

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

ცკვიტინიძე ია

სიგნალების ფორმირებისა და დამუშავების  
ახალი ალგორითმების კვლევა მოძრავი კავშირის  
ტელეკომუნიკაციური ქსელებისათვის

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად  
წარდგენილი დისერტაციის

ა ვ ტ ო რ ე ფ ე რ ა ტ ი

თბილისი  
2013 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის  
ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის ტელეკომუნიკაციის  
დეპარტამენტის ტელეკომუნიკაციის ქსელების

მიმართულებაზე

სამეცნიერო ხელმძღვანელი: ჯემალ ბერიძე – სრული პროფესორი,  
ტექნიკურ მეცნიერებათა დოქტორი

რეცენზენტები: 1. \_\_\_\_\_  
2. \_\_\_\_\_

დაცვა შედგება \_\_\_\_\_ 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-ს ბიბლიოთეკაში,

ხოლო ავტორეფერატისა - სტუ-ს ვებგვერდზე

სადისერტაციო საბჭოს მდივანი

\_\_\_\_\_

/

/

## სამუშაოს ზოგადი დახასიათება

**თემის აქტუალობა.** მოძრავი კავშირი წარმოადგენს ტელეკომუნიკაციის მნიშვნელოვან სექტორს. კავშირის ინფრასტრუქტურის განვითარებაში დიდი როლი შეასრულა რადიოტექნოლოგიამ. კერძოდ, მოძრავი კავშირის რადიოტექნოლოგიებმა, რომლებსაც აქვს შესაძენევი უპირატესობა სადენიან კავშირთან შედარებით ღირებულების, სისწრაფის, მომსახურების დანახარჯებისა და მოქნილობის მიხედვით. ამასთან, რადიოტექნოლოგიის გამოყენება აბონენტს საშუალებას აძლევს დაამყაროს კავშირი ნებისმიერ ღროს და ნებისმიერი ადგილიდან, ნებისმიერ სხვა (მოძრავ ან სტაციონალურ) აბონენტთან.

ტელეკომუნიკაციური ქსელების განვითარების ახალი ეპოქის დასაწყისად მიჩნეულია მე-20 საუკუნის 70-იანი წლები, როდესაც დაიწყო კომპიუტერული ტექნიკის სწრაფი დანერგვა და საჭირო გახდა ამ ტექნიკური საშუალებების გაერთიანება – ქსელების შექმნა. ეს პროცესი გრძელდება დღემდე თანაც ზვავისებურად. ყოველივე ამან გამოიწვია ის, რომ თუ 50 წლის წინ ტელეკომუნიკაციური ქსელების ტრაფიკის 100% შეადგენდა ბგერითი (სატელეფონო) ტრაფიკი, ამჟამად არსებული სტატისტიკის თანახმად სატელეფონო ტრაფიკი შეადგენს მხოლოდ 20%. ტელეკომუნიკაციური ქსელები თანდათან გადაიქცა მულტისერვისულ ქსელებად. ტრაფიკის დანარჩენი 80% მოდის ვიდეოინფორმაციისა და მონაცემების ტრაფიკზე, რომლებიც მომხმარებლისათვის წარმოადგენენ ან ქმნიან მომსახურების ახალ სახეებს. ეს პროცესი კიდევ უფრო ღრმავდება, რაც თავის მხრივ იწვევს საინფორმაციო ნაკადების განუხრელ ზრდას და ამ ნაკადების საბოლოო მომხმარებლამდე (სააბონენტო ტერმინალამდე) მიყვანის აუცილებლობას.

საინფორმაციო ტექნოლოგიების (IT- Information Technology) ინდუსტრიაში ტელეკომუნიკაციურმა ქსელებმა დაიკავეს უმნიშვნელოვანესი ადგილი და ასრულებენ ინფორმაციის მიტანის ფუნქციას წყაროდან მიმღებამდე საჭირო სინქარით, გარანტირებულად და უსაფრთხოდ.

ნებისმიერი ტელეკომუნიკაციური ქსელი შეიძლება წარმოდგენილი იქნას ორი ძირითადი ქსელის საბაზო (CN-Core Network) და მიღწევის (AN-Access Network) ქსელის ერთობლიობით. მულტისერვისული ტელეკომუნიკაციური ქსელების განვითარება ცვლის როგორც საბაზო, ასევე მიღწევის ქსელების აგებისა და განვითარების იდეოლოგიას. ასე, მაგალითად, არსების კომუტაცია ქსელებში, რომელზეც ძირითადად სატელეფონო შეტყობინებების მიმოცვლა იყო ორიენტირებული, იცვლება პაკეტური კომუტაციით, რაზეც ორიენტირებულია მონაცემთა გადაცემა. მომსახურების მომხმარებლის სურვილი და უფლებაა მომსახურება მიიღოს დედამიწის ნებისმიერ წერტილში (ზღვაზე, ხმელეთზე და ჰაერში), სტაციონალურად და ნებისმიერი სისწრაფით მოძრაობისას. ამ ყველაფერმა განაპირობა IT ტექნოლოგიებში ისეთი მომსახურების ჩამოყალიბება, როგორცაა მონაცემების გადაცემა მობილური ტერმინალებისათვის გარკვეული სიჩქარით და მონაცემის ამ ნაკადით მომსახურების სხვადასხვა სახეების მიწოდება მომხმარებლისათვის.

რადიოტექნოლოგიების ფართო დანერგვისათვის ხელშემშლელ ფაქტორს წარმოადგენს სისწორული რესურსების შეზღუდულობა, ამიტომ გადაცემის სისწრაფის გაზრდისათვის რჩება მეორე გზა - სპექტრალური ეფექტურობის გაზრდა. თავის მხრივ, სპექტრალური ეფექტურობის გაზრდა მოითხოვს მრავალპოზიციანი ამპლიტუდური ან/და ფაზური მოდულაციების გამოყენებას. ამ შემთხვევაში კი საგრძნობლად მცირდება გადაცემული სიგნალის ხელშემშლამდგრადობა (ენერგეტიკული ეფექტურობა).

უკანასკნელ წლებში, 3G ტექნოლოგიებიდან 4G ტექნოლოგიებზე გადასვლის აუცილებლობამ ტელეკომუნიკაციური ტექნოლოგიების სფეროში დაკავებული მეცნიერების წინაშე დააყენა სპექტრალური ეფექტურობის და ენერგეტიკული ეფექტურობის ერთდროული, მრავალჯერადი გაზრდის პრობლემა. ამ პრობლემის გადაწყვეტამ უნდა უზრუნველყოს WiFi და Wimax ქსელებში გადაცემის სისწრაფე 100 მბიტ/წმ (Downlink- მიმართულებით), ხოლო LTE - ქსელებში ჯერ რამდენიმე ასეული მბიტ/წმ, შემდგომში კი (2020 წლისათვის) - 1 გბიტ/წმ. ცხადია, ასეთი კოლოსალური სიჩქარეების მიღწევისათვის საჭიროა მყარი, მეცნიერული საფუძვლების შექმნა და ეს

უპირველესად უნდა წარმოადგენდეს გადასაცემი სიგნალების ეფექტური კოდირების მეთოდების ძიებას.

მაღალეფექტურ მობილურ ტექნოლოგიებში ამჟამად გამოიყენება და შემდგომი კვლევის პროცესში იმყოფება გადასაცემი სიგნალების კოდირების მრავალი მეთოდი, რომელთაგან მე-4 თავის მობილური ტექნოლოგიებისათვის უპირატესობა ენიჭება ტურბო კოდირებას, სივრცით-დროით ბლოკურ კოდირებას, სივრცით-დროით ვისოსისებრ კოდირებას, სივრცით-დროით კოდირებას სფერული დეკოდირებით. ამასთან, აღსანიშნავია, რომ სივრცით-დროითი კოდები (როგორც ორთოგონალური ისე არაორთოგონალური) ეფექტურია მხოლოდ MIMO სისტემების გამოყენების შემთხვევაში. წინამდებარე ნაშრომში ჩატარებულია სივრცით-დროითი ბლოკური კოდების, სივრცით-დროითი ვისოსისებრი კოდების ეფექტურობის კვლევა. ასევე შემუშავებულია MIMO სიგნალების დამუშავების ალგორითმი მიმდებ მხარეზე.

**სამუშაოს მიზანი** – სადისერტაციო სამუშაოს მიზანია სპექტრალური და ენერგეტიკული ეფექტურობის გაზრდა სივრცით დროითი კოდირებისა (ბლოკური და ვისოსისებრი) და MIMO სისტემების (OFDM მოდულაციით) გამოყენებით; მიღებული თეორიული შედეგების შემოწმება კომპიუტერული მოდელირების საშუალებით.

**მეცნიერული კვლევის მეთოდები** – სამუშაოს ძირითადი შედეგები მიღებულია ციფრული კავშირის თეორიის, ალბათობის თეორიის, მათემატიკური სტატისტიკისა და კომპიუტერული მოდელირების (Matlab-ის გამოყენებით) საფუძველზე.

კვლევებისათვის სადისერტაციო სამუშაოში გამოყენებულია შემდეგი მათემატიკური აპარატები: რიცხვითი მეთოდების თეორია და წრფივი ალგებრა, ტელეკომუნიკაციის თეორია, ალბათობის თეორია და მათემატიკური სტატისტიკა, ხელშეშლებამდგრადი კოდირების თეორია.

*ძირითადი შედეგები და მეცნიერული სიახლე:*

1. დამუშავებული და გამოკვლეულია ახალი სივრცით-დროითი კოდებით მომუშავე MIMO სისტემებში 4 გადამცემი და 3 მიმღები ანტენით, რომლებიც იძლევიან სხვა არსებულ (გამოკვლეულ) კოდებთან შედარებით  $\approx 1$  დბ ენერგეტიკულ მოგებას.
2. გამოკვლეულია MIMO სისტემების მიმღებ მხარეზე D-BLAST და V-BLAST ალგორითმების გამოყენების ეფექტურობა გადამცემი და მიმღები ანტენების სხვადასხვა რაოდენობისათვის, მაგრამ პირობის დაცვით  $N_{\text{მიმღ}} < N_{\text{გად}}$ .
3. დამუშავებულია გადამცემის პიკური სიჩქარის არხში სიგნალ/ხელშეშლის ფარდობაზე დამოკიდებულების განსაზღვრის მეთოდი და მიღებულია კონკრეტული შედეგები MMSE (Minimum Mean Squared Error – სიგნალების წრფივი დეტექტირება საშუალო-კვადრატული შეცდომის მინიმუმის კრიტერიუმით) და QRM-MLD (QR decomposition and the M-algorithm – Maximum Likelihood Detection - სიგნალების არაწრფივი დეტექტირება მაქსიმალური მიახლოების კრიტერიუმით) მეთოდების გამოყენებით.

სადისერტაციო ნაშრომში ჩატარებული კვლევების შედეგები შეიძლება ჩამოყალიბებული იქნას შემდეგნაირად:

1. 3G თაობის მობილური სისტემებიდან ქსელური რესურსების გამოყენების მიზნით, გლობალური ურთიერთთავსებადობისათვის უპირატესობა ენიჭება W-CDMA-ს. იგი იყენებს სისწორულ ზოლს სიგანით 5 მგჰც. ამასთან, არსებობს 3G-დან 4G-ზე გადასვლის აუცილებლობა, რაც უზრუნველყოფს დამატებით მულტიმედიაურ მომსახურებას. სისტემების ანალიზმა გვიჩვენა, რომ 4G თაობის სისტემები იქნება უფრო იაფი, ვიდრე 3G. ისინი შეიქმნება უკვე არსებულ ქსელებზე და არ დასჭირდებათ სერიოზული დანახარჯები სრულიად ახალი ქსელების ასაგებად.
2. ტურბოკოდების მოდელირება იძლევა მნიშვნელოვნად უკეთეს შედეგს სხვადა კოდებთან შედარებით. ეს არის შეცდომების მაკორექტირებელი მძლავრი საშუალება. ტურბოკოდების გამოყენების შედეგად მიღებული

ენერგეტიკული მოგება შეიძლება გამოყენებულ იქნას გადაცემის ტევადობის გაზრდის და გატარების ზოლის ეკონომიისათვის, რაც ამცირებს მონაცემთა გადაცემის სისტემების შექმნისა და ექსპლუატაციის ღირებულებას.

3. მაღალი სიჩქარით ინფორმაციის გადასაცემად საჭიროა გამოყენებული იქნას სივრცით-დროითი კოდები, რადგან ადგილი აქვს ექო სიგნალების წარმოქმნას და დიდ ინტერფერენციებს. ამ წინააღმდეგობების დასაძლევად ხელსაყრელია ხელშეშლებამდგრადი კოდირება-დეკოდირების გამოყენება. კერძოდ, სივრცით-დროითი, ბლოკური და გისოსისებრი კოდირება.

4. MIMO სიგნალების დამუშავების დროს მნიშვნელოვანი ფაქტორია მიმღებში დეკოდირება-მოდულაციის სირთულე. ამ მიზნით მიზანშეწონილია V-BLAST ალგორითმის გამოყენება, რომელიც ტექნიკური რეალიზაციის მხრივ მარტივია. ამასთან, იძლევა გადაცემის სიჩქარის უმნიშვნელო შემცირებას D-BLAST ალგორითმთან შედარებით.

5. განსაკუთრებულ შედეგს იძლევა კავშირის სისტემები MIMO ანტენებით, რაც ზრდის არხის ხელშეშლამდგრადობას. ეს კი ამცირებს შეცდომით მიღებული ბიტების რაოდენობას მონაცემთა გადაცემის სიჩქარის შემცირების გარეშე, სიგნალების მრავალსივნიანი გავრცელების პირობებში.

6. კვლევის ექსპერიმენტულ ეტაპზე შემოწმებულ იქნა პარამეტრ Bit-Error-ის (ბიტური შეცდომის ალბათობა) დამოკიდებულება სიგნალ/ხელშეშლის მნიშვნელობაზე რელიეს არხში, ორობითი ფაზური მოდულაციის დროს, 4 გადამცემი და 3 მიმღები ანტენის მქონე MIMO სისტემის გამოყენების დროს.

7. კომპიუტერული მოდელირებით დამტკიცებულ იქნა, რომ MIMO სისტემის შემოთავაზებული მეთოდი იძლევა 1 დბ ენერგეტიკულ მოგებას არსებულ მოდელებთან შედარებით.

8. დადასტურებული იქნა, რომ ენერგეტიკული ეფექტურობის გაზრდა შეიძლება გამოყენებული იქნას რადიოდაფარვის ზონის გაზრდისათვის, რადგანაც იქმნება საშუალება რადიოტალღები გავრცელდეს უფრო დიდ მანძილზე, ე.ი. გაიზარდოს ფიჭის რადიუსი. ეს კი თავის მხრივ

შესაძლებლობას იძლევა გარკვეული ტერიტორიის დაფარვისათვის გამოყენებული იქნას ნაკლები რაოდენობის საბაზო სადგურები, ეს კი იძლევა მნიშვნელოვან ეკონომიკურ ეფექტს.

### ***ნაშრომის პრაქტიკული მნიშვნელობა***

1. დამუშავებული სივრცით-დროითი ბლოკური და სივრცით-დროითი გისოსისებრი კოდების MIMO სისტემებთან ერთად გამოყენების ალგორითმები, საშუალებას იძლევა რაოდენობრივად იქნას შეფასებული გადაცემის სიჩქარის გაზრდის მნიშვნელობები კოდირების კონკრეტული პარამეტრების დროს.

2. MIMO სიგნალების მიღების დამუშავებული ალგორითმები საშუალებას იძლევიან შერჩეული იქნას მიღების მოდიფიკაციები გადაცემის სიჩქარის რეალიზაციის სირთულესთან დამოკიდებულებით.

3. დამუშავებული სივრცით-დროითი კოდების გამოყენება MIMO სისტემებში საშუალებას იძლევა კავშირის არხებში შეცდომის ალბათობით  $5 \cdot 10^{-3}$  ალამოუტის ალგორითმთან შედარებით მიღწეული იქნას ენერგეტიკული მოგება (0,8÷1,0)დბ.

4. დისერტაციაში მიღებული პრაქტიკული შედეგები შეიძლება გამოყენებული იქნას მე-4 თაობის მობილური ქსელების პროექტირების პროცესში კონკრეტული რადიოარხების დროს საჭირო გადაცემის სიჩქარის მისაღწევად.

***პუბლიკაციები და სამუშაოს აპრობაცია.*** დისერტაციის ძირითადი შინაარსი წარმოდგენილია 7 ნაბეჭდ შრომაში. შედეგები მოხსენიებულია 2 საერთაშორისო კონფერენციაზე (თბილისი, 2010წ, თბილისი, 2011წ), სტუ-ს ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის 1-ლ და მე-2 თემატურ სემინარებზე (თბილისი, 2011, 2012წწ.)

***დისერტაციის სტრუქტურა.*** დისერტაცია მოიცავს შესავალს, 4 თავს, შედეგებს და მათ გასჯას, დასკვნას და გამოყენებული ლიტერატურის ჩამონათვალს. მთელი მოცულობა შეადგენს 110 გვერდს, მათ შორის 90



ძირითადი ტექსტია 35 ნახაზით და 5 ცხრილით. გამოყენებული ლიტერატურის სია შეიცავს 45 დასახელებას.

### ნაშრომის შინაარსი

**შესავალში** დასაბუთებულია თემის აქტუალობა, მოყვანილია გამოსაკვლევი საკითხების მოკლე მიმოხილვა, ჩამოყალიბებულია სადისერტაციო ნაშრომის მიზნები და ამოცანები.

მოძრავი კავშირი წარმოადგენს ტელეკომუნიკაციის მნიშვნელოვან სექტორს. კავშირის ინფრასტრუქტურის განვითარებაში დიდი როლი შეასრულა რადიოტექნოლოგიამ. კერძოდ, მოძრავი კავშირის რადიოტექნოლოგიებმა, რომლებსაც აქვს შესამჩნევი უპირატესობა სადენიან კავშირთან შედარებით ღირებულების, სისწრაფის, მომსახურების დანახარჯებისა და მოქნილობის მიხედვით. ამასთან, რადიოტექნოლოგიის გამოყენება აბონენტს აძლევს საშუალებას დაამყაროს კავშირი ნებისმიერ დროს და ნებისმიერი ადგილიდან, ნებისმიერ სხვა (მოძრავ ან სტაციონალურ) აბონენტთან.

საინფორმაციო ტექნოლოგიების (IT- Information Technology) ინდუსტრიაში ტელეკომუნიკაციურმა ქსელებმა დაიკავეს უმნიშვნელოვანესი ადგილი და ასრულებენ ინფორმაციის მიტანის ფუნქციას წყაროდან მიმდებამდე საჭირო სიჩქარით, გარანტირებულად და უსაფრთხოდ.

რადიოტექნოლოგიების ფართო დანერგვისათვის ხელშემშლელ ფაქტორს წარმოადგენს სისწორული რესურსების შეზღუდულობა, ამიტომ გადაცემის სისწრაფის გაზრდისათვის რჩება მეორე გზა - სპექტრალური ეფექტურობის გაზრდა. თავის მხრივ, სპექტრალური ეფექტურობის გაზრდა მოითხოვს მრავალპოზიციანი ამპლიტუდური ან/და ფაზური მოდულაციების გამოყენებას. ამ შემთხვევაში კი საგრძნობლად მცირდება გადაცემული სიგნალის ხელშეშლამდგრადობა (ენერგეტიკული ეფექტურობა).

მაღალეფექტურ მობილურ ტექნოლოგიებში ამჟამად გამოიყენება და კვლევის პროცესში იმყოფება გადასაცემი სიგნალების კოდირების მრავალი

მეთოდი, რომელთაგან მე-4 თაობის მობილური ტექნოლოგიებისათვის უპირატესობა ენიჭება ტურბოკოდირებას, სივრცით-დროით ბლოკურ კოდირებას, სივრცით-დროით გისოსისებრ კოდირებას, სივრცით-დროით კოდირებას სფერული დეკოდირებით. ამასთან, აღსანიშნავია, რომ სივრცით-დროითი კოდები (როგორც ორთოგონალური ისე არაორთოგონალური) ეფექტურია მხოლოდ MIMO სისტემების გამოყენების შემთხვევაში. წინამდებარე ნაშრომში ჩატარებულია სივრცით-დროითი ბლოკური კოდების, სივრცით-დროითი გისოსისებრი კოდების ეფექტურობის კვლევა. ასევე შემუშავებულია MIMO სიგნალების დამუშავების ალგორითმი მიმღებ მხარეზე.

**პირველ თავში** წარმოდგენილია 3G თაობის მობილური სატელეკომუნიკაციო სისტემები. კერძოდ, დახასიათებულია 5 არსებული სტანდარტი: UMTS/IMT-2000, W-CDMA, CDMA2000, DECT და PHS. შედარებულია მათი ძირითადი პარამეტრები, მოყვანილია ფიზიკური არხის სტრუქტურა სისტემაში UTRA/IMT-2000, ასევე სპექტრის გაფართოვებისა და მოდულაციის აუცილებლობის მნიშვნელობა. აქვე განხილულია 3,5G თაობის მობილური კავშირის სისტემები, მათი გარდამავალი პოზიცია 3G და 4G სისტემებს შორის. დასაბუთებულია 4G თაობის მობილური სისტემების დანერგვის აუცილებლობა არსებულ ტექნოლოგიებთან შედარებით, მათი მნიშვნელობა მომსახურების ხარისხის დონის ამაღლების თვალსაზრისით. ასევე აუცილებლობა თანამედროვე მულტიმედიის ტექნოლოგიის განვითარების მიზნით. მოყვანილია სხვადასხვა ტელეკომუნიკაციური ტექნოლოგიების შესაძლებლობების ამსახველი დიაგრამა.

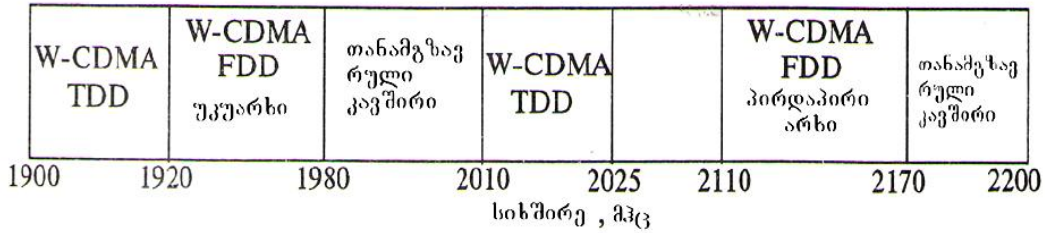
IMT-2000 გვთავაზობს კავშირის უზრუნველყოფას ნებისმიერ პირობებში რადიოტალღების გავრცელებით, როგორც შენობის შიგნით, ისე გარეთ და მოძრავ ობიექტებში (ავტომობილებში, თვითმფრინავებში და ა.შ.).

**მობილური სისტემები UMTS/IMT-2000.** მესამე თაობის მობილური კავშირი იგება მონაცემთა პაკეტური გადაცემის საფუძველზე. მე-3 თაობის ქსელები როგორც წესი მუშაობენ დაახლოებით 2 გჰც სიხშირეზე,

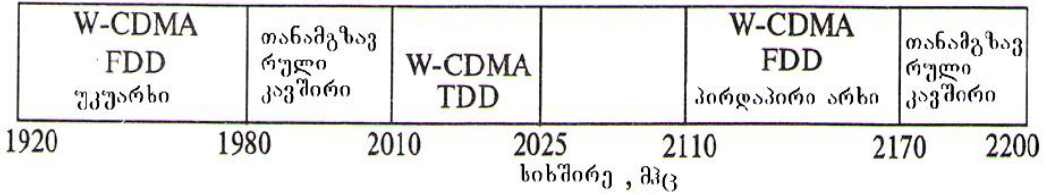
მონაცემთა გადაცემის სიჩქარით 2 მბიტ/წმ. ისინი ორგანიზაციას უკეთებენ ვიდეოსატელეფონო კავშირს, სატელევიზიო (ვიდეოკავშირის) გადაცემების მიღებას დაბალი ხარისხით.

მობილური სისტემა UMTS/IMT-2000-ს არ შეუძლია მთლიანად გამოიყენოს 3G გამოყოფილი სიხშირული სპექტრი, რადგან ამ დიაპაზონში განლაგებულია სისტემები DECT და PHS. სისტემაში გამოიყენება როგორც სიხშირული დუბლექსი (FDD) ისე დროებითი დუბლექსი (TDD) (ნახ.1). სიხშირული დუბლექსის დროს პირდაპირი და უკუკავშირის არხებით ინფორმაცია გადაიცემა სიხშირულ დიაპაზონებში 1920-1980 და 2110-2170 მგჰც. ამავე დროს სისტემაში TDD გამოიყენება მხოლოდ ერთი ზოლი.

საბოლოო გამოკვლევებმა გვიჩვენა, რომ TDD სისტემა FDD სისტემაზე უკეთესია CDMA-ს ადაპტური მოდემების რიცხვის გაზრდისას, ისე, როგორც პირდაპირი და უკუარხის ურთიერთობის შენაცვლება შეიძლება იყოს გამოყენებული მოდემის ისეთი პარამეტრების შერჩევისას, როგორცაა გადაცემის სიჩქარე და სიმბოლოზე ბიტების რაოდენობა. ეს სისტემას საშუალებას აძლევს, რაც შეიძლება პროდუქტიულად გამოიყენოს არხის გამტარუნარიანობა ანუ გაზარდოს ეფექტურობის მაჩვენებელი – ხვედრითი გადაცემის სიჩქარე ბიტ/წმ/ჰც.



სპექტრის განაწილება სისტემაში UTRA



სპექტრის განაწილება სისტემაში IMT-2000

ნახ.1. სპექტრის განაწილება სისტემაში UTRA და IMT-2000

ცხრ.1.-ში მოყვანილია UTRA/IMT-2000 სისტემის ძირითადი პარამეტრები, რომლებიც აკმაყოფილებენ 3G სისტემების მიმართ წაყენებულ მოთხოვნებს, ისინი უზრუნველყოფენ მომხმარებელს მონაცემთა გადაცემის სიჩქარით 2 მგბიტ/წმ-ზე მეტი და მომსახურების მაღალი ხარისხით. ამ ამოცანის გადაწყვეტა შეიძლება ცვალებადი გაფართოების კოეფიციენტის – OVSF მქონე ორთოგონალური კოდებით.

მეორე თაობის IS-95 სისტემებისაგან განსხვავებით, რომელთაც აქვთ საერთო პილოტ-არხები, მესამე თაობის სისტემებს UTRA/IMT-2000 პილოტ-სიმბოლოები შეაქვთ მომხმარებლის მონაცემთა ნაკადში, რაც განაპირობებს ადაპტური ანტენების გამოყენებას საბაზო სადგურში.

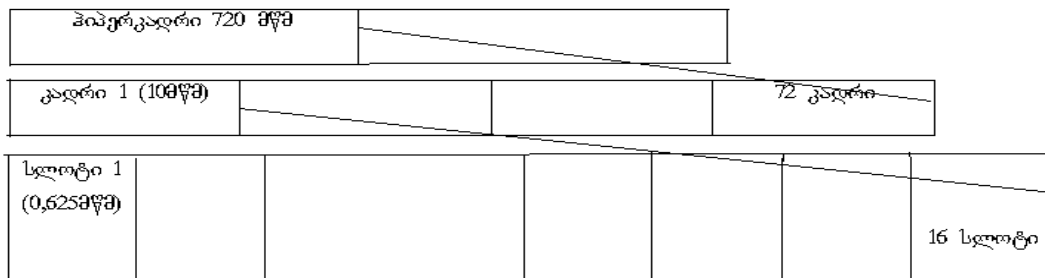
## UTRA/IMT-2000 სისტემის ძირითადი პარამეტრები

რადიომიწვევის ტექნოლოგია	FDD: DS-CDMA TDD: TDMA/CDMA
მიღების არე	სათავსოს შიგნით და გარეთ, მანქანაში
ჩიპური გადაცემის სიხარე (მეგაჩიპების რაოდენობა 1წმ-ში)	UTRA: 4.096/8.192/16384 IMT-2000: 1.024/4.095/8.192/16384
არხის ზოლი (მჰც)	UTRA: 5/10/20 IMT: 1.25/5/10/20
ნაიკვისტის პარამეტრი (არჩევითობის კოეფიციენტი)	0,22
დუპლექსური რეჟიმები	FDD და TDD
მონაცემთა გადაცემის საარხო სიხარე (კბიტ/წმ)	FDD – პირდაპირი არხი: 16/32/64/128/256/512/1024  FDD – უკუარხი: 16/32/64/128/256/1024/2048  TDD – პირდაპირი და უკუარხი: 512/1024/2048/4096
ფრეიმის (ბლოკის) სიგრძე	10 მწმ
გაფართოების კოეფიციენტი	FDD: ცვლადი 4-დან 256-მდე. TDD: ცვლადი 2-დან 16-მდე
დეტექტირების სქემა	კოჰერენტული, პილოტ-სიმბოლოების დროითი მულტიპლექსირებით
შიდა მომსახურება (მართვა ფიჭის შიგნით)	FDD: ასინქრონული, TDD: სინქრონული
გამოსხ. სიმძლავრით მართვა	ღია და დახურული პეტლი
გადასაცემი სიგნალის სიმძლავრის დინამიკური დიაპაზონი	80 დბ – პირდაპირი არხი 30 დბ – უკუარხი
მომსახურების გადაცემა	პროგ.გადაცემა, სისშ. მიხედვით გადაცემა.

სისტემის გამართული მუშაობისათვის როგორც ძირითადი სათავსოს შიდა პირობებში, ისე სათავსოს გარეთ, შიდაფიჭური ასინქრონული მართვა ხდება FDD რეჟიმში. ამასთან, არ არის საჭირო სინქრონიზაციის გარე წყაროები. თუმცა TDD რეჟიმში სინქრონიზაცია ფიჭური უჯრედის შიგნით აუცილებელია იმისათვის, რომ არსებობდეს სრული მიღწევა მეზობელი საბაზო სადგურების დროით ინტერვალებთან მომსახურების გადაცემის დროს. ეს მიღწევა საბაზო სადგურებს შორის სინქრონიზაციით.

რადიომიღწევის ტექნოლოგია ძირითადად ეხება ღია სისტემების ურთიერთქმედების მოდელის ფიზიკურ დონეს ISO/OSI (International Standardization Organization/Open Systems Interconnection), შემოთავაზებულს სტანდარტიზაციის საერთაშორისო ორგანიზაციის ISO მიერ.

**ფიზიკური არხები.** სატრნსპორტო არხების ორგანიზაციისათვის იყენებენ ფიზიკურ დონეს, რომელშიც ინფორმაცია წარმოდგება იერარქიული სტრუქტურის მქონე კადრების სახით, (ნახ.2.), რაც მსგავსია მრავალჯერადი მიღწევის GSM სისტემის სტრუქტურისა დროითი დაყოფით.



ნახ. 2. ფიზიკური არხის სტრუქტურა UTRA/IMT-2000 სისტემებში

როგორც ნახაზიდან ჩანს, UTRA/IMT-2000 სისტემებში ჰიპერკადრი შედგება 72 რადიოკადრისაგან. თითოეული მათგანი დაყოფილია 16 დროით ინტერვალად (სლოტად). თითოეული ინტერვალის ხანგრძლივობაა 0,625 მწმ. ამასთან, რადიოკადრის ხანგრძლივობა 10 მწმ-ია, ხოლო ჰიპერკადრის ხანგრძლივობა – 720 მწმ. რადიოკადრის ხანგრძლივობა ემთხვევა

სალაპარაკო კადრის ხანგრძლივობას. ეს ფორმატი მოხერხებულია მობილურ სისტემებში ვიდეოსაუბრების დასამყარებლად.

FDD რეჟიმში ფიზიკური პირდაპირი არხი განისაზღვრება ფსევდოშემთხვევითი მიმდევრობით (მისამართის კოდით) და სიხშირით.

TDD რეჟიმში ფიზიკური არხი განსაზღვრულია თავისი ფსევდოშემთხვევითი მიმდევრობით, სიხშირითა და დროითი ინტერვალით.

*სპექტრის გაფართოება და მოდულაცია.* DS-CDMA (Direct Sequence CDMA) სისტემის ხარისხი შეზღუდულია ინტენფერენციით. ინტენფერენციის დიდი ნაწილი ჩნდება იმავე ფიჭის ფარგლებში სხვა მომხმარებლის სიგნალების შედეგად, ასევე მეზობელი ფიჭების მომხმარებლების სიგნალების გამო. ასეთი ინტენფერენცია ცნობილია მრავალმიღწევადი ჯგუფური ინტენფერენციის სახელით MAI (Multiple Access Interference).

MAI-ს ურთიერთინტენფერენციის შემცირების მიზნით და ასევე ხარისხის და გამტარუნარიანობის გაუმჯობესების მიზნით IMT-2000/UTRA სისტემის ფიზიკურ არხს აფართოებენ ორი სხვადასხვა კოდის გამოყენებით: გაფართოების კოდები (spreading codes) და მასკრემბლირებელი კოდები (scrambling codes). უნდა აღვნიშნოთ, რომ IS-95 CDMA მრავალმიღწევად სისტემაში კოდური დაყოფით პირდაპირ არხში გამოიყენება 3 სხვადასხვა ორთოგონალური კოდი: უოლშის 64 ელემენტოვანი კოდი, სინფაზური და კვადრატურული კოდირება ფსევდოშემთხვევითი მიმდევრობებით და PNI და PNQ-კოდები („მოკლე“ სიგრძით 32768 ელემენტი და „გრძელი“ სიგრძით  $2^{42} - 1$  ელემენტი). IS-95 „მოკლე“ კოდები სპეციფიურია თითოეული ფიჭისათვის და ერთნაირია როგორც პირდაპირი არხში, ისე უკუ არხში ფიჭის უჯრედისათვის, მაშინ როცა „გრძელი“ კოდები სპეციფიურია მომხმარებლებისათვის და იდენტურია პირდაპირ და უკუარხებში. მრავალმიღწევადი სისტემები cdma2000 კოდური დაყოფით, ძალიან ჰგავს IS-95 სტანდარტის სისტემებს.

სტანდარტიზირებული გადაწყვეტილებების უმეტესობა დამყარებულია რეგიონალური ფართოზოლოვანი მრავალმიღწევადი სისტემის აგების პრინციპზე არსების კოდური დაყოფით W-CDMA (Wideband Code Division Multiple Access), რაც განპირობებულია მათი თვისებებით, რომლებიც აკმაყოფილებს 3G თაობის ტელეკომუნიკაციის სისტემების ძირითად მოთხოვნებს.

W-CDMA სისტემა გამოირჩევა მოქმედების ფართო ზონით გავრცელების სხვადასხვა პირობებში და მაღალი გამტარუნარიანობით. ამ სისტემაში სიხშირეების განაწილება გამარტივებულია გამოყოფილი სიხშირული დიაპაზონის მრავალმხრივი გამოყენების გამო. CDMA-ს დადებით მხარეს წარმოადგენს მრავალსიხივიანი მიღებასთან შეწინააღმდეგების უნარი, რაც მიიღწევა RAKE დემოდულატორის საშუალებით, რომელიც აკუმულირებას უკეთებს სხვადასხვა გზიდან მიღებული სიგნალების ენერჯიას. ყველა ამ თვისების გამო სისტემებმა მიიღო სახელწოდება: UMTS Terrestrial Radio Access (UTRA), Wideband – CDMA(W-CDMA) და cdma2000.

W-CDMA - მრავალჯერადი ფართოზოლოვანი მიღწევა კოდური დაყოფით რადიონტერფეისის ტექნოლოგიაა, რომელიც იყენებს ორ სიხშირულ ზოლს – 5 მჰც სიგანით. W-CDMA (3GPP Release-4) მუშაობს დიაპაზონში 1900-2100 მჰც. იგი არჩეულია მობილური ოპერატორების მიერ, ფართოზოლოვანი რადიომიღწევისათვის 3G მომსახურების უზრუნველყოფისათვის. ეს ტექნოლოგია ოპტიმიზირებულია მაღალსიხივიანი მულტიმედია ვიდეოს ტიპის მომსახურების უზრუნველსაყოფად, ინტერნეტში მიღწევისათვის და ვიდეოკონფერენციისათვის; უზრუნველყოფს მიღწევის სიხარეს 2მბიტ/წმ-მდე მოკლე მანძილებზე და 384 კბიტ/წმ დიდ მანძილებზე სრული მობილურობით. ასეთი სიდიდის მონაცემთა გადაცემის სიხარის მიღწევა საჭიროებს სიხშირის ფართო ზოლს, ამიტომ W-CDMA სიხშირული ზოლის სიგანე შეადგენს 5 მჰც.



W-CDMA პერსპექტიულია ქსელური რესურსების გამოყენების მიზნით და გლობალური ურთიერთთავსებადობისათვის.

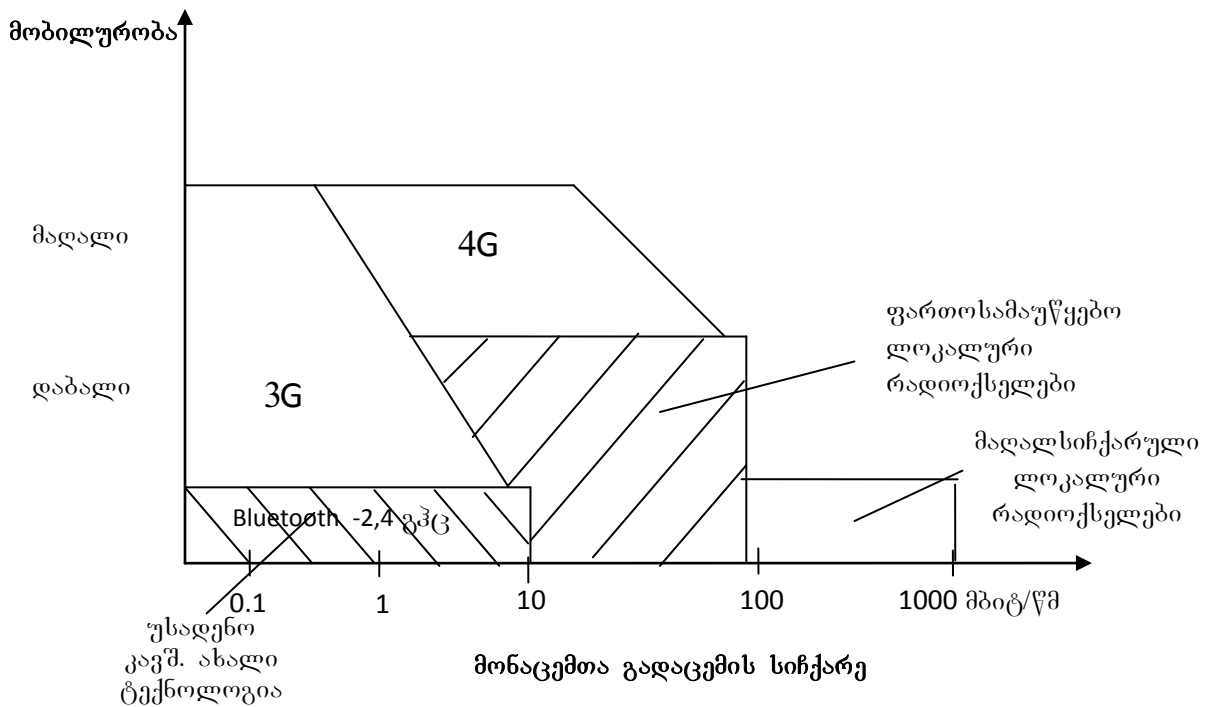
3,5G – ეს არის მობილური კავშირის მესამე თაობა, მაღალი სიჩქარით, მაგრამ 4G თაობაზე გაცილებით დაბალი. ამ თაობას მიეკუთვნება ტექნოლოგიები, რომლებიც უზრუნველყოფენ მონაცემთა პაკეტურ გადაცემას სიჩქარით 14,4 მბიტ/წმ. მაგრამ პრაქტიკაში ეს სიჩქარე შეადგენს 3,6 მბიტ/წმ-ს. ეს ტექნოლოგია წარმოადგენს გარდამავალს 3G-სა და 4G-ს შორის.

მიუხედავად იმისა, რომ 3G-ს აქვს აუცილებელი პარამეტრები. იმისათვის, რომ გახდეს კომერციული, წარმოება უკვე ამზადებს საფუძველს მომავალი უსადენო კავშირის ტექნოლოგიებისათვის, რომელიც ამჟამად აღინიშნება, როგორც 4G თაობის სისტემები.

4G ტექნოლოგიები ითავსებს ინტეგრირებულ მულტიმედიაურ მომსახურებას, ისეთს, როგორცაა ტელეკონფერენცია და უკაბელო ინტერნეტი. მას აქვს გაცილებით ფართო სიხშირული ზოლი. ეს ხარისხი არ შეიძლება იქნას უზრუნველყოფილი 3G თაობის სისტემებით. სისტემების ანალიზმა აჩვენა, რომ 4G თაობის სისტემები იქნება უფრო იაფი, ვიდრე 3G. ისინი შეიქმნებიან უკვე არსებულ ქსელებზე და არ დაჭირდებათ სერიოზული დანახარჯები ახალი მოწყობილობების ასაგებად. არ იქნება საჭირო ძვირადღირებული სიხშირული ზოლის შექმნა, რამდენადაც მისი დიდი ნაწილი არალიცენზირებულია. გაცილებით მნიშვნელოვანია ის, რომ 4G ტექნოლოგია დაინერგება თანდათან, არსებული სტანდარტების გამოყენებით, სასარგებლო გამოცდილების დაგროვებით და არსებული სტანდარტების მკვეთრი შეცვლის გარეშე.

4G სისტემები უზრუნველყოფენ მონაცემების გადაცემას სიჩქარით 100 მბიტ/წმ და მეტი. მიუხედავად იმისა, რომ 4G სისტემებთან დამოკიდებულებაში ამჟამად ბევრი გაურკვევლობაა, ექსპერტთა უმრავლესობის აზრით, 4G სისტემების ძირითადი განსაკუთრებულობა იმაში მდგომარეობს, რომ ისინი უზრუნველყოფენ თავისუფალ „გადაადგილებას“

სხვადასხვა სტანდარტებს შორის, ასევე კომპიუტერულ ქსელებს, თანამგზავრული კავშირის სისტემებს, აუდიო და ვიდეო ინფორმაციის მიმოცვლას მომხმარებლებს შორის და ა.შ., რაც აუცილებლად საჭიროს გახდის გამოყენებული იქნას ახალი ტექნოლოგიები და ინტელექტუალური ტერმინალები. სხვადასხვა ტელეკომუნიკაციური ტექნოლოგიების შესაძლებლობების გამომსახველი დიაგრამა მოყვანილია ნახ.3 -ზე.



ნახ.3. შეტყობინებათა გადაცემის სხვადასხვა ტექნოლოგიების სიჩქარული შესაძლებლობები

**მეორე თავში** განხილულია 3G და 4G თაობის მობილურ სისტემებში გამოყენებული კოდირების მეთოდები. კერძოდ, ტურბოკოდირება, სივრცით-დროითი ბლოკური კოდირება, სივრცით-დროითი გისოსისებრი კოდირება. გაანალიზებულია მათი გამოყენების აუცილებლობა ზემოაღნიშნული სისტემების არსებში წარმოქმნილი მიუყენებების პროცესების გასანეიტრალებლად. წარმოდგენილია ტურბოკოდების მოდელირების შედეგები და მათი შედარება უბრალო ხვევად კოდებთან. ტურბოკოდირება დახასიათებულია, როგორც შეცდომების მძლავრი მაკორექტირებელი საშუალება, რომელიც

შესაძლებლობას იძლევა, რაც შეიძლება მეტად მიუახლოვდეთ არხის გამტარუნარიანობას.

**ხვევალი კოდირება. ტურბოკოდირება.** ხვევალი კოდები ხასიათდება კოდური სისწრაფით  $r=k/n$ . ბლოკური კოდებისაგან განსხვავებით, აქ  $k$  და  $n$  აღნიშნავს შესაბამისად ხვევალი კოდერის შესასვლელებისა და გამოსასვლელების რაოდენობას. ხვევალი კოდი შეიძლება წარმოდგენილი იქნას წარმომქმნელი პოლინომებისაგან  $g^{(p,q)}(D)$  ( $p=1,2,\dots,k-1$ ,  $q=1,2,\dots, n-1$ ) შედგენილი  $n \times k$  მატრიცის სახით. ხვევალი კოდერის აგებისათვის აუცილებელია  $k$  ძვრის რეგისტრები. ამ რეგისტრების ჯამურ სიგრძეს  $M_c$  ეწოდება კოდერის მესხიერება.

ხვევალი კოდის სხვა მახასიათებელს წარმოადგენს კოდის კონსტრუქციული სიგრძე  $K$ , რომელიც განსაზღვრავს გამოსასვლელი ბიტების იმ მაქსიმალურ რაოდენობას კოდერის მოცემულ გამოსასვლელზე, რომელზედაც გავლენას ახდენს ერთი შესასვლელი ბიტი.

$$K = 1 + \max_p (M_p), \quad (1)$$

სადაც  $p$  – შემავალი ნაკადის ნომერია,  $M_p$  არის –  $p$ -M შემომავალ ნაკადთან დაკავშირებული  $p$ -ური ძვრის რეგისტრის სიგრძე.

ხვევალი კოდის კოდირების პროცესი შედგება ორი ეტაპისაგან: თავდაპირველად ხდება თითოეული წარმომქმნელი პოლინომის კოეფიციენტის შეკვრა შესაბამის შესასვლელთან

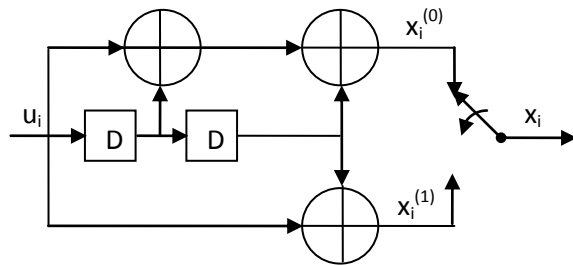
$$V_i^{(p,q)} = \sum_{j=0}^{M_p} u_{i-j}^{(p,q)} g_j^{(p,q)}, \quad (2)$$

სადაც  $q$  გამოსასვლელი ნაკადის ნომერია, შემდეგ ფორმირდება გამოსასვლელი ნაკადი:

$$x^{(q)} = \sum_{p=0}^{k-1} V^{(p,q)} \quad (3)$$

პრაქტიკაში ჩვეულებრივ იყენებენ ხვევად კოდერებს ერთადერთი შემავალი ნაკადით ( $k=1$ ), ამიტომ მათი წარმომქმნელი პოლინომების ინდექსი -  $p$  ჩვეულებრივ გამოიტოვება.

მაგალითისათვის, ნახ.4.-ზე ნახვენებია ხვევადი კოდის კოდერი სიხქარით  $1/2$ , კონსტრუქციული სიგრძით  $K=3$  და წარმომქმნელი პოლინომებით  $g^{(0)}(D)=1+D+D^2$ ,  $g^{(1)}(D)=1+D^2$ . სიმოკლისათვის წარმომქმნელი პოლინომების კოეფიციენტები ერთიანდებიან ორობით სიტყვად და წარმოდგებიან ათვლის რვაობით სისტემაში. მაგალითად, ნახ.4.-ზე ხვევადი კოდი აღწერილია წარმომქმნელი  $(7,5)_8$  პოლინომის წყვილით, სადაც 8 ნიშნავს რვაობით წარმოდგენას.



ნახ. 4. ხვევადი კოდის კოდერი.

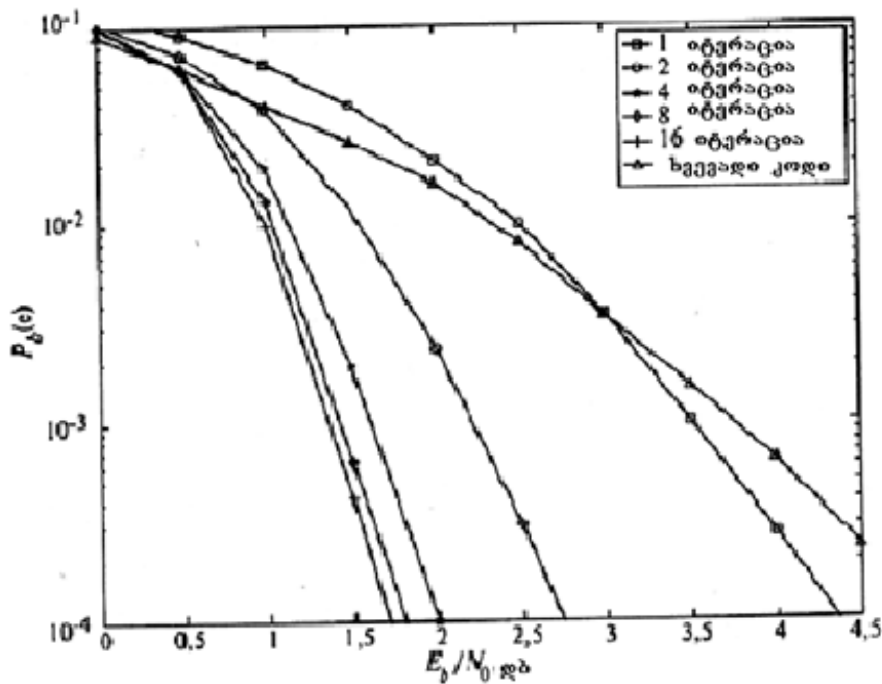
ბოლო წლებში მობილურ სისტემებში გამოიყენება ხვევადი კოდირების გაუმჯობესებული ვარიანტ-ტურბოკოდირება. ხვევადი კოდირების მნიშვნელოვან უპირატესობას ბლოკურ კოდებთან შედარებით წარმოადგენს მისი თვისება ებრძოლოს პაკეტურ შეცდომებს. ამავე ამოცანას ემსახურება ბიტების გადანაცვლება (გადაჯვარედინება) გადაცემის დროს (უკუგადანაცვლება მიმღებ მხარეზე). ტურბოკოდერები აიგებიან ხვევადი კოდერების გამოყენებით.

ტურბოკოდების მახასიათებლებზე მოქმედებს ბევრი ფაქტორი:

- დეკოდირების ალგორითმები;
- იტერაციების რაოდენობა დეკოდირების დროს;

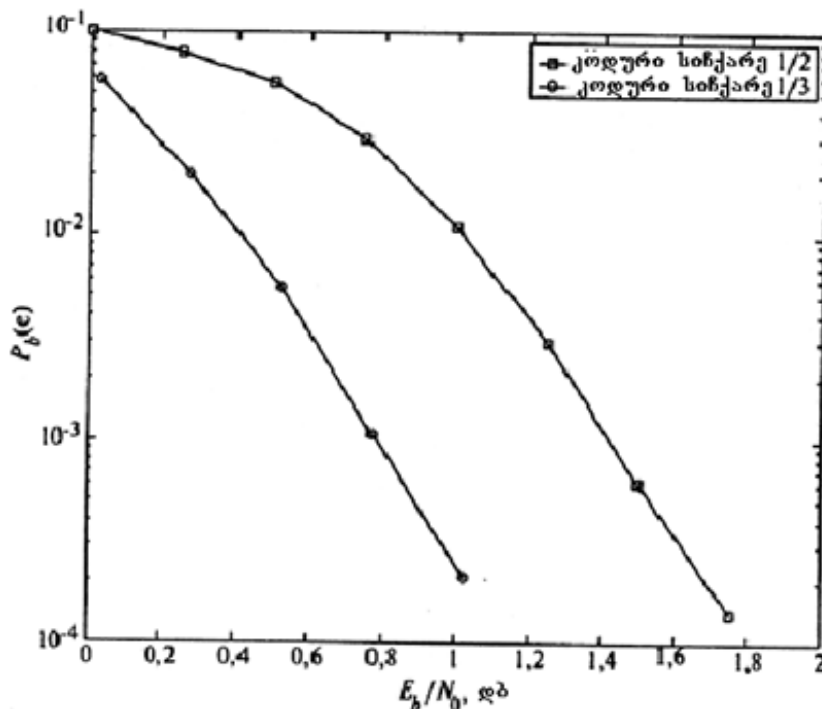
- გადაჯვარედინების ტიპები;
- კადრის ზომა (გადაჯვარედინების ზომა)
- წარმომქმნელი პოლინომები და ა. შ.

ნახ.5-ზე ნაჩვენებია შეცდომის ალბათობის დამოკიდებულება სიგნალ/ხელშეშლის ფარდობაზე. ტურბოდეკოდერის გამოსასვლელში იტერაციის სხვადასხვა რაოდენობის დროს. ნახაზიდან ჩანს, რომ ტურბოკოდის მახასიათებელი დეკოდირების ერთი იტერაციის დროს შეესაბამება ხვევადი კოდის მახასიათებელს სიგნალ/ხელშეშლის ფარდობის მცირე მნიშვნელობის დროს, ხოლო, იტერაციის რაოდენობის გაზრდით, სიგნალ/ხელშეშლის თვალსაზრისით გაცილებით უკეთესი შედეგი მიიღება.



ნახ. 5 ტურბოკოდის მახასიათებელი იტერაციის სხვადასხვა რაოდენობის დროს

კავშირის რეალურ სისტემებში, ტურბოკოდის მისაღებად, სინქარით  $r=1/2$ , ჩვეულებრივ იყენებენ ამოვარდნებს (პერფორაციას). კოდების გადაცემა ამოვარდნების გარეშე შესაძლებელია, რასაც მიყვავართ ტურბოკოდის სინქარემდე  $r=1/3$ . ნახ.6.-ზე მოცემულია ასეთი კოდების მახასიათებლები. ყველა შემოწმებული ბიტის გადაცემა იძლევა საშუალებას მივიღოთ მოგება 0.6 დბ., როდესაც შეცდომის ალბათობა  $P_b=10^{-4}$ .

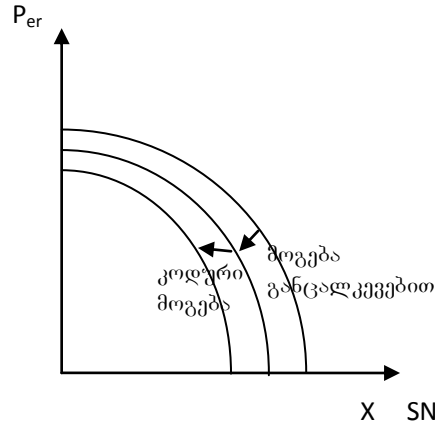


ნახ. 6 ტურბოკოდის მახასიათებლები ამოვარდნებით და ამოვარდნების გარეშე

შესამე თავში განხილულია სივრცით-დროითი კოდები გადაცემის მაღალი სიჩქარის მქონე 4G თაობის მობილურ სისტემებში. დახასიათებულია სივრცით-დროითი კოდირებები MIMO სისტემებში მრავალრიცხოვანი ანტენების გამოყენებით, რაც მნიშვნელოვან როლს ასრულებს კოდური და განცალკევების მოგებების მისაღებად. შედარებულია სივრცით-დროითი ბლოკური და გისოსისებრი კოდების მახასიათებლები. წარმოდგენილია MIMO ტექნოლოგიის თავისებურებები და შესაძლებლობები, რაც იძლევა არხის ხელშეშლებამდგრადობის მნიშვნელოვნად გაზრდის საშუალებას. ამ თავში მოყვანილია სივრცით-დროითი კოდირების პრინციპი სხვადასხვა რაოდენობის ანტენების მაგალითზე (ანტენების სხვადასხვა კონფიგურაციით). აქვე გაანალიზებულია MIMO სიგნალების დამუშავების ალგორითმი მიმღებ მხარეზე. კერძოდ, D-BLAST და V-BLAST მოდიფიკაციები და მათი შედარება.

მოგება განცალკევებით არის ხარისხის გაუმჯობესება, რომელიც შეიძლება მიღწეული იქნას სისტემაში ანტენების განცალკევების გამოყენებით. ნახ.7.-ზე მოცემულია ტიპური კოდური მოგება და მოგება განცალკევებით.

$Y$  დერძზე განთავსებულია  $P_{er}$  შეცდომის ალბათობა,  $X$ -ზე სიგნალ/ხელშეშლის დამოკიდებულება – SNR.  $P_{er}$  შეცდომის ალბათობა ჩვეულებრივ გამოიყენება ციფრული ქსელის სისტემების დახასიათებისათვის.



ნახ. 3.1. კოდური მოგება და მოგება განცალკევებით.

როგორც წესი, იგი განსაზღვრავს მიმღების შესასვლელზე მონაცემთა შეცდომით მიღებული ბიტების დამოკიდებულებას გადაცემული ბიტების მთელ რაოდენობასთან. არსებობს სივრცით-დროითი კოდის ორი ტიპი: სივრცით-დროითი ბლოკური კოდები (STBC) და გისოსისებრი კოდები.

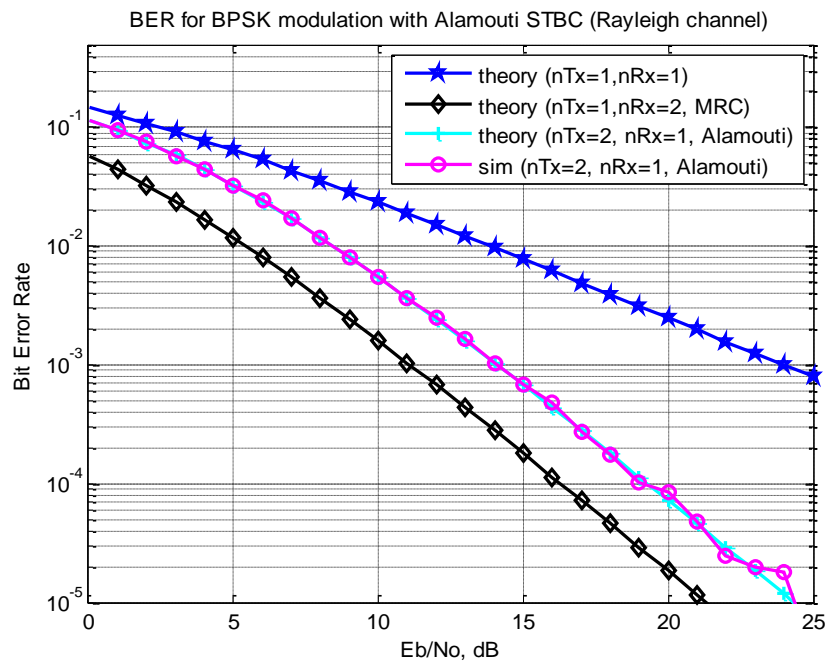
სივრცით-დროითი ბლოკური და გისოსისებრი კოდების მახასიათებლები ემთხვევა ერთმანეთს. განსხვავება იმაშია, რომ სივრცით-დროითი გისოსისებრი კოდი დეკოდირების სირთულის გაზრდის ხარჯზე იძლევა დამატებით კოდურ მოგებას.

MIMO სიგნალების დამუშავების ალგორითმი მიმღებ მხარეზე შემუშავებულია Bell-Labs ლაბორატორიის მიერ და აქვს D-BLAST, V-BLAST მოდიფიკაციები. ეს ალგორითმები გამოიყენება მხოლოდ იმ შემთხვევაში, როდესაც გადამცემი ანტენების რაოდენობა არ აღემატება მიმღები ანტენების რაოდენობას.

D-BLAST ალგორითმი იძლევა საშუალებას მიღწეული იქნას მონაცემთა გადაცემის უფრო მაღალი სიჩქარე, ვიდრე V-BLAST ალგორითმი, თუმცა უფრო რთულია რეალიზაციაში. იმის გათვალისწინებით, რომ V-BLAST

ალგორითმის გამოყენებისას სინქარის დანაკარგი უმნიშვნელოა, დანაკარგების მწარმოებელთა უმრავლესობა მიდის რეალიზაციის გამარტივებისაკენ.

მეთხე თავში განხილულია არხის ხელშეშლამდგრადობის გაზრდის მეთოდები მოდულაციის სხვადასხვა სახის გამოყენებით სივრცით-დროითი კოდირების დროს. წარმოდგენილია სისშირული არხების ორთოგონალური მულტიპლექსირება OFDM, რომელიც წარმოადგენს გადაცემის სისწრაფის გაზრდის ყველაზე თანამედროვე მეთოდს, როგორც „დაღმავალ“, „ისე აღმავალ არხებში“. წარმოდგენილია ალამაუტის სივრცით-დროითი ბლოკური კოდირება STBC, 2 გადამცემი და ერთი მიმღები ანტენის მაგალითზე (ნახ. 8).

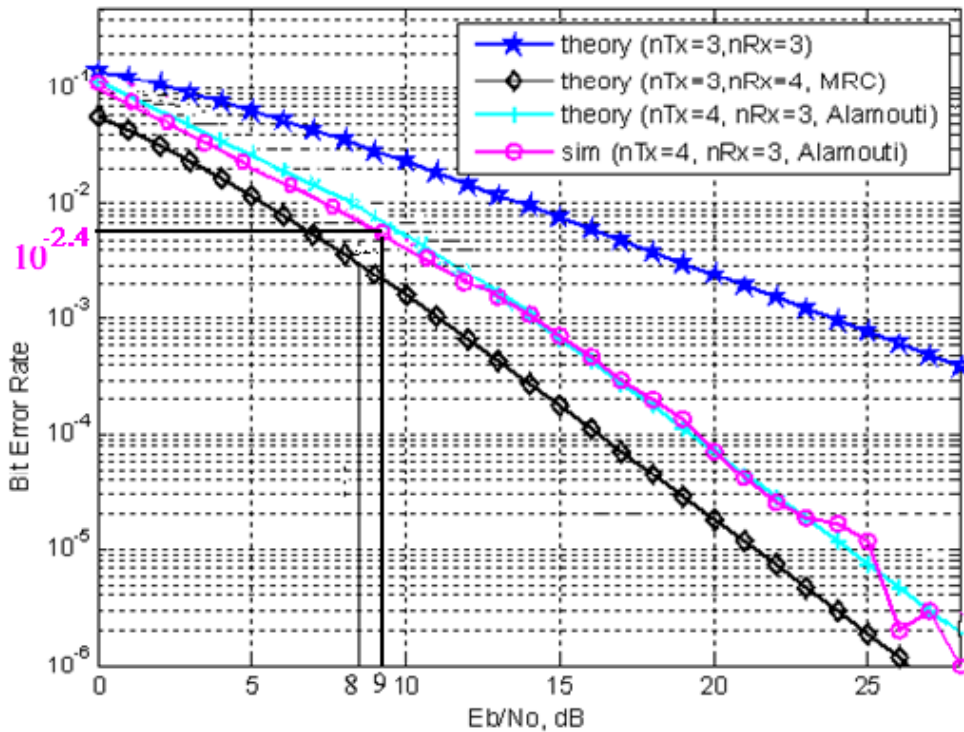


ნახ. 8. შეცდომის ალბათობის დამოკიდებულება სიგნალ-ხელშეშლის ფარდობაზე BPSK ორობითი ფაზური მოდულაციის დროს ალამაუტის STBC .

შედარებულია მოდულაციის სხვადასხვა სახეები არხის ხელშეშლამდგრადობის თვალსაზრისით. კერძოდ, QAM და QPSK მოდულაციების უპირატესობა BPSK მოდულაციასთან შედარებით უსადენო ტელეკომუნიკაციებში. ალამაუტის მიერ შემუშავებული მეთოდის მაგივრად, ჩვენს მიერ შემუშავებული იქნა MIMO-ს ახალი კონფიგურაცია და



ჩატარებული იქნა მოდელირება. შედეგად მიღებულია ენერგეტიკული მოგება 1 დბ არსებულ მოდელთან შედარებით. აღსანიშნავია, რომ შედეგები მიღებულია პროგრამა მათლახის საშუალებით ჩატარებული მოდელირებით (ნახ. 9).



ნახ. 9. შეცდომის ალბათობის დამოკიდებულება სიგნალ-ხელშეშლის ფარდობაზე ალამოუტის STBC .(რელიეს არხი). 4X3

კვლევის ექსპერიმენტის ეტაპზე ჩვენს მიერ დასახული იქნა ამოცანა: შევვემოწმებინა პარამეტრი Bit-Error (ბიტური შეცდომის ალბათობა) დამოკიდებულება სიგნალ/ხელშეშლის მნიშვნელობაზე რელიეს არხში, ორობითი ფაზური მოდულაციის დროს, სივრცით-დროითი ბლოკური კოდირების დროს.

პირველ რიგში, იმისათვის, რომ დავრწმუნებულიყავით ჩვენს მიერ შერჩეული მოდელირების სისწორეში, შევამოწმეთ ლიტერატურაში არსებული მოდელირების შედეგები, რომელიც ნახვენებია ნახ. 8-ზე. კერძოდ,

ავიღეთ 2 გადამცემი და 1 მიმღები ანტენა. შედეგმა დაადასტურა ჩვენი მოდელირების სისწორე.

ამის შემდეგ შევცვალეთ გადამცემი ანტენების რაოდენობა 4-ით, მიმღები ანტენებისა - 3-ით. ანალოგიურად ვიანგარიშე BER-ის დამოკიდებულება  $E_b/N_0$  –ზე.

შედეგები ნაჩვენებია ნახ. 9.-ზე. შედეგების ანალიზი გვიჩვენებს, რომ მეორე შემთხვევაში, ანუ ჩვენს მიერ ჩატარებული მოდელირების (4 გადამცემი და 3 მიმღები ანტენა) ერთი და იგივე BER მნიშვნელობა მიიღება 1 დბ-ით ნაკლები სიგნალ/ხელშეშლის ფარდობის დროს. ე.ი. ენერგეტიკული მოგება შეადგენს 1 დბ.

აქვე ნაჩვენებია, რომ მიღებული ენერგეტიკული მოგება შეიძლება გამოყენებული იქნას რადიოდაფარვის ზონის გაზრდისათვის, რაც საშუალებას იძლევა რადიოტალღები გავრცელდეს უფრო დიდ მანძილზე. ე.ი. გაიზარდოს ფიჭის რადიუსი. ანუ ტერიტორიის დაფარვისათვის გამოყენებული იქნას ნაკლები რაოდენობის საბაზო სადგურები. რადიოტალღების გავრცელებაზე მოქმედი ფაქტორების მიერ გამოწვეული მიღების შესაფასებლად განხილულია დღეისათვის მსოფლიო პრაქტიკაში გამოყენებული მოდელები: ოკამურა-ჰატას, უოლფიშ-იკეგამისა და COST-Hata-ს მოდელი. გამოთვლების შედეგები იძლევა გარკვეული ტერიტორიის დაფარვისათვის საჭირო საბაზო სადგურების შემცირების შესაძლებლობას, ე.ი. ეკონომიკურ ეფექტს.

## დასკვნა

სადისერტაციო ნაშრომში ჩატარებული კვლევების შედეგები შეიძლება ჩამოყალიბებული იქნას შემდეგნაირად:

1. 3G თაობის მობოლური სისტემებიდან ქსელური რესურსების გამოყენების მიზნით, გლობალური ურთიერთ თავსებადობისათვის უპირატესობა ენიჭება W-CDMA-ს. იგი იყენებს სისწორულ ზოლს სიგანით 5 მგჰც. ამასთან, არსებობს 3G-დან 4G-ზე გადასვლის აუცილებლობა, რაც უზრუნველყოფს დამატებით მულტიმედიაურ მომსახურებას. სისტემების ანალიზმა გვიჩვენა, რომ 4G თაობის სისტემები იქნება უფრო იაფი, ვიდრე 3G. ისინი შეიქმნება უკვე არსებულ ქსელებზე და არ დასჭირდებათ სერიოზული დანახარჯები სრულიად ახალი ქსელების ასაგებად.
2. ტურბოკოდების მოდელირება იძლევა მნიშვნელოვნად უკეთეს შედეგს ხვევად კოდებთან შედარებით. ეს არის შეცდომების მაკორექტირებელი მძლავრი საშუალება. ტურბოკოდების გამოყენების შედეგად მიღებული ენერგეტიკული მოგება შეიძლება გამოყენებულ იქნას გადაცემის ტევადობის გაზრდის და გატარების ზოლის ეკონომიისათვის, რაც ამცირებს მონაცემთა გადაცემის სისტემების შექმნის და ექსპლუატაციის ღირებულებას.
3. მაღალი სიჩქარით ინფორმაციის გადასაცემად საჭიროა გამოყენებული იქნას სივრცით-დროითი კოდები, რადგან ადგილი აქვს ექო სიგნალების წარმოქმნას და დიდ ინტერფერენციებს. ამ წინააღმდეგობების დასაძლევად ხელსაყრელია ხელშეშლებამდგრადი კოდირება-დეკოდირების გამოყენება. კერძოდ, სივრცით-დროითი, ბლოკური და გისოსისებრი კოდირება.
4. MIMO სიგნალების დამუშავების დროს მნიშვნელოვანი ფაქტორია მიმღებში დეკოდირება-დემოდულაციის სირთულე. ამ მიზნით მიზანშეწონილია V-BLAST ალგორითმის გამოყენება, რომელიც ტექნიკური რეალიზაციის მხრივ მარტივია. ამასთან, იძლევა გადაცემის სიჩქარის უმნიშვნელო შემცირებას D-BLAST ალგორითმთან შედარებით.

5. განსაკუთრებულ შედეგს იძლევა კავშირის სისტემები MIMO ანტენებით, რაც ზრდის არხის ხელშეშლამდგრადობას. ეს კი ამცირებს შეცდომით მიღებული ბიტების რაოდენობას მონაცემთა გადაცემის სიჩქარის შემცირების გარეშე, სიგნალების მრავალსივიანი გავრცელების პირობებში.
6. კვლევის ექსპერიმენტულ ეტაპზე გამოთვლილი იქნა პარამეტრ Bit-Error-ის (ბიტური შეცდომის ალბათობა) დამოკიდებულება სიგნალ/ხელშეშლის მნიშვნელობაზე რელიეს არხში, ორობითი ფაზური მოდულაციის დროს, 4 გადამცემი და 3-მიმღების მქონე MIMO სისტემის გამოყენების დროს.
7. კომპიუტერული მოდელირებით დამტკიცებულ იქნა, რომ MIMO სისტემის შემოთავაზებული მეთოდი იძლევა 1 დბ ენერგეტიკულ მოგებას არსებულ მოდელებთან შედარებით.
8. დადასტურებული იქნა, რომ ენერგეტიკული ეფექტურობის გაზრდა შეიძლება გამოყენებული იქნას რადიოდაფარვის ზონის გაზრდისათვის, რადგანაც საშუალებას იძლევა რადიოტალღები გავრცელდეს უფრო დიდ მანძილზე, ე.ი. გაიზარდოს ფიჭის რადიუსი. ეს კი თავის მხრივ შესაძლებლობას იძლევა გარკვეული ტერიტორიის დაფარვისათვის გამოყენებული იქნას ნაკლები რაოდენობის საბაზო სადგურები, რაც იძლევა მნიშვნელოვან ეკონომიკურ ეფექტს.

## *დისერტაციის თემაზე გამოქვეყნებული ნაშრომები:*

1. Цквитинидзе И. В., Способы организации речевой связи по сетям передачи данных с пакетной коммутацией, «Georgian engineering news», (GFID) № 1, 2004г. стр. 157-159. , <http://www.mmc.net.ge/gen>
2. ცქვიტინიძე ი. ვ. , ინტერნეტ-ტელეფონის სისტემა მომავლის სატელეფონო ქსელი, „ინტელექტი“, № 1, , თბილისი, 2004 წ. გვ. 56-58.
3. ცქვიტინიძე ი.ვ., ბერიძე ჯ.ლ., ტურბოკოდების გამოყენება მობილური კავშირის სისტემების პირდაპირ არხებში. საერთაშორისო კონფერენცია „საინფორმაციო და კომპიუტერული ტექნოლოგიები, მოდელირება, მართვა“, „შრომები“ , თბილისი, 2010წ. გვ 41-43.
4. ბერიძე ჯ. , ცქვიტინიძე ი. „მობილური კავშირის LTE ტექნოლოგია IT სფეროში“ საერთაშორისო კონფერენცია „მართვის ავტომატიზირებული სისტემები“, „შრომები“ , №1(10) თბილისი, 2011წ. გვ. 275-279.
5. ი. ცქვიტინიძე, ჯ. ბერიძე , „სივრცით-დროითი კოდირების მეთოდი ფართოხოლოვან უგამტარო მობილურ ქსელებში (BWN-Broadband Wireless Network)“, „ინტელექტუალი“, №19, თბილისი, 2012წ. გვ. 271-281.
6. ი. ცქვიტინიძე, ჯ. ბერიძე, „რადიოდაფარვის გაზრდა სიგნალების დამუშავების ახალი ალგორითმების გამოყენებით ახალი თაობის მობილური კავშირის ქსელებში“, «Georgian engineering news», №2 (vol.62), 2012წ. გვ. 26-28.
7. ცქვიტინიძე ი.ვ., ბერიძე ჯ.ლ., „სივრცით-დროითი კოდირება მონაცემთა გადაცემის მაღალსიხქარულ სისტემებში“, Georgian engineering news», №2 (vol.62), 2012წ. გვ. 29-33.

**ავტორის პირადი წვლილი.** დისერტაციაში წარმოდგენილი ყველა შედეგი მიღებული უშუალოდ ავტორის მიერ სამეცნიერო ხელმძღვანელთან ერთობლივი წვლილის აღნიშვნით.

## Abstract

In dissertation work there are presented new algorithms of signal formation and processing, their research for moving connecting systems. Work consists of introduction, 4 chapters, conclusion and applied literature.

*In the first chapter* there are presented mobile communication systems of 3G generation. Privately, there are characterized 5 existing standards: UMTS/IMT – 2000, W-CDMA, CDMA2000, DECT and PHS. There is to be compared their basic parameters, structure of physical canal is taken in the system UTRA/IMT-2000, also the importance of spectrum widening and modulation. Hereby there is discussed mobile connecting systems of 3,5 G generation, their transitive position between 3G and 4G systems. There is proved the necessity of setting mobile systems of 4G generation compared with existing technologies, their importance from the standpoint of enhancing of service quality, also necessity for the purpose of modern multimedia technology development. There is given the diagram expressing abilities of different telecommunication technologies.

*In the second chapter* there is discussed the coding methods used in mobile systems of 3G and 4G generations. Privately, turbocoding, space-time blocking coding, space-time lattice coding. There is analyzed the necessity of their usage of neutralization of created calming processes in canals of highest frequency. There is presented modeling results of turbocodes and their comparison with simple wrapping up codes. Turbocoding is characterized as the kind of strong correcting mean of mistakes giving possibility to reach the canal conductivity as more as possible.

*In the third chapter*, there are discussed space-time codes of higher quickness in mobile systems of 4G generation. There are characterized the space-time codes in MIMO systems, by using numerous antennas, that makes important role for receiving coding profit and separation profit. There is compared the character features of space-time blocking and lattice codes. There is presented the features of MIMO technology and possibilities giving chance of increasing stability against canal obstacles. In this chapter there is given the principle of space-time coding on the example of different number of antennas (with different configuration of antennas). Hereby there is analyzed the algorithm of MIMO signal

processing on the side of recipient. Privately, D-BLAST and V-BLAST modifications and their comparison.

*In the forth chapter* there is discussed the methods of increasing stability against obstacles of the canal during using different modulation of space-time code. There is presented orthogonal multiplexation OFDM of frequency canals, that is the most modern method of increasing transmission speed, in “falling” and ”ascending” canals. There is presented Alamaut space-time blocking coding STB, 2 on the example of transmitting and one receiver antenna. There are compared different kinds of modulations from the standpoint of stability against canal obstacles. Privately advantageous of QAM and QPSK modulation compared with BPSK modulation in wireless telecommunications. There are the results of modeling, in accordance with carried out configuration by Alamaut. As a result, there is got energetic profit compared with models of 1 DB. There should be mentioned, that the results are got from modeling carried out by the program Matlaba. Hereby there is showed that received energetic profit may be used for increasing radio covering zone that gives possibility to spread radio waves on greater distance. That is to increase cellular radius, in other words for covering territory there should be used less basic stations. There is discussed the models for assessment of caused running used for today by acting radio factors on radio waves: Calculated results give possibility to decrease necessary basic stations or economical effect.