

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

კვიციანი შალვა

„მე-4 თაობის მობილური კავშირის სისტემების გამტარუნარიანობის შემდგომი
ზრდის კვლევა“

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

წარდგენილი დისერტაციის

ა კ ტ ო რ ე ფ ე რ ა ტ ი

თბილისი

2014 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

პრობლემის აქტუალობა. ბოლო ათწლეულის განმავლობაში, სატელეკომუნიკაციო დარგში შემუშავდა მრავალი ეფექტური ტექნოლოგია. ერთ-ერთი, ბოლო პერიოდში ფართოდ გავრცელებული, არის ორთოგონალური სიხშირული მულტიპლექსირების მეთოდით გადამცემა (OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing). OFDM სისტემებში, გადასაცემი მონაცემების ნაკადი დაყოფილია რამდენიმე დაბალი სიჩქარის ნაკადს სახით, რომელთა გადამცემა ხორციელდება სხვადასხვა სიხშირულ ზოლში შესაბამისი ქვეგადამტანებით. ამასთან შესაძლებელია მონაცემთა გადამცემის სიჩქარის გაზრდა სიმბოლოს ხანგრძლივობის შემცირების გარეშე და სიმბოლოთაშორისო ინტერფერენციის მისაღები დაბალი დონის შენარჩუნება. ეს ტექნოლოგია საფუძველია თანამედროვე უსადენო სისტემების - Wi-Fi, WiMAX და LTE ა.შ. ასაგებად.

სატელეკომუნიკაციო სისტემის მაღალი ხელშეშლამდგრადობის და ტევადობის მისაღწევად, ახალი თაობის სისტემებში გამოიყენება მრავალდონიანი ფაზური (M-PSK) და ამპლიტუდა-ფაზური (M-QAM) მოდულაციები. ამიტომ დემოდულაცია მიმღებ მხარეზე მოითხოვს არხის მაღალი სიზუსტით შეფასებას, ან სიხშირული მახასიათებლის შეფასებას OFDM სისტემისათვის.

ქალაქის პირობებში ხშირია მრავალსიხვიანი გავრცელების მქონე არხები. რაც იწვევს სიმბოლოთაშორის ინტერფერენციას და შედეგად გადამცემის სიჩქარის შემცირებას.

ერთ ერთი ყველაზე ეფექტური მეთოდი, რომ გაიზარდოს მონაცემთა გადამცემის სიჩქარე და რომელიც ინტენსიურად ვითარდება ბოლო წლებში, არის მრავალი გადამცემი ანტენის და მრავალი მიმღები ანტენის გამოყენება – MIMO (Multiple-Input Multiple-Output). MIMO ტექნოლოგია დაფუძნებულია ანტენების წყვილებს შორის პარალელური, დამოუკიდებელი არხების ორგანიზებაზე. მაქსიმალური

გამტარუნარიანობა MIMO სისტემებში მიიღწევა BLAST (Bell Labs Layered Space Time) ტექნოლოგიის გამოყენებით, ამ ტექნოლოგიის მიხედვით სხვადასხვა ანტენებით გადაიცემა მონაცემების განსხვავებული ნაკადები.

იმ შემთხვევაში, თუ არხის იმპულსის პასუხი დიდია, არსებობს სიხშირული მახასიათებლის სწრაფი ვარიაცია, რაც OFDM სისტემისთვის ქმნის სირთულეს არხის შეფასებაში. MIMO-OFDM სისტემებში დემოდულაციის დროს გამოიყენება ყველა არხის შეფასება (და მათი შეცდომები). ეს იწვევს იმას, რომ ერთი და იგივე დონის შეცდომების შემთხვევაში მიღების მახასიათებლები MIMO-OFDM სისტემებში ბევრად უარესდება, ვიდრე OFDM სისტემისათვის ერთი გადამცემი და ერთი მიმღები ანტენით. შედეგად, არხის მაღალი სიზუსტით შეფასების მოთხოვნები MIMO-OFDM სისტემებისათვის ბევრად უფრო მკაცრია. არხის შეფასების ალგორითმების, და შესაბამისად, რესურსების გამოყოფის ალგორითმების დახვეწა და გაუმჯობესება აქტუალური ამოცანაა. ოპტიმალური შეფასების და რესურსების ალგორითმების გამოყენება აუმჯობესებს სატელეკომუნიკაციო სისტემის მახასიათებლებს.

თანამედროვე ფიჭური კავშირის სისტემებში სატელეკომუნიკაციო სისტემის მახასიათებლების გაუმჯობესების ერთ ერთი პერსპექტიული მეთოდია საბაზო სადგურზე ადაპტური საანტენო გისოსების (ასგ) გამოყება. ადაპტური საანტენო გისოსის პარამეტრები ეწყობა, ადაპტირდება სიგნალი/ხმაურის ცვალებად გარემოსთან, რომელიც საშუალებას იძლევა მოხდეს თითოეული აბონენტის სიგნალის ეფექტური სივრცითი სელექცია, როგორც მიღებაზე, ისე გადაცემაზე. ეს ზრდის სატელეკომუნიკაციო სისტემის ტევადობას, აუმჯობესებს სატელეკომუნიკაციო სისტემის ხარისხს, აფართოებს მომსახურების ზონას და ა.შ. ამასთან არსებობს ადაპტური საანტენო გისოსის ფუნქციონირების პრობლემებიც. მათ შორის ერთ ერთია მაღალი სიჩქარით მოძრავი აბონენტების მომსახურება, რომელთა სიგნალები საბაზო სადგურის მიმღებზე შეიძლება იყოს ათჯერ და უფრო მეტად სუსტი, დაბალი სიჩქარით მოძრავ აბონენტებთან შედარებით და

წარმოადგენს ინტერფერენციას ამ უკანასკნელთათვის. ასე-ს ცნობილი ალგორითმები დაღმავალ და აღმავალ არხებში ამას არ ითვალისწინებენ, რამაც შეიძლება გამოიწვიოს არხის მახასიათებლების მნიშვნელოვანი გაუარესება. ადაპტურ საანტენო გისოსში მიმართული დიაგრამის ფორმირება დაღმავალ არხში ხორციელდება აბონენტიდან მოსული სიგნალის მიმართულებით. სიგნალების მიმართულების განსაზღვრა და მის შესაბამისად გამოსხივების დიაგრამის ფორმირება ადაპტური სისტემის ერთერთი ძირითადი ამოცანაა. ამასთან უნდა მოიძებნოს კომპრომისი ინფორმაციული სიგნალის სიმძლავრის გაზრდას, რაც ხორციელდება მიმართულების დიაგრამის შევიწროვებით და არხის მახასიათებლების საჭირო სიზუსტით შეფასებას შორის, რომლის სიზუსტეც დიაგრამის შევიწროვებასთან ერთად მცირდება.

მომავლის კავშირგაბმულობის სისტემების ერთ ერთი ყველაზე მნიშვნელოვანი განმასხვავებელი მახასიათებელი იქნება სისტემის ფუნქციონირების პირობებთან ეფექტურად ადაპტირების უნარი. ამჟამად ადაპტაციის ცნობილი მეთოდებია მონაცემთა გადაცემის სიჩქარის შერჩევა (როგორცაა მოდულაცია და კოდირება) და გადაცემული სიგნალის სიმძლავრის რეგულირება. ზოგიერთ შემთხვევაში, ადაპტაციის არსებული მეთოდები არ არის საკმარისი, რომ სათანადოდ შეიცვალოს სისტემის მუშაობა. მაგალითად, MIMO - OFDM სისტემისათვის ტიპური პილოტ-სტრუქტურით უაღრესად ძნელია მოხდეს არხის საჭირო სიზუსტით შეფასება, როდესაც არხი საკმაოდ "გრძელია". პილოტ სიმბოლოების გაზრდით არხის შეფასების ხარისხი გაუმჯობესდება, მაგრამ ამავე დროს იზრდება სისტემის არაპროდუქტიული რესურსების ნაწილი, რომლის უცვლელად შენარჩუნება მიღების უფრო ხელსაყრელ პირობებში გაუმართლებელია. ოპტიმალური პილოტ სტრუქტურა OFDM სისტემისათვის არის კომპრომისი, მის მიერ გამოყენებულ რესურსებს და არხის ხარისხის შეფასებას შორის. ანალოგიურად, დამცავი ინტერვალის სიგრძისათვის რომელიც, როგორც წესი, ფიქსირებულია და აიღება დაყოვნების მაქსიმალური დროის შესაბამისად და შეიძლება იყოს OFDM სიმბოლოს

სიგრძის 1/8 ან 1/4. ეს ნიშნავს, რომ დამცავი ინტერვალის გამო სისტემის არაპროდუქტიული რესურსი შეიძლება იყოს ძალიან დიდი. ამიტომ, აქტუალურია სატელეკომუნიკაციო სისტემების ხელშეშლამდგრადობის და სპექტრული ეფექტურობის გაზრდა საპილოტე სტრუქტურის და დამცავი ინტერვალის ხანგრძლივობის ადაპტური რეგულირებით, გარემო პირობების ცვლილების მიხედვით.

კვლევის მიზანი და ამოცანები. ნაშრომის მიზანია, მობილური კავშირის ახალი თაობების ქსელების ფუნქციონირების ეფექტური ალგორითმების შემუშავება, ანალიზი და შეფასება, თანამედროვე სატელეკომუნიკაციო მობილური სისტემების პარამეტრების გავრცელების პირობებთან ადაპტაცია, გადაცემის მახასიათებლების გაუმჯობესება.

ამ მიზნის რეალიზაციისათვის სადისერტაციო ნაშრომში დასმულია და გადაწყვეტილია შემდეგი ძირითადი ამოცანები:

1. არხის შეფასება მრავალსიხვიანობის გათვალისწინებით სხვადასხვა სისტემებისათვის. ინფორმაციული და საპილოტო სიგნალების კომპონენტების ენერგეტიკული თანაფარდობების ოპტიმიზაცია.
2. მრავალსიხვიანი გავრცელების არხის პირობების გამოკვლევა.
3. მრავალსიხვიანი (OFDM) და მრავალ ანტენიანი (MIMO) VOIP სატელეკომუნიკაციო სისტემების არხების შეფასება, მათ შორის WiMax, Wi-fi და LTE-ტექნოლოგიებით მომუშავე სისტემებისათვის.. მრავალსიხვიანი სიგნალების პილოტ-სტრუქტურის და დამცავი ინტერვალის ადაპტაცია სიგნალის გავრცელების პირობებთან .
4. მობილური კავშირის ახალი თაობების ქსელებში სიგნალების გადაცემა-მიღება-დამუშავების მარტივი და ეფექტური ალგორითმების შემუშავება.

5. მობილური კავშირის ქსელებში გამოყენებული არხებისა და სიგნალების პარამეტრების ოპტიმიზაცია და ადაპტაცია.

კვლევის მეთოდები. ამოცანების გადაჭრისათვის გამოყენებული იყო სიმულაციის თანამედროვე პროგრამები – MATLAB-ი და Simulink-ი, მათემატიკური ანალიზი, , ალბათობის თეორია და მათემატიკური სტატისტიკა, სტოქასტური პროცესების კვლევა.

სამეცნიერო სიახლე. მივიღეთ შემდეგი ახალი სამეცნიერო შედეგები: კერძოდ:

- გამოკვლეულია მობილური ქსელების არხები.
- შემუშავებულია კვლევის მეთოდოლოგია ამ მიმართულებით.
- დამუშავებულია რესურსების ოპტიმიზაციის მეთოდები.
- აგებულია მობილური კავშირის ქსელების პრაქტიკული მაგალითები.
- შემუშავებულია ადაპტური სისტემების კოგნეტურ ქსელებზე გადასვლის ალგორითმი.

პრაქტიკული მნიშვნელობა.

- მიღებულია შედეგები რომელთა მიხედვით შესაძლებელია არსებული ქსელების მახასიათებლების გაუმჯობესება.
- კვლევის შედეგების რეალიზება შესაძლებელია პროგრამულად რეკონფიგურებად რადიო პლატფორმაზე.

–კვლევის შედეგების მიხედვით სტუ-ს ტელეკომუნიკაციის დეპარტამენტში ყალიბდება სასწავლო ლაბორატორია დისციპლინაში „ფიჭური მობილური კავშირის ქსელების პროექტირების საფუძვლები“.

დაცვაზე წარმოდგენილი ძირითადი დებულებებია:

- რესურსების ადაპტაციის სხვადასხვა შესაძლებლობები. არსებული პრობლემები და გადაჭრის გზები;
- კოგნეტურ ქსელებზე გადასვლის მნიშვნელობა ადაპტირების მოქნილობისათვის;
- პრაქტიკული სქემების რეალიზაციის რეკომენდაციები;
- კვლევის მეთოდოლოგიის ანალიზი ;
- კვლევის დროს მიღებული შედეგების ანალიზი;

შედეგების დანერგვა:

- სადისერტაციო ნაშრომის სხვადასხვა კვლევითი კომპონენტები გამოყენებულია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის სასწავლო პროცესში;
- კვლევების მიხედვით შედგენილია სასწავლო პროგრამული ლაბორატორიული სამუშაოები მობილურ ქსელებში;
- კვლევის მეთოდები გამოყენებულია საბაკალავრო ნაშრომებში;
- მიმდინარეობს SDR (Software defined radio) პროგრამულად რეკონფიგურებადი რადიოს სასწავლო ლაბორატორიის შექმნა. (როგორც პროგრამული ისე აპარატურული რეალიზაციით)

საიმედოობის კვლევის შედეგები

მიღებული თეზისი ადასტურებს, რომ თანამედროვე მათემატიკური ინსტრუმენტები მიესადაგება წინასწარ ცნობილ კერძო შემთხვევებს და შეზღუდვებს, ისევე, როგორც შედეგების მოდელირება.

სამუშაოს შედეგების აპრობაცია: სადისერტაციო ნაშრომის შედეგები წარმოდგენილი იქნა საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციაზე ქ. ქუთაისში (2013 წ.) და იტალიაში, ქ. ტრიესტეში თეორიული ფიზიკის საერთაშორისო ცენტრში გამართულ ვორკშოპზე მოხსენების სახით (2014 წ.) .

პუბლიკაცია: რეცენზირებულ პერიოდულ სამეცნიერო ჟურნალებში 1)

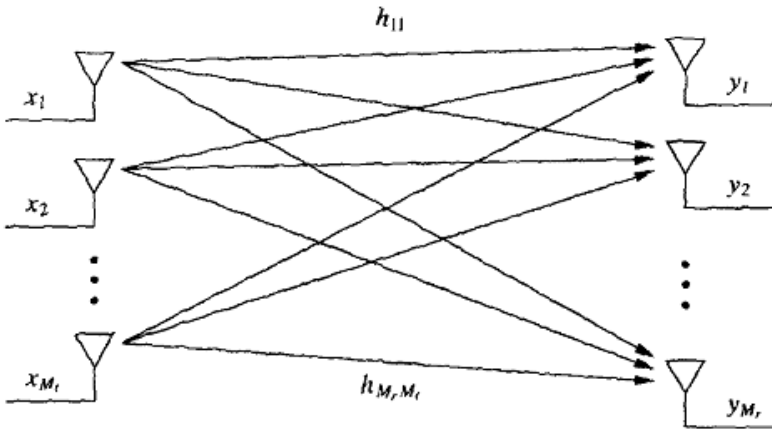
საქართველოს საინჟინრო სიახლენი ; 2) ინტელექტუალი იხ. „*დისერტაციის თემაზე გამოქვეყნებული ნაშრომები*“ გვ.32

სტრუქტურა და სამუშაოს მოცულობა: ნაშრომი შედგება შესავლის, ოთხი თავისაგან, დასკვნისა და გამოყენებული ლიტერატურის სიისაგან.

პირველ თავი ეთმობა MIMO (ნახ.1) სისტემის ფიზიკური არხის მოდელირებას. ამ თავში გაანალიზებულია სისტემის პარამეტრები. მაგ. C გამტარუნარიანობა

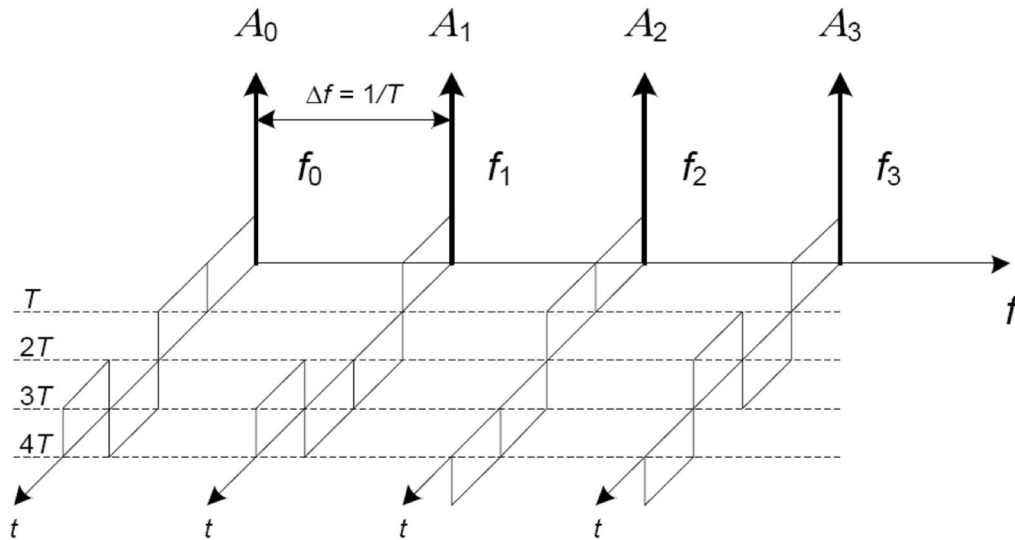
$$C = \max_{p(\mathbf{x})} i(\mathbf{X}; \mathbf{Y}) = \max_{p(\mathbf{x})} [H(\mathbf{Y}) - H(\mathbf{Y}|\mathbf{X})] \quad (1)$$

სადაც $H(\mathbf{Y})$ და $H(\mathbf{Y}|\mathbf{X})$ - y და $y|x$ ენტროპიებია. მოყვანილია C გამტარუნარიანობის გაზრდის მიზნით პარალელური არხების გამოყენება და არხის გადაცემის კოეფიციენტების ოპტიმიზაცია. ასევე პირველ თავში განხილულია მიმართული დიაგრამის ანტენების გამოყენებით გამტარუნარიანობის გაზრდის საკითხები.



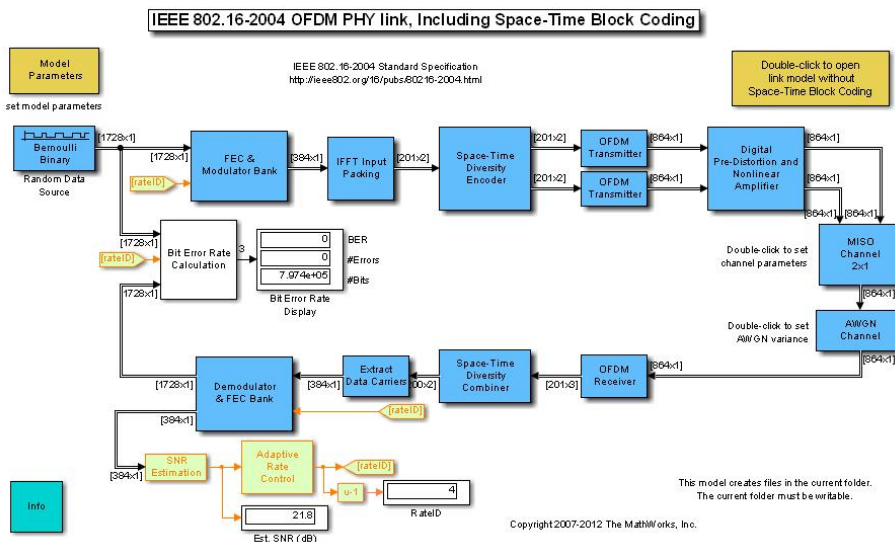
ნახ.1. MIMO სისტემა

გარდა MIMO სისტემის პარამეტრებისა ცალკეა განხილული OFDM ტექნოლოგიის დროითი მახასიათებლები (ნახ.2.). რადგან სადისერტაციო ნაშრომი ეხება რესურსების ოპტიმიზაციის პრობლემებს, პარამეტრების განხილვა ძირითადად ხდება პიკური მნიშვნელობების თვალსაზრისით. ნახ.2 სქემატურად ნაჩვენებია OFDM სიგნალი ოთხი ქვეგადამტანი სიხშირით და ორობითი ფაზური მანიპულაციით. სიხშირეების ღერძზე ნაჩვენებია $A_0 \dots A_3$, სიგნალების ამპლიტუდების მნიშვნელობები ქვეგადამტანი სიშირეებით $f_0 \dots f_3$. დროით ღერძზე აღნიშნულია თითოეული სიგნალის არსებული – კონტურები. სიხშირული დაშორება ქვეგადამტან სიშირეებს შორის შეადგენს $1/T$. T ხანგრძლივობის დროით ინტერვალზე თავსდება k გადამტანი რხევის პერიოდი.



ნახ.2. OFDM სიგნალების სიხშირული და დროითი მახასიათებლების სქემატური წარმოდგენა

საკითხის თეორიული შესწავლის და კვლევის შემდეგ, როგორც ამ თავში ისე ნაშრომის სხვა თავებშიც თეორიული კვლევები გაგრძელებულია პრაქტიკულ მოდელებზე (ნახ.3)



ნახ.3. OFDM ფიზიკური დონის მოდელის სტრუქტურა

მოდელში წარმოდგენილია WMAN 802.16-2004 OFDM ფიზიკური დონის ყველა კომპონენტი ორი ვარიანტის სახით, STBC (Space-time block coding) კოდირებით და მის გარეშე. მოდელის ორივე ვარიანტში არის ყველა აუცილებელი კოდირების და მოდულაციის შესაძლებლობა. მოდელირების პროგრამების გამოყენებით მიღებულია კონკრეტული შედეგები.

მეორე თავი. ცნობილია, რომ MIMO სისტემის ერთერთი პრობლემური მხარეა მობილურ სადგურში მისი რეალიზების საკითხი. კერძოდ, მცირე ზომების გამო სივრცითი დაშორება პრაქტიკულად შეუძლებელია. მეორე თავი მთლიანად ეთმობა მიმღებში მიღების პარამეტრების გაუმჯობესების საკითხებს, ქსელის მთლიანი რესურსების დაზოგვის და ოპტიმიზაციის მიზნით.

განალიზებულია სიგნალების განცალკევება მიმღებში და გადამცემში. მიმღებ მხარეზე დამოუკიდებელი რეალიზების შესაძლებლობა მიმღებში სიგნალის განცალკევების გზით: სელექციური, ზღვრული და დიფერენცირებული - სკალირებული სიგნალების გაერთიანება - შეჯამების საკითხები.

განცალკევებული სიგნალების სელექციური გაერთიანების დროს, გამაერთიანებელი მოწყობილობა გამოსასვლელზე იძლევა იმ შტოს სიგნალს, რომელშიც არის სიგნალი-ხმაურის ყველაზე მაღალი ფარდობა. r_i^2/N_i ექვივალენტურია ყველაზე მაღალი დონის r_i^2/N_i შტოს არჩევისა იმ შემთხვევაში, თუ ყველა შტოში ხმაური თანაბარია - $N_i=N^2$. სიგნალების M-შტოდ განცალკევების დროს სიგნალი-ხმაურის ფარდობის γ_{Σ} განაწილების ფუნქცია განისაზღვრება გამოსახულებით.

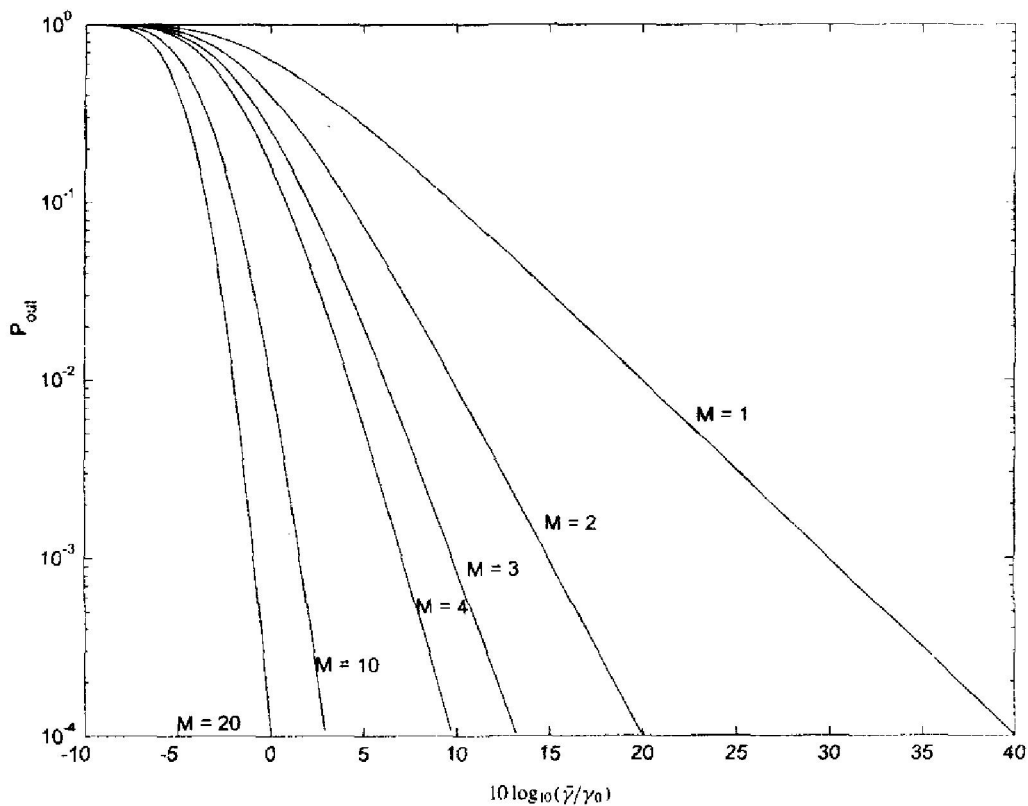
$$P_{\gamma_{\Sigma}}(\gamma) = p(\gamma_{\Sigma} < \gamma) = p(\max[\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_M] < \gamma) = \prod_{i=1}^M p(\gamma_i < \gamma). \quad (2)$$

სიგნალი-ხმაურის ფარდობის საშუალო მნიშვნელობა გამაერთიანებელი მოწყობილობის გამოსასვლელზე, დამოუკიდებელი და თანაბრად განაწილებული რელეის მიყუჩებების დროს ტოლია

$$\bar{\gamma}_{\Sigma} = \int_0^{\infty} \gamma p_{\gamma_{\Sigma}}(\gamma) d\gamma = \int_0^{\infty} \frac{\gamma M}{\bar{\gamma}} [1 - e^{-\gamma/\bar{\gamma}}]^{M-1} e^{-\gamma/\bar{\gamma}} d\gamma = \bar{\gamma} \sum_{i=1}^M \frac{1}{i}. \quad (3)$$

გამოსახულებიდან ჩანს, რომ სიგნალი-ხმაურის ფარდობის საშუალო მნიშვნელობის ზრდა და საანტენო გისოსის გაძლიერების ზრდა იმატებს M-ის მატებასთან ერთად, მაგრამ არა წრფივად. გაძლიერების ყველაზე დიდი კოეფიციენტი მიიღწევა არაგანცალკევების სქემიდან ორი შტოთი განცალკევებით მიღების სქემაზე გადასვლის დროს. შტოების რაოდენობის გაზრდა 2-დან 3-მდე იძლევა გაძლიერების ნაკლებ კოეფიციენტს, ვიდრე 1-დან 2-მდე გაზრდის შემთხვევაში და ზოგადად, საანტენო გისოსის შტოების რაოდენობის M-ის გაზრდით მოგების ერთეულები მცირდება ეს ტენდენცია ილუსტრირებულია ნახ.4, სადაც ნაჩვენებია კავშირის წყვეტის ალბათობის P_{out} დამოკიდებულება γ/γ_0 ფარდობაზე M-ის სხვადასხვა მნიშვნელობებისათვის და დამოუკიდებელი თანაბრად განაწილებული რელეის მიყუჩებების დროს. მოცემულ მაგალითში შეინიშნება მკვეთრი გაუმჯობესება უკვე ორი შტოს გაერთიანებისას. გადასვლა M=1-დან M=2-ზე პირობით, რომ კავშირის წყვეტის ალბათობაა 1%, მივიღებთ სიგნალი-ხმაურის ფარდობის მოთხოვნილი მნიშვნელობის შემცირებას 12 დბ-მდე, ხოლო კავშირის წყვეტის 0,01%-იანი ალბათობის დროს კავშირის დაცულობა დაიწევა მიახლოებით 20 დბ-მდე. თუმცა კავშირის წყვეტის 0.01%-იანი ალბათობის დროს განცალკევების 2-შტოიანი სქემიდან 3-შტოიან სქემაზე გადასვლა იძლევა დაცულობის დამატებით მოგებას მხოლოდ 7დბ, ხოლო გადასვლა სამი შტოდან ოთხ შტოზე იძლევა დამატებით 4 დბ მოგებას. ცხადია რომ ენერგომოხმარების ეკონომია უფრო მეტია

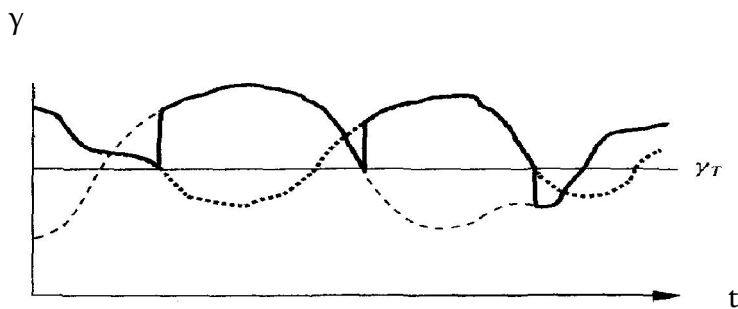
არაგანცალკევების სქემიდან ორ შტოიან განცალკევების სქემაზე გადასვლის დროს და შტოების რაოდენობის ზრდასთან ერთად ეფექტი მცირდება. უნდა აღვნიშნოთ რომ ყველა შტოში რეალური მიყუჩებების არსებობის დროსაც დაცულობის განაწილება გამაერთიანებელი მოწყობილობის გამოსასვლელზე უკვე აღარ იქნება ექსპონენციალური.



ნახ.4. განცალკევებული სიგნალების სელექციური გაერთიანების დროს კავშირის წყვეტის ალბათობა არხებში რეალური მიყუჩებებით

უწყვეტ რეჟიმში მომუშავე სისტემების შემთხვევაში, განცალკევებული სიგნალების სელექციური მეთოდებით გაერთიანება მოითხოვს თითოეული შტოსათვის გამოყოფილი მიმღების არსებობას, რომ მოხდეს SNR დონის უწყვეტი მონიტორინგი ყველა შტოში. განცალკევებული სიგნალების გაერთიანების უფრო მარტივი მეთოდია შტოების მიმდევრობითი სკანირება და

გამოსასვლელზე იმ პირველი სიგნალის მიწოდება, რომლის დაცულობის მნიშვნელობა მეტი იქნება მოცემულ ზღვრულ მნიშვნელობაზე. ზღვრული გაერთიანება არ მოითხოვს ყველა შტოში ცალკე მიმღების არსებობას. როგორც სელექციური, ისე ზღვრული გაერთიანების შემთხვევაში არ მოითხოვება ფაზირება, რადგან დროის ყოველ მომენტში გამოიყენება მხოლოდ ერთი შტოს გამოსასვლელი. ამიტომ ამ მეთოდის გამოყენება შესაძლებელია როგორც კოჰერენტული ისე დიფერენციალური მეთოდის გამოყენების შემთხვევაში. შტოს არჩევის შემდეგ გამაერთიანებელი მოწყობილობა გაატარებს სიგნალს გამოსასვლელზე და გამოსასვლელზე არჩეული სიგნალი იქნება იმ დროის განმავლობაში სანამ ამ შტოში დაცულობა SNR იქნება მოთხოვნილ ზღვარზე მაღალი. თუ შტოში დაცულობა SNR ჩამოვა მოთხოვნილ ზღვარს ქვევით მაშინ გამაერთიანებელი მოწყობილობა გადართავს მიმღებს სხვა შტოზე. არსებობს რამოდენიმე კრიტერიუმი რომლის მიხედვითაც გამაერთიანებელი მოწყობილობა განსაზღვრავს თუ რომელ შტოზე უნდა გადართოს მიმღები. ყველაზე მარტივი მეთოდია შემთხვევითი გადართვა. სიგნალების ორ შტოდ განცალკევებისას ეს ექვივალენტურია მეორე შტოზე გადართვის როდესაც აქტიურ შტოში დაცულობა SNR -ი ეცემა γ_T მნიშვნელობის ქვევით. ამ მეთოდს ეწოდება გაერთიანება გადართვა/გაჩერებით. გადართვით და გაჩერებით გაერთიანების პროცესი და შესაბამისი დაცულობა SNR ნაჩვენებია ნახ. 5.



ნახ. 5. დაცულობა გაერთიანების შემთხვევაში გადართვა / გაჩერების გამოყენებით.

რადგან გადართვა/გაჩერებით გაერთიანების შემთხვევაში არ აირჩევა შტო ყველაზე მაღალი სიგნალი-ხმაურის ფარდობით SNR, ამიტომ სისტემის საექსპლუატაციო მაჩვენებლები თავსდება განცალკევების გარეშე მიღების და იდიალურად შერჩევითი გაერთიანების მახასიათებლებს შორის.

შერჩევითი გაერთიანების და გადართვა/გაჩერებით გაერთიანების შემთხვევაში გამაერთიანებელი მოწყობილობის გამოსასვლელზე სიგნალი ტოლია ერთ-ერთი შტოს სიგნალის. სიგნალის დიფერენცირებულ სკალირებული დაჯამებისას, გამოსასვლელზე სიგნალი ყველა შტოს სკალირებული სიგნალების ჯამის ტოლია, ამიტომ a_i ყველა მნიშვნელობა არანულოვანია, სიგნალები სინფაზურია და $a_i = a_i e^{-i\theta_i}$, სადაც θ_i - i - იური შტოს შემომავალი სიგნალის ფაზაა. გამომდინარე აქედან გამაერთიანებელი მოწყობილობის გამოსასვლელზე

$$r = \sum_{i=1}^M a_i r_i. \quad (4)$$

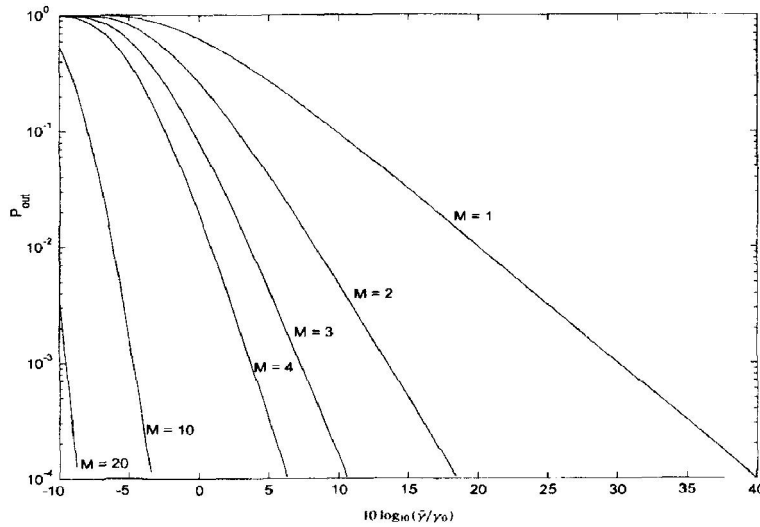
დავუშვათ რომ ხმაურის სპექტრული სიმკვრივე PSD ყველა შტოში ერთნაერია და ტოლია $N_0/2$. მაჯამებლის გამოსასვლელზე მთლიანი ხმაურის სიდიდეს მივიღებთ

$$N_{tot}/2 = \sum_{i=1}^M a_i^2 N_0/2 \quad (5)$$

მაშინ SNR გამაერთიანებელი მოწყობილობის გამოსასვლელზე დაცულობა ტოლია:

$$\gamma_{\Sigma} = \frac{r^2}{N_{tot}} = \frac{1}{N_0} \frac{\left(\sum_{i=1}^M a_i r_i \right)^2}{\sum_{i=1}^M a_i^2}. \quad (6)$$

კავშირის წყვეტის ალბათობა სკალირებულ დიფერენცირებული სიგნალების გაერთიანების მეთოდისათვის ნაჩვენებია ნახ. 6.



ნახ.6. კავშირის წყვეტის ალბათობა სკალირებულ დიფერენცირებული სიგნალებისათვის

თეორიული კვლევის და ანალიზის საფუძველზე შესრულებულია LTE ქსელის დადამავალი არხის მოდელირება და მიღებულია შესაბამისი შედეგები.

მესამე თავი. რესურსების ოპტიმიზირება საბაზო სადგურს და მობილურ სადგურს შორის ნიშნავს გამოყენებული ელექტრომაგნიტური ტალღის სპექტრის ეფექტურობის ამაღლებას. საბაზო სადგურს და მობილურ სადგურს შორის არსებული არე ცვალებადი და შემთხვევითი ხასიათისაა. ამიტომ რესურსების ადაპტაციის ალგორითმი უნდა იყოს ადექვატურად მოქნილი და ცვალებადი. პრინციპი მდგომარეობს იმაში, რომ ავტორეგრესიულ ფუნქციას ვუსადაგებთ ავტორეგრესულ ფუნქციას.

მესამე თავში განხილულია ქსელში რესურსების გამოყენების ალგორითმები: სივრცით დროითი ბლოკური კოდირება და ალამაუტის სქემა. აქ განხილულია STC კოდების ორი ძირითადი სახე - სივრცით დროითი ტრელის კოდი (STTC) და

სივრცით დროითი ბლოკური კოდი (STBC). STBC იძლევა შესაძლებლობას მივიღოთ მზარდი მოგება სიგნალების განცალკევებით და კოდირებით, მაგრამ ეს ხდება უფრო რთული დეკოდირების გამოყენების ხარჯზე. ამ ნაკლოვანების გამო შემუშავებული იქნა STBC. ალამაუტის ბლოკური კოდი განკუთვნილია MIMO სისტემებისთვის ორი გადამცემი ანტენით. ალამაუტის სქემა უზრუნველყოფს სიგნალების მნიშვნელოვან განცალკევებას და ინფორმაციის გადაცემის მაღალ სიჩქარეს. ამისათვის გამოიყენება ერთდროულად გადაცემულ სიგნალებს შორის ფაზების ორთოგონალურობა. ფაზის ორთოგონალურობა ასევე გამოიყენება თითოეული ანტენის მიერ მიმდევრობით გამოსხივებული სიგნალების წყვილებს შორის. გადამცემი ანტენების დიდი რაოდენობისათვის აღნიშნული კოდების განზოგადების შესაძლებლობამ განაპირობა STBC კოდების მთელი რიგის შექმნა. თუმცა ალამაუტის სქემისაგან განსხვავებით მოცემულ კოდებს შეუძლიათ უზრუნველყონ სიგნალების მნიშვნელოვანი განცალკევება ან გადაცემის მაღალი სიჩქარე. STBC კოდებისაგან ენერგეტიკული მოგების მიღებისათვის შემოღებულია დამატებითი კოდირება მარტივი ალგორითმებით. ასეთმა სქემებმა მიიღეს სახელწოდება სუპერორთოგონალური სივრცით დროითი ტრელის კოდები (Super Orthogonal Space-Time Trellis Codes).

OFDMA-ის გამოყენების შემთხვევაში ბლოკური კოდირების სქემა ნაშრომში წარმოდგენილია შემდეგი სახით: ბიტების საწყისი ინფორმაციული მიმდევრობა h^i დროის მიხედვით იყოფა ფიქსირებულ სიგრძის \vec{b}_k ბლოკებად (k-ბლოკის ნომერია). თითოეულ ბლოკში ბიტები განაწილებულია თანაბარ ჯგუფებად.

$$\begin{aligned} \vec{b}_k &= \{\vec{b}_{k,1}, \vec{b}_{k,2}, \dots, \vec{b}_{k,N}\}, \\ \vec{b}_{k,i} &= \{b_{k,i}^1, b_{k,i}^2, \dots, b_{k,i}^m\}, \end{aligned} \quad (7)$$

სადაც N არის ჯგუფების რაოდენობა ბლოკში და ტოლია OFDMA ორთოგონალური ქვეგადამტანების რაოდენობის. i -ბლოკის ჯგუფის ნომერია; m - ბიტების რაოდენობა ჯგუფში; 2^m წერტილების რაოდენობაა სიგნალურ

თანავარსკვლავედში. მოდულაციის პროცესის შემდეგ ჯგუფებიდან ფორმირდება კომპლექსური სიხშირული ანათვლები, რომლებიც შეესაბამებიან სიგნალის თანავარსკვლავედის წერტილებს და ანათვლების მთლიან ნაკრებს, რომელიც შეესაბამება ერთ ბლოკს და ეწოდება OFDMA სიმბოლო $\vec{s}_k = \{s_k^1, s_k^2, \dots, s_k^N\}$.

სივრცით დროითი ბლოკური კოდირების პროცესი შეიძლება განვიხილოთ როგორც OFDMA სიმბოლოების ფიქსირებული რიცხვის M განაწილება $N_i \times K$ ზომის კოდურ მატრიცაში, სადაც K განსაზღვრავს დროითი ანათვლების რაოდენობას, ე.ი. სივრცით დროითი ბლოკის სიგრძეს. სიჭარბის შემოტანის გამო S მატრიცას აქვს სახე:

$$\mathbf{S} = \sum_{i=1}^M \text{Re}(\vec{s}_i)A_i + j \text{Im}(\vec{s}_i)B_i, \quad (8)$$

$N_i \times K$ განზომილების $\{A_i, B_i\}_{i=1}^M$ მატრიცების ნაკრებს ეწოდება წრფივი STBC.

s_i სიმბოლოთი აღინიშნება ფორმირებული სიგნალი, ხოლო S სიმბოლოთი კოდური სიტყვის მატრიცა. მოცემულ შემთხვევაში ოპერაციები სრულდება კომპლექსური ჯგუფების დონეზე. ალამაუტის სქემაში OFDMA სიმბოლოები იყოფიან წყვილებად - ლუწი და კენტი. მათი გადაცემისათვის მოითხოვება დროის ორი ინტერვალი τ_0 . პირველ ინტერვალში გადამცემი ანტენა 1 გამოასხივებს \vec{s}_{2i-1} სიმბოლოს სიგნალს, იმ დროს როდესაც ანტენა 2 \vec{s}_{2i} სიმბოლოს სიგნალს. შემდეგ დროით ინტერვალში ანტენა 1 გადასცემს სიგნალს რომელიც ფორმირებულია $-\vec{s}_{2i}^*$ სიმბოლოდან ხოლო ანტენა 2 \vec{s}_{2i-1}^* სიმბოლოდან ფორმირებულ სიგნალს.

მეორე თავში ასევე მოყვანილია ალამაუტის სქემის კოდური მატრიცა (9) და სქემის მუშაობის ანალიზი.

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} s_1 & -s_2^* \\ s_2 & s_1^* \end{bmatrix}. \quad (9)$$

ასეთი მანიპულაციების აზრი მდგომარეობს იმაში რომ, თუ სიგნალები პირველ დროით ინტერვალში იყვნენ სინფაზურები, მაშინ მეორე დროით ინტერვალში იქნებიან უკუფაზაში და პირიქით. თუ სიგნალების ფაზები პირველ ინტერვალში იყო ორთოგონალური, მაშინ ისინი ისეთივენი რჩებიან მეორე ინტერვალშიც, მხოლოდ იმ განსხვავებით, რომ გამოსხივების ფაზის წინსწრება იქნება რიგრიგობით, ხან პირველ, ხან მეორე ინტერვალში. გარდა ამისა ორთოგონალური იქნება სიგნალები, რომლებიც სხივდებიან ანტენებიდან მიმდევრობით.

ალამაუტის სქემით კოდირებული ორსიმბოლოიანი სიგნალების მიღებისათვის საკმარისია ერთი მიმღები ანტენა და დროითი ანათვლების წყვილი. თითოეულ დროით ანათვალში მიიღება სიგნალები:

$$\begin{cases} r_1 = s_1 h_1 + s_2 h_2 + n_1 \\ r_2 = -s_2^* h_1 + s_1^* h_2 + n_2 \end{cases}, \quad (10)$$

სადაც h_1 და h_2 MIMO არხის გადაცემის კოეფიციენტებია პირველ და მეორე ანტენებაში შესაბამისად და წარმოქმნიან გადაცემის მახასიათებლების ვექტორს $\vec{h} = [h_1, h_2]$; n_1 და n_2 კომპონენტებია, რომლებითაც ხდება ადიტიური გაუსის თეთრი ხმაურის გათვალისწინება და რომლის წარმოდგენა ასევე შეიძლება ვექტორის $\vec{n} = [n_1, n_2]$, სახით. მაშინ :

$$\vec{r} = \vec{h}\mathbf{S} + \vec{n}, \quad (11)$$

სადაც $\vec{r} = [r_1, r_2]$.

სიგნალების დეკოდირება ხდება ორ ეტაპად: პირველ ეტაპზე n_1 და n_2 კომპონენტები ითვლება ნულის ტოლად, ხდება ფურიეს გარდაქმნა და წრფივი მიმღები გამოითვლის გადაცემული ანათვლების შეფასებით მნიშვნელობებს:

$$\begin{cases} \tilde{s}_1 = \frac{r_1 h_1^* + r_2^* h_2}{|h_1|^2 + |h_2|^2} \\ \tilde{s}_2 = \frac{r_1 h_2^* - r_2^* h_1}{|h_1|^2 + |h_2|^2} \end{cases} \quad (12)$$

აღვნიშნოდ კომპლექსური ანათვლების სიმრავლე, რომელიც შეესაბამება სიგნალურ თანავარსკვლავედს, როგორც Z . დეკოდირების მეორე ეტაპი მდგომარეობს იმაში რომ მაღალი ალბათობის სტრატეგიის მიხედვით Z სიმრავლიდან ამოირჩევა ის ანათვალი, რომელიც მოახდენდა მასსა და მის შეფასებით მნიშვნელობას შორის ევკლიდის მანძილის მინიმიზირებას. ამ ეტაპის მათმატიკური ჩაწერა ალამაუტის სქემისათვის არის

$$\begin{cases} \hat{s}_1 = \arg \min_{s \in Z} d^2(s, \tilde{s}_1) \\ \hat{s}_2 = \arg \min_{s \in Z} d^2(s, \tilde{s}_2) \end{cases} \quad (13)$$

მაქსიმალური ალბათური სტრატეგიის მიხედვით შეფასებითი მნიშვნელობა \hat{s}_1, \hat{s}_2 მიეწოდება დემოდულატორის შესასვლელს.

ამავე თავში განხილულია MIMO – OFDM არხის შეფასების კომპლექსური ალგორითმი, ინვარიაციული ნულების გამოთვლის რანდომიზებული ალგორითმები დინამიური MIMO სისტემისათვის და რანდომიზებული კვადრირებული MIMO სისტემის ალგორითმები.

ნაშრომში მოცემული MIMO-OFDM სისტემის სიგნალის მოდელი იძლევა შესაძლებლობას გამოვიყენოთ კალმანის მრავალგანზომილებიანი ფილტრაცია საარხო მატრიცის და ჯგუფური ფაზური შეცდომების ოპტიმალური შეფასებისათვის.

შეფასების ოპტიმალური სისტემის განტოლებას აქვს სახე:

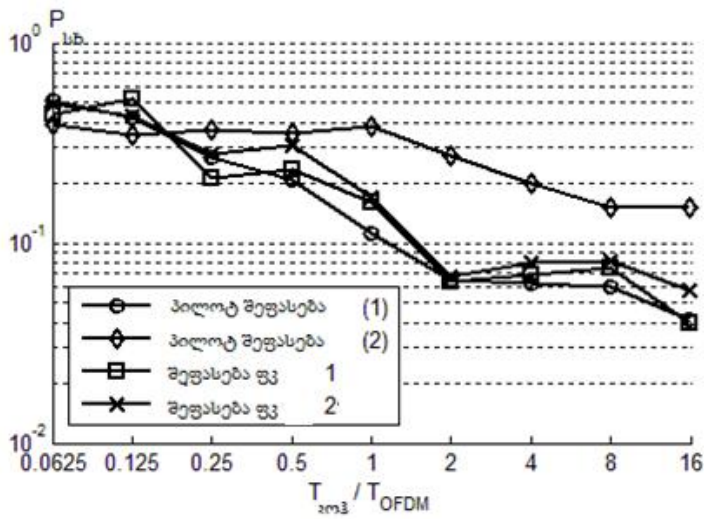
$$\hat{\mathbf{x}}(n) = \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}(n-1) + \mathbf{K}_n (\mathbf{y}_n - \mathbf{D}(n)\mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}(n-1)), \quad (14)$$

სადაც დისპერსიის აპრიორული მატრიცა \mathbf{M}_n განისაზღვრება გამოსახულებით $\mathbf{M}_n = \mathbf{C}\Sigma_{n-1}\mathbf{C}^H + \mathbf{G}\mathbf{G}^H$, დისპერსიის აპოსტერიული მატრიცა Σ_{n-1} გამოისახება განტოლებით $\Sigma_{n-1} = (\mathbf{I}_{pN} - \mathbf{K}_n\mathbf{D}(n))\mathbf{M}_{n-1}$, ხოლო გაძლიერების კოეფიციენტი \mathbf{K}_n გამოსახულებით $\mathbf{K}_n = \mathbf{M}_n\mathbf{D}^H(n)\Gamma_n^{-1}$, სადაც $\Gamma_n = \mathbf{D}(n)\mathbf{M}_n\mathbf{D}^H(n) + \sigma_w^2\mathbf{I}_N$. საწყისი პირობებია $\mathbf{x}(0) = \mathbf{0}_{pN}$ და $\Sigma^0 = \Sigma$, სადაც Σ არის $\mathbf{x}(n)$ -ის სტაციონალური კოვარიაცია. $\mathbf{H}'_k(n)$ საარხო მატრიცის შეფასება n ბიჯზე:

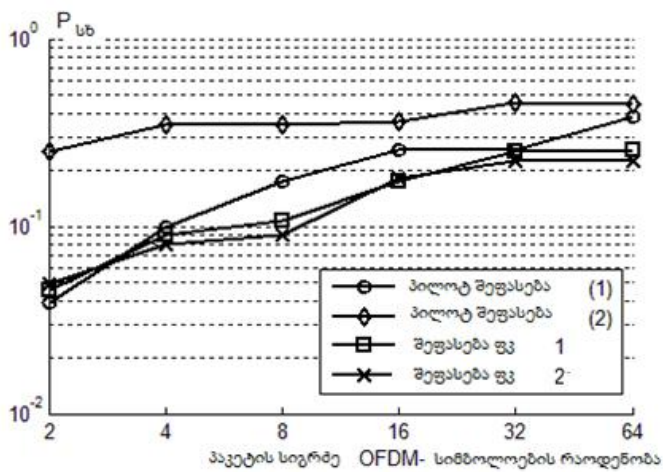
$$\hat{\mathbf{h}}^{tx,rx}(n) = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_N & \mathbf{0}_N & \cdots & \mathbf{0}_N \end{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}^{tx,rx}(n) \quad (15)$$

$s_k^{tx}(n)$ ინფორმაციული სიმბოლოები რომლებიც აუცილებელია ალგორითმის მუშაობისათვის, შეიძლება განვსაზღვროთ პილოტ სიგნალების გამოყენებით პირველ ბიჯზე ან /და უკუკავშირის რეჟიმში მუშაობის პირობებში შემდეგ ბიჯებზე. აღწერილი ალგორითმის ეფექტურობის შეფასებისთვის ჩატარებულია კომპიუტერული მოდელირება. ნახ.7.-ზე წარმოდგენილია შეცდომების გამოჩენის ალბათობის დამოკიდებულება OFDM სიმბოლოს კოჰერენტულობაზე (ა) და პაკეტის სიგრძეზე(ბ) კოჰერენტული მილების დროს. შედეგები აჩვენებენ ალგორითმის მაღალ ეფექტურობას. შემოთავაზებული მეთოდი შედარებულია არხის პილოტური სიგნალებით შეფასების უმცირეს კვადრატულ მეთოდებთან, ბლოკური ტიპის (მრუდი -1) და კომბინირებული ტიპის (მრუდი-2).

აქვე არის ნაჩვენები შედეგები კალმანის ფილტრის გამოყენებით ფკ1 და ფკ2 ავტორეგრესიული ფუნქციის პირველი და მეორე რიგისათვის შესაბამისად.



(ა)



(ბ)

ნახ.7. მიღების შეცდომის ალბათობა პარამეტრებისათვის: $N=256$, QAM-64 , სიგნალი ხმაურის ფარდობა 25დბ

განხილულია აღნიშნულ ალგორითმებზე აგებული მოდელები. კონკრეტული შემთხვევისათვის ჩატარებულია LTE ქსელის დადმავალი ფიზიკური არხის პარამეტრების კვლევა Matlab-ის გამოყენებით. შედეგები მოცემულია ცხრ. 1. ა, ბ.

LTE-სისტემის MIMO არხის მოდელირების შედეგები ცხრ.1.ა.

ანტენების რაოდენობა	2X2			2X2			2X2		
OFDM სიბოლოების რაოდენობა	1			2			3		
მოდულაციის ტიპი	QPSK	QAM16	QAM64	QPSK	QAM16	QAM64	QPSK	QAM16	QAM64
BER	$2,1 \cdot 10^{-5}$	$3,8 \cdot 10^{-5}$	$5,3 \cdot 10^{-5}$	$6,8 \cdot 10^{-5}$	$4,2 \cdot 10^{-5}$	$3,8 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$5,8 \cdot 10^{-5}$	$5,32 \cdot 10^{-5}$

LTE-სისტემის MIMO არხის მოდელირების შედეგები ცხრ.1.ბ.

ანტენების რაოდენობა	4X4			4X4			4X4		
OFDM სიბოლოების რაოდენობა	1			2			3		
მოდულაციის ტიპი	QPSK	QAM16	QAM64	QPSK	QAM16	QAM64	QPSK	QAM16	QAM64
BER	0	$3,3 \cdot 10^{-5}$	$5,1 \cdot 10^{-5}$	0	$4,7 \cdot 10^{-5}$	$4,7 \cdot 10^{-5}$	0	$6,0 \cdot 10^{-5}$	$4,9 \cdot 10^{-5}$

მეოთხე თავი. წინა თავებში ჩატარებული კვლევების ლოგიკურ გაგრძელებად მიჩნეულია კვლევის გაგრძელება კოგნეტური მიმართულებით, რის საფუძველიც მოგვცა კვლევის შედეგებმა და აგრეთვე კოგნეტური ტექნოლოგიების მიმართ კვლევების გააქტიურებამ მთელ მსოფლიოში.

მეოთხე თავში განხილულია რესურსების ადაპტაცია კოგნეტური ტექნოლოგიების გამოყენებით. მოყვანილია ძირითადი რესურსების ოპტიმიზაცია MIMO - კოგნეტურ ქსელებში. სადაც MIMO პარალელური არხები განიხილება

როგორც კოგნეტიური არხები. ორი ძირითადი ბუნებრივი რესურსი - სპექტრი და სიმძლავრე პირდაპირ კავშირშია გადაცემის სიჩქარესთან. ნაშრომში დასმულია MIMO სისტემებში ბუნებრივი და ტექნოლოგიური რესურსების მართვის ოპტიმალური კონცეფციის და მისი ალგორითმის შემუშავების ამოცანა, რომელიც საერთო ჯამში სისტემას გახდის უფრო მოქნილს და ეფექტურს. ამოცანის ძირითადი მიმართულება ასეა ჩამოყალიბებული: კოგნეტიური რადიო → MIMO არხის შესახებ მიღებული მონაცემები → რესურსების ადაპტაციის ალგორითმი → გადაცემის კონკრეტული ოპტიმიზებული სქემა.

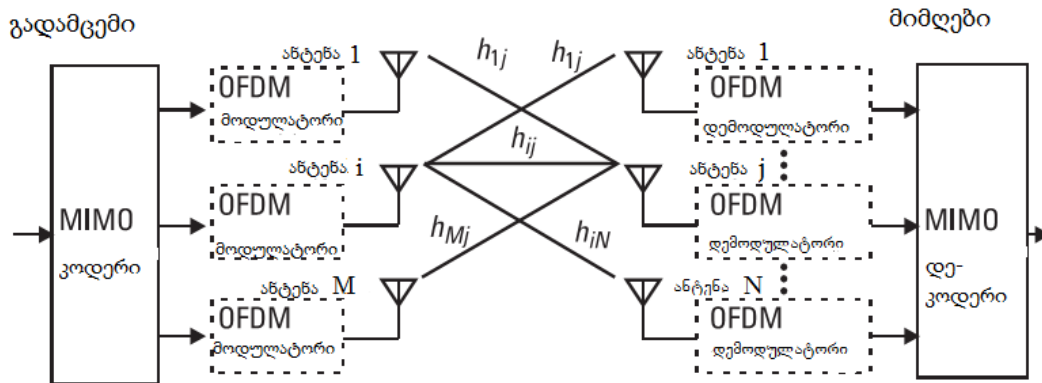
ინფორმაციის თეორიის თანახმად, შენონის ფორმულის მიხედვით SISO სისტემებისათვის არხის გამტარუნარიანობა C დამოკიდებულია გატარების B ზოლზე, სიგნალი ხმაურის ფარდობაზე SNR-ზე და განისაზღვრება როგორც:

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \tag{16}$$

თეორიულად C გამტარუნარიანობა MIMO სისტემებისათვის წრფივად იზრდება ანტენების M რაოდენობის ზრდასთან ერთად.

$$C = M B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \tag{17}$$

უნდა აღინიშნოს, რომ გამტარუნარიანობის წრფივი დამოკიდებულება ანტენების რაოდენობაზე არის მხოლოდ იდეალური შემთხვევისათვის, როდესაც MIMO სისტემის ქვეარხებს შორის არ არის ინტერფერენცია, არხები ორთოგონალურია და მათ შორის კორელაცია ნულის ტოლია. MIMO სისტემის მოდელი ნაჩვენებია ნახ. 8.



ნახ.8. MIMO სისტემის მოდელი

აქ გამოიყენება M გადამცემი და N მიმღები ანტენა. რადიო არხი პირველ გადამცემს და პირველ მიმღებს შორის ხასიათდება h_{11} საარხო კოეფიციენტით, პირველ გადამცემსა და მეორე მიმღებს შორის h_{12} და ა.შ. i -იურ გადამცემსა და j -იურ მიმღებს შორის - h_{ij} . მთლიანი სისტემისათვის შეგვიძლია ჩავწეროთ H საარხო მატრიცა:

$$\begin{bmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1M_t} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{M_r 1} & \cdots & h_{M_r M_t} \end{bmatrix} \quad (18)$$

პრაქტიკაში H საარხო მატრიცის ელემენტებს შორის არსებობს კორელაცია. კორელაციის ხარისხი დამოკიდებულია რადიოტალღების გავრცელების პირობებზე, საანტენო ელემენტების პოლარიზაციაზე და მათ შორის განცალკევების მანძილზე. MIMO სისტემისათვის ასევე შეგვიძლია ჩავწეროთ.

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_{M_r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1M_t} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{M_r 1} & \cdots & h_{M_r M_t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_{M_t} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ \vdots \\ n_{M_r} \end{bmatrix} \quad (19)$$

ან გამარტივებული სახით

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n}, \quad (20)$$

სადაც, x - კონკრეტული არხით გადაცემული სიმბოლოებია, n - ამავე არხის ხმაურის ვექტორი, H - როგორც უკვე ვახსენეთ საარხო h_{ij} კოეფიციენტების საარხო მატრიცა, h_{ij} i -იურ გადამცემსა და j -იურ მიმღებს შორის გადაცემის კოეფიციენტი, რომელიც პრაქტიკულად წარმოადგენს i -იური გადამცემი ანტენის გაძლიერებას j -იური ანტენის მიმართულებით.

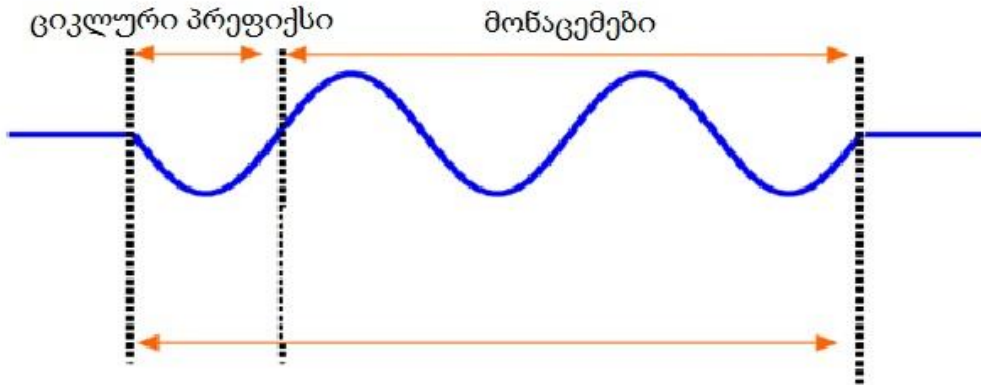
სპექტრის სენსინგის ახალი ტექნოლოგიის შემოტანით შესაძლებელია ანტენისათვის ისეთი დიაპაზონის შერჩევა, რომელის შემთხვევაშიც გაიზრდება მისი მიმართული მოქმედების კოეფიციენტი და მივიღებთ უკეთეს გადაცემის კოეფიციენტს. რადგან SISO სისტემებისაგან განსხვავებით MIMO სისტემებში გვაქვს მრავალი მიმღები და გადამცემი დიაპაზონის შერჩევის ამოცანა იღებს კომპლექსურ ხასიათს. კომპლექსურობა მდგომარეობს იმაში, რომ მთლიანი მაჩვენებლის გაუმჯობესებისათვის უნდა მოხდეს სისტემაში შემავალი ყველა არხის სკანირება და დიაპაზონების არჩევა სკანირების და სენსინგის შედეგად მიღებული ინფორმაციის ანალიზის შემდეგ, ოპტიმალური ალგორითმის გამოყენებით.

მობილური რადიო არხების შემთხვევაში ამოცანა გაცილებით რთულდება სტატიკურ არხებთან შედარებით, იქიდან გამომდინარე რომ გავრცელების პირობები იცვლება დროზე დამოკიდებულებით და ემატება დოპლერის ძვრის გავლენა. ამიტომ ოპტიმიზაციის ალგორითმს უნდა დაემატოს რესურსების დინამიური ადაპტაციის ფუნქცია.

MIMO სისტემებში გვინდა შემოვიტანოთ კოგნეტიური მიმღებ/გადამცემები, რომლებსაც შეუძლიათ განსაზღვრული დიაპაზონისათვის სპექტრის შემოწმება და სიხშირის ყველაზე თავისუფალი, ოპტიმალური ზოლის დაკავება. აქედან გამომდინარე MIMO სისტემა უნდა განვიხილოთ როგორ პარალელური კოგნეტიური არხების სისტემა.

მობილური კავშირის მეოთხე თაობის LTE ქსელში სიმბოლოთაშორის ინტერფერენციასთან საბრძოლველად გამოყენებულია ციკლური პრეფიქსი.

ციკლური პრეფიქსი იკავებს ქსელის რესურსების ნაწილს (ნახ.9.), რაც ამცირებს ქსელის მწარმოებლურობას.



ნახ.9. ციკლური პრეფიქსი

LTE ტექნოლოგიაში რესურსების ოპტიმიზაციისათვის შემოღებულია ორი ტიპის ციკლური პრეფიქსი - მოკლე ციკლური პრეფიქსი და გრძელი ციკლური პრეფიქსი. პრეფიქსების ცვლილება ხდება სიგნალის გავრცელების პირობების მიხედვით, იმაზე დამოკიდებულებით, თუ როგორი იქნება განსხვავება დაყოვნების დროებს შორის პირდაპირი გზით მოსულ სიგნალისა და არეკვლილი გზით მოსულ მძლავრ სიგნალებს შორის. ამ ორი ტიპის ციკლური პრეფიქსის გამოყენებით ვერ ხერხდება რესურსების სრული ოპტიმიზირება. ცხრ. 2. მოცემულია რესურსების დანაკარგები, რაც შეადგენს მოკლე ციკლური პრეფიქსისათვის დაახლოებით 7% და გრძელი ციკლური პრეფიქსის შემთხვევაში 25%.

ჩვენ განვიხილავთ ციკლური პრეფიქსის ხანგძლივობის ვარიაციულ გამოყენებას, რაც ნიშნავს რომ ციკლური პრეფიქსის ხანგძლივობა მაქსიმალურად მიახლოებული იქნება დაყოვნების დროსთან კონკრეტული გადაცემის სიხშირისათვის ინდივიდუალურად. ჩვენს მიერ აღნიშნული ამოცანის ოპტიმიზირება შესრულებულია მათემატიკის სტანდარტული ოპტიმიზირების ფუნქციების გამოყენებით. კონკრეტული შემთხვევისათვის ვიყენებთ ლაგრანჟის ფუნქციას.

რესურსების დანაკარგები მოკლე და გრძელი ციკლური პრეფიქსებისათვის
ცხრილი 4.1.

	მოკლე ციკლური პრეფიქსი				გრძელი ციკლური პრეფიქსი	
	OFDM სიმბოლო 0		OFDM სიმბოლო 1-6		დისკრეტების რაოდენობა	დრო, მკწმ
	დისკრეტების რაოდენობა	დრო, მკწმ	დისკრეტების რაოდენობა	დრო, მკწმ		
ხანგძლივობა	2048	66.67	2048	66.67	2048	66.67
ციკლური პრეფიქსის ხანგძლივობა	160	5.21	144	4.69	512	16.67
OFDM სიმბოლოს ხანგძლივობა	2208	71.88	2192	71.35	2560	83.33
რესურსების დანაკარგი %	7,8		7		25	

ამგვარად, ციკლური პრეფიქსის ხანგძლივობა მუდმივად ოპტიმიზირებული იქნება გადაცემის გარემოს პირობებთან დროის ნებისმიერ პერიოდში, რაც აგვაცილებს დროითი რესურსების ზედმეტ ხარჯებს და შესაბამისად გაზრდის მთლიანად სისტემის ეფექტურობას.

შემოთავაზებული მათემატიკური აპარატის ალგორითმის სახით ჩაწერა, შესაბამისი პროგრამული დამუშავება და პრაქტიკული რეალიზება პროგრამულად განსაზღვრულ რადიო პლატფორმაზე ფაქტიურად უკვე გვამღევს ახალ ტექნოლოგიას კონკრეტული შედეგებით.

დასკვნა

სადისერტაციო ნაშრომში ჩატარებული კვლევების შედეგები შეიძლება ჩამოყალიბებული იქნას შემდეგნაირად:

1. გაანალიზებულია MIMO-OFDM სისტემაში პარალელური არხების ორგანიზების და ქსელის გამტარუნარიანობის გაუმჯობესების სხვადასხვა ასპექტები.
2. ჩატარებულია WMAN 802.16-2004 სტანდარტის მოდელების კვლევა. ნაჩვენებია MIMO-OFDM სისტემის ახალი სქემის ვარიანტი, მაგ. ადაპტური მოდულაციის, 4 გადამცემი და 1 მიმღები ანტენის გამოყენებით, ისე რომ მოდულაციის ცვლილებისა და ადაპტაციის ალგორითმი იყოს მანძილის ან SNR-ის ფუნქცია. მაგ ახლო მანძილებზე გამოვიყენოთ QAM64, შემდეგ QAM16 და დაშორებულ დაფარვის ზონებში QPSK ან გაფილტრული QPSK.
3. განხილულია სიგნალების დაჯამების და გაერთიანების მეთოდები. ნაჩვენებია რომ მათ შორის ყველაზე ეფექტურია სელექციური მიღების მეთოდის გამოყენება.
4. ჩატარებულია LTE ქსელის საბაზო სადგურიდან მობილური სადგურისაკენ დადმავალ სატრანსპორტო არხში სიგნალის მიღების პროცესების გამოკვლევა Simulink-ის მოდელის გამოყენებით. მიღებული შედეგებით მტკიცდება მიმღებში სელექციური მეთოდის და დაძრული მოდულაციის გამოყენების უპირატესობა. კერძოდ 30°-იანი დაძვრის შემთხვევაში მივიღეთ შეცდომების ყველაზე ნაკლები რაოდენობა.
5. განხილულია MIMO სისტემის მათემატიკური მოდელები, კერძოდ არხის შეფასების და შემთხვევითი პროცესების ანალიზის სისტემები. მოცემულია ამ მოდელების კლასიფიკაცია. ნაჩვენებია მოდელის შემუშავების მეთოდები ახალი მოდელის მაგალითზე.

6. ჩატარებულია LTE ქსელის რადიო მხარის კვლევა MATLAB-ით. მიღებულია რომ, რესურსების გამოყენების ეფექტურობის გაზრდის მიზნით მიზანშეწონილია პარამეტრების ადაპტური ცვლა.

7. განხილულია გადასვლა ადაპტური ტექნოლოგიებიდან კოგნეტიურ - ადაპტურ ტექნოლოგიებზე. ნაჩვენებია რესურსების ოპტიმიზირების უფრო მეტი შესაძლებლობის მქონე ალგორითმების უპირატესობა კოგნეტიური ქსელების გამოყენებით.

8. გამოკვლეულია თუ რა შედეგს მოგვცემს LTE ქსელში SDR ტექნოლოგიის გამოყენება რესურსების დაზოგვის მიზნით ციკლური პრეფიქსის ადაპტაციის მაგალითზე და შეფასებულია კონკრეტული მოსალოდნელი შედეგები.

დისერტაციის თემაზე გამოქვეყნებული ნაშრომები:

1. კვირკველია შ, ბერიძე ჯ, ბურკაძე ტ. სპექტრული ეფექტურობის შეფასება მობილური კავშირის MIMO სისტემებში MATLAB-ით მოდელირებით.//მოხსენებების კრებული. საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია, "ენერგეტიკა: რეგიონული პრობლემები და განვითარების პერსპექტივები", ქუთაისი, საქართველო, 2013 - გვ. 332–336.
- 2.Kvirkvelia Sh.V., Beridze J.L.. Space-time coding in MIMO systems.//Georgian engineering news, №4, 2013 pp.26-29.
- 3.კვირკველია შ. ბერიძე ჯ. LTE ქსელის დადმავალი ფიზიკური არხის პარამეტრების კვლევა Matlab-ის გამოყენებით// „ინტელექტუალი”,№25. 2014. გვ.156-162.
4. .Kvirkvelia Sh.V., Kortua T.N., Beridze J.L.. Adaptive usage of main resources in MIMO - cognitive radio networks//Georgian engineering news, №2, 2014
5. კვირკველია შ. დროითი რესურსების გამოყენების ეფექტურობის გაზრდა მობილური კავშირის თანამედროვე ქსელებში პროგრამული რადიოს გამოყენებით (Software defined radio SDR).// „ინტელექტუალი”,№26. 2014.

Abstract

In the first chapter Physical channel modeling of MIMO systems is analyzed. Also in this chapter is analyzed the issue of increasing throughput by using a diagram of the antennas. In MIMO OFDM system parameters is considered separately the temporal characteristics of the technology. Theoretical studies are extended to practical models, and modeling programs.

In the second chapter Second chapter is dedicated Making receiver settings for the improvement of the network and optimize the overall resource savings. Reception and transmission of signals is analyzed separation. Theoretical research and analysis has been performed based on the LTE network modeling descending channel and the corresponding results obtained.

In the third chapter . Space between base and mobile stations is random and variable. Because of these algorithms for resource adaptation must be flexible. in this chapter discusses the use of algorithms for resources adaptation in the network. Discusses the models based on algorithms. Physical channel parameters for a particular case study was carried out LTE network using Matlab.

In the forth chapter. Discusses use cognitive technologies to adapt resources. MIMO parallel channels are treated as cognitive channels.

