია ძირითადი შედეგები, რომლებიც მიღებულია სადისერტაციო ნაშრომში, ასევე წარმოდგენილია VoLTE ტექნოლოგიის უპირატესობები:

1. შეფასებულია VoIP ტექნოლოგიის ორგანიზების ვარიანტები LTE ქსელში. შედარებულია OTT და VoLTE ტექნოლოგიები

2. გაანალიზებულია ფუნქციონალები როგორცაა სათაურის შეკუმშვა (Header Compression) და გაერთიანება/დაჯგუფება TTI (TTI bundling) მოყვანილი ფუნქციონალები საშუალებას იძლევა მნიშვნელოვნად გაიზარდოს VoLTE ტექნოლოგიის ხარისხი და ეფექტურობა.

3. დამუშავებულია, ქსელის დაფარვის გაუმჯობესების გეგმა თბილისის მაგალითზე, ნაჩვენებია სიმულაცია.

4. დამუშავებულია, დრაივტესტის მეთოდოლოგია, შერჩეულია აპარატურა და სამოდრო მარშრუტი.

5. განხორციელებულია ქსელის დაფარვის გაუმჯობესების სამუშაოები, აღწერილია დეტალურად და ნაჩვენებია მიღებული შედეგები დრაივტესტის საშუალებით.

6. შემუშავებულია ფორმულები ქსელის გამტარუნარიანობისა და პოტენციური აბონენტების რაოდენობის გამოსათვლელად.

7. სწრაფი დაკავშირება. თუ ტელეფონი არ კარგავს დროს 2G-ზე ან 3G-ზე გადასვლაზე, მაშინ ზარი ხორციელდება შესამჩნევად სრაფად და შეიძლება ის იყოს ორ წამზე ნაკლებიც.

8. ხმის გაუმჯობესებული ხარისხი. არა აქვს მნიშვნელობა, რაგინდ კარგი ხარისხის მიკროფონიც უნდა გააჩნდეს სმარტფონს, ყველაფერს აფუჭებს წინა თობის მობილური ქსელი. კავშირის ამ სტანდარტის საშუალებით სავსებით შეუძლებელია იდიალური ხმის გადაცემა. ხოლო VoLTE შეზღუდულია მხოლოდ სიგნალის მიღების სტაბილურობით. თუ აპარატს გააჩნია HD Voice კოდეკი, ხმა იქნება მკაფიო და გარეთა ხმაურები ქრება.

9. ფიჭური ქსელების ტევადობის გაზრდა. თითოეულ 3G საბაზოს შუძლია დაუკავშირდეს აბონენტების შეზღუდული რაოდენობა. თუ ლიმიტი ამოწურულია, მაშინ აპარატი უკავშირდება უფრო შორეულ საბაზოს და რაც იწვევს კავშირის ხარისხის გაუარესებას. LTE მოწყობილობებს გაჩნიათ სამჯერ მეტი ტევადობა ვიდრე 3G-ს და ექვსჯერ უფრო მეტი ვიდრე 2G-ს.

10. ხმისა და ინტერნეტ ტრაფიკის ერთდროული გადაცემა. როდესაც ხორციელდება საუბარი ტელეფონით, არცერთ სტანდარტს არ შეუძლია ამ დროს მონაცემების მიღება. ტრაფიკის მიღება განახლდება მხოლოდ მას შემდეგ, რაც აბონენტი დაკიდებს ყურმილს. VoLTE ტექნოლოგიაში ასეთი პრობლემა მოგვარებულია - მესენჯერის შეტყობინებების მიღება გრძელდება ლაპარაკის დროსაც კი.

11. ზარები საფასური შეიძლება იყოს ძალიან მცირე, ფაქტობრივად საუბრები VoLTE-ს საშუალებით მხოლოდ ინტერნეტ ტრაფიკს მოიხმარს.

დისერტაციის თემაზე გამოქვეყნებული შრომები

1. Giorgi Giorgadze. VoLTE radio network optimization. Coverage improvement in real network. Gtu and Unifg 1ST joint R&D International Conference “Dynamics and Recent Trends of Vary Industries In EU and Georgia: ICTS Adoption in Supply Chain Management”. © Publishing House “Technical University”, 2018, 17-19 October, Tbilisi, Georgia, pp. 52-55.
2. აბულაძე ვ., ხუნწარია ჯ., ჯორჯაძე ი., გიორგაძე გ. ხმოვანი სიგნალის გადაცემის ქსელის უსაფრთხოების მოდელი. “ენერჯია”, 2019, №1(89), გვ. 90-95.
3. აბულაძე ვ., ხუნწარია ჯ., ჯორჯაძე ი., გიორგაძე გ. MPLS ქსელში მონაცემთა ნაკადის ავტომატური მართვის მოდელი. “მართვის ავტომატიზებული სისტემები”, 2019, №1(28), გვ. 106-111.
4. გიორგაძე გ., ჯორჯაძე ი., აბულაძე ვ., ხუნწარია ჯ. მეოთხე თაობის რადიო ქსელის დატვირთვისა და გამტარუნარიანობის ანალიზი. “მართვის ავტომატიზებული სისტემები”, 2019, №1(28), გვ. 112-117.

Resume

The work includes evolution of mobile networks, this period of evolution shows that mobile services has important place in our everyday life. Voice call implementation in LTE network is quite difficult and different than it was in previous generation networks such as GSM and WCDMA. So was created VoLTE (Voice over Long Term Evolution) which provides full usage of LTE network resources, in this case, for implementation voice call, handover between Random Access Technologies (RAT) is not necessary anymore. This means that the call is being processed in LTE network without handover in GSM or WCDMA networks. It is also noteworthy that instead of circuit switch is used packet switch and customer have opportunity use HD voice.

In VoLTE technology using a software-hardware complex IP Multimedia Subsystem (IMS), is very important – this is the main component for all next IP networks. IMS is a subsystem, which unifies transmitting speech signals, such as: authentication, user authorization, call management, routing, PSTN - Public Switch Telephony Network, billing, additional services and other functions which are not in Evolved Packet Core (EPC).

In the work is shown that TTI Bundling optimizes the uplink (cell edge) coverage for services like VoLTE. For services such as VoIP, the packet size is small and the inter-arrival time of VoIP packets is constant (i.e., AMR codec provides one packet every 20ms during active period and one silence indicator (SID) at 160ms). In a cell edge scenario, the probability of decoding PUSCH as error is more so instead of waiting for HARQ feedback from eNB, the UE performs initial transmission and re-transmissions in 4 consecutive Transmit Time Intervals (TTIs)

Atoll, a multi-technology mobile network planning and optimization platform, was used to develop theoretical and practical issues for solving the problems in the dissertation. By the help of this program was created a simulation, which described how would the cell coverage be improved. After this for evaluation of conducted works was held the drive test in Tbilisi, The car which was used during the process was equipped with portable laptop with licensed platform Terms Investigation, which controls all other devices such as mobile phones and spectrum scanner. Three user equipments Sony Xperia Z5, which measure services. Portable scanner PCTEL Seegull MX which provides whole bandwidth scanning of GSM/UMTS/LTE.

According to the abovementioned information, main goal of this research is to outline advantages of VoLTE technologies. Overview of hardware and software updates which were done during the implementation of this technology for offering customers a continuous VoLTE service. Improving 4G coverage on the example of Geocell's mobile network owned by JSC Silknet.

In this research there are some formulas by which we can calculate cell throughput and amount of potential subscribers that the base station will be able to provide. The formulas are being based on following elements: number of sectors in BTS, total amount of channels, amount of channels in one cell, cell traffic

channel quantity, usage of traffic used by the subscriber during the month, the average scheduled bandwidth of the network.

Presented information, network coverage improvement examples, call quality improvement examples and implemented analyse formulas may be used by existing operators, or may be used during new mobile cell building process.