



საქართველოს უნივერსიტეტი  
მეცნიერებისა და ტექნოლოგიების სკოლა  
სადოქტორო პროგრამა: კომპიუტერული მეცნიერებები

*ხელნაწერის უფლებით*

ბესიკი სახიაშვილი

## უსადენო საკომუნიკაციო სისტემების ეფექტიანობის ამაღლების საშუალებების შემუშავება

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად  
წარმოდგენილი ნაშრომის

სადისერტაციო მაცნე  
(სპეციალობა: 30011-34 კომპიუტერული მეცნიერებები)

თბილისი  
2024

სადისერტაციო ნაშრომი შესრულებულია საქართველოს უნივერსიტეტის მეცნიერებისა და ტექნოლოგიების სკოლაში.

სამეცნიერო ხელმძღვანელი: პროფესორი, ნოდარ უღრელიძე

საბჭოს თავმჯდომარე: პროფესორი, კახაბერ თავზარაშვილი

საბჭოს წევრი: პროფესორი, ირაკლი ნოსელიძე

ოფიციალური ექსპერტები:

შიდა ექსპერტი - პროფესორი, მათემატიკის დეპარტამენტის ხელმძღვანელი, ემზარ ხმალაძე

გარე ექსპერტი - ფიზიკა-მათემატიკის მეცნიერებათა დოქტორი, ფაიკ ზოგდანოვი

გარე ექსპერტი - პროფესორი, ულმის უნივერსიტეტი, გერმანია, კომუნიკაციების ინჟინერიის ინსტიტუტი, მარტინ ბოსერტი.

დისერტაციის დაცვა შედგება 2024 წლის 25 ოქტომბერს, 14:00 საათზე

მისამართი: თბილისი, კოსტავას 77ა, #214 აუდიტორია.

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება საქართველოს უნივერსიტეტის ბიბლიოთეკაში.

სადისერტაციო მაცნე დაიგზავნა 2024 წლის 1 სექტემბერს.

სადისერტაციო საბჭოს მდივანი - ნათია მანჯიკაშვილი

# ნაშრომის ზოგადი დახასიათება

## თემის აქტუალობა

თანამედროვე ტექნოლოგიების ეპოქაში, უსადენო საკომუნიკაციო სისტემები ყოველდღიური ცხოვრების განუყოფელი ნაწილი გახდა და მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს როგორც კერძო, ისე საჯარო სექტორებზე. Wi-Fi ტექნოლოგიებს ყოველდღიურად მილიარდობით ადამიანი გამოიყენებს და სულ უფრო და უფრო ხდება ინფორმაციის სწრაფი და ხელმისაწვდომი გადაცემის უმთავრესი საშუალება. 2025 წლისთვის მსოფლიო მასშტაბით დაახლოებით 1 მილიარდი Wi-Fi ცხელი წერტილი იქნება, რაც მეტყველებს ამ ტექნოლოგიის გლობალურ გავრცელებაზე და მოთხოვნაზე.

Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax) სტანდარტის დანერგვა მიზნად ისახავს არსებული ქსელების ეფექტურობის გაუმჯობესებას, განსაკუთრებით მაღალი სიმჭიდროვის მქონე ურბანულ გარემოებში, სადაც ქსელების გამტარუნარიანობა და საიმედოობა კრიტიკულად მნიშვნელოვანია. მიუხედავად იმისა, რომ Wi-Fi 6 სტანდარტი აუმჯობესებს გამტარუნარიანობას და ამცირებს შეყოვნებას, ჯერ კიდევ რჩება მრავალი ტექნოლოგიური გამოწვევა, რომლებიც მოითხოვს კვლევასა და განვითარებას.

გარდა ამისა, მობილური სისტემების სწრაფი განვითარება (5G) და განვითარების პერსპექტივა (6G) და “ჰიბრიდი” ქალაქების კონცეფცია, სადაც ფართოდ გამოიყენება დიდი მონაცემთა ნაკადები და მათი რეალურ დროში დამუშავება, ზრდის მოთხოვნას უფრო მაღალეფექტურ საკომუნიკაციო ქსელებზე. ურბანული სიმჭიდროვის ზრდისა და ინტერნეტ მომსახურებისადმი გაზრდილი მოთხოვნებიდან გამომდინარე ფართოთ განხილება ქსელების კონვერგენცია და ჰიბრიდული ქსელების განვითარება. ასეთი ქსელები, როგორცაა Li-Fi და Wi-Fi-ის ჰიბრიდული

მოდელები (HLW), შეიძლება მომავალი ტექნოლოგიების საფუძველი გახდეს.

ამგვარად, საკომუნიკაციო სისტემების ეფექტურობის ამაღლების საკითხი არა მხოლოდ ტექნიკური, არამედ სტრატეგიული და გლობალური მნიშვნელობისაა. 2050 წლისთვის მსოფლიოს მოსახლეობის ორმაგი ზრდა და ურბანიზაციის ინტენსიფიკაცია, მჭიდროდ დასახლებულ ურბანულ გარემოში, წარმოშობს ახალი ტიპის პრობლემებს, რომელთა გადაჭრა შეუძლებელია არსებული ტექნოლოგიებით. შესაბამისად, აუცილებელია ახალი, უფრო ეფექტური მოდულაციის სქემების და სასიგნალო სისტემების შექმნა, რომლებიც უზრუნველყოფენ ინფორმაციის საიმედო, ენერგოეფექტურ და სწრაფ გადაცემას და მცირე დაყოვნებას.

კვლევა, რომელიც მიზნად ისახავს უსადენო საკომუნიკაციო სისტემების ეფექტურობის გაზრდას ახალი ორ და ოთხგანზომილებიანი კონსტელაციების გამოყენებით, უზრუნველყოფს მნიშვნელოვან პროგრესს ამ მიმართულებით და წარმოადგენს მნიშვნელოვან წვლილს როგორც აკადემიურ, ისე ტექნოლოგიურ სფეროებში. ეს საკითხი არა მხოლოდ აკადემიურ წრეებშია აქტუალური, არამედ მისი პრაქტიკული მნიშვნელობაც უდიდესია, რადგან მას აქვს პოტენციალი, რომ შეცვალოს და გააუმჯობესოს თანამედროვე საკომუნიკაციო ქსელების არქიტექტურა და ფუნქციონირება.

## **კვლევის ძირითადი მიზანი და ამოცანები**

კვლევის მთავარი მიზანია ისეთი ახალი მოდულაციის სისტემების შექმნა, რომლებიც ეყრდნობიან ახალ ორ და ოთხგანზომილებიან სასიგნალო კონსტელაციებს და რომლებიც

ზრდიან უსადენო საკომუნიკაციო სისტემების ეფექტურობას - უზრუნველყოფენ გაუმჯობესებულ სიგნალ-ხელშემშლის თანაფარდობას, სპექტრულ ეფექტურობას და გამარტივებული დეტექტორების გამოყენების შესაძლებლობას.

ამოცანები მოიცავს:

- ახალ ორგანზომილებიან APSK (Amplitude Phase Shift Keying) კონსტელაციების აგებას შემუშავებული მეთოდების საფუძველზე.
- აგებული ორგანზომილებიანი კონსტელაციების მახასიათებლების კვლევას და მათი ეფექტურობის გაუმჯობესების გზების პოვნას.
- დღეს არსებული, ცნობილი, ოთხგანზომილებიანი სასიგნალო კონსტელაციების გამოყენებით ახალი მოდულაციის სქემების აგების მეთოდების შემუშავებას მრავალანტენიანი სისტემებისათვის და მათი მახასიათებლების კვლევას.
- კომპიუტერული სიმულაციისა და ექსპერიმენტების ჩატარებას ახალი კონსტელაციების ეფექტურობის უფრო ზუსტად შესაფასებლად.

## მეცნიერული სიახლე და ძირითადი შედეგები

კვლევა მოიცავს რამდენიმე მნიშვნელოვან მეცნიერულ სიახლეს და მიღწევას, რომლებიც უშუალოდ ეხება უსადენო საკომუნიკაციო სისტემების ეფექტურობის გაუმჯობესებას.

- ახალი ორგანზომილებიანი APSK კონსტელაციების აგება:

- ერთ-ერთი ძირითადი სიახლე არის ორგანზომილებიანი APSK კონსტელაციების აგების მეთოდების შემუშავება და მათი გამოყენებით ახალი სიგნალების აგება, რომელიც უზრუნველყოფენ სისტემის ეფექტურობის მნიშვნელოვნად გაუმჯობესებას ტრადიციულ PSK და QAM კონსტელაციებთან შედარებით. კერძოდ, აგებული ახალი წრიული APSK სასიგნალო კონსტელაცია, გამოირჩევა სიმარტივით, მაღალი ენერგო და სპექტრული მაჩვენებლებით.
- კვლევაში შემოთავაზებული ახალი APSK კონსტელაციების სტრუქტურა დაფუძნებულია კონცენტრულ წრეწირებზე განლაგებულ სიგნალებზე, რაც შესაძლებელს ხდის მნიშვნელოვნად გაზრდილი იქნას სისტემის ეფექტურობა ასეთი ტიპის სიგნალების გამოყენებისას.
- კომპიუტერული სიმულაციების საფუძველზე დადასტურდა წარმოდგენილი თეორიული ვარაუდები, რომ ახალი APSK კონსტელაციები უზრუნველყოფენ მაღალი სპექტრული ეფექტურობის მიღწევას სიგნალთა გამარტივებული დეტექტორით, რაც მნიშვნელოვანია თანამედროვე უსადენო ქსელების მოთხოვნებისთვის. მათი გამოყენება განსაკუთრებით ეფექტურია მაღალი სიმჭიდროვის მქონე ურბანულ გარემოში, სადაც

ქსელური რესურსების ოპტიმიზაცია კრიტიკულია.

- ახალი სივრცითი მოდულაციის სქემების აგება ოთხგანზომილებიანი სიგნალების ბაზაზე:
  - კიდევ ერთი მნიშვნელოვანი მეცნიერული სიახლე არის ოთხგანზომილებიანი სასიგნალო კონსტელაციების ბაზაზე მრავალანტენიანი სისტემების (MIMO, კერძოდ MIMO სივრცითი მოდულაციით) განვითარება, რომლებიც სთავაზობენ უკეთეს გამოსავალს ეფექტურობის ამალღებისთვის. ოთხგანზომილებიანი კონსტელაციების გამოყენება საშუალებას იძლევა მნიშვნელოვნად გაუმჯობესდეს სისტემის სიგნალ-ხელშემლის თანაფარდობა და გამტარუნარიანობა.
  - ახალი სივრცითი მოდულაციის სისტემების აგება ეფუძნება ოთხგანზომილებიანი სასიგნალო სისტემის დეკომპოზიციას ქვეკონსტელაციებად. ეს ახალი ქვეკონსტელაციები განსაკუთრებით ეფექტურია მრავალანტენიან სისტემებში სივრცითი მოდულაციით და მნიშვნელოვნად აუმჯობესებს შედეგებს დაკავშირებულს ანტენათა ინდექსების ამოცნობასთან.
  - ნაშრომში წარმოდგენილია სიმულაციის სხვადასხვა მრავალფეროვანი შედეგები, რომლებიც აჩვენებენ, რომ აგებული ახალი სისტემები ბევრად უკეთეს შედეგებს იძლევიან ჩვეულებრივი ორგანზომილებიანი

კონსტელაციების გამოყენების შემთხვევასთან შედარებით. ისინი უზრუნველყოფენ გამტარუნარიანობის მნიშვნელოვნად გაუმჯობესებას, რაც კრიტიკულია მაღალსიჩქარიან ქსელებში და განსაკუთრებით აქტუალურია 5G და 6G ტექნოლოგიებისთვის.

- **სიგნალთა გამარტივებული დეტექტირების ალგორითმების დამუშავება:**

- კვლევაში ასევე შემოთავაზებულია სიგნალთა ახალი, გამარტივებული დეტექტორების მუშაობის ალგორითმები, რომლებიც განსაკუთრებით ეფექტურია წრიული მრავალდონიანი APSK კონსტელაციებისთვის. ეს დეტექტორები საშუალებას იძლევა შემცირდეს მიმღების გამოთვლითი სირთულე და შესაბამისად ენერგეტიკული რესურსების მოხმარება, რაც მნიშვნელოვანია სისტემების პრაქტიკული დანერგვის პროცესში.

- გამარტივებული დეტექტორების შემუშავება ეფუძნება კონსტელაციების სტრუქტურულ მახასიათებლებს და მათი ოპტიმიზაციის შესაძლებლობებს. დეტექტორების ამგვარი გამარტივება შესაძლებელს ხდის ახალი კონსტელაციების გამოყენებას ქსელებში, სადაც მაღალი გამოთვლითი სიმძლავრე არ არის ხელმისაწვდომი.

- **კომპიუტერული სიმულაციის შედეგები:**

- კვლევის ფარგლებში ჩატარებული კომპიუტერული სიმულაციები აჩვენებს, რომ



სისტემები ახალი ორგანოზომილებიანი და ოთხგანზომილებიანი კონსტელაციებით უზრუნველყოფენ მნიშვნელოვანი გაუმჯობესებებს ქსელების მუშაობაში. მიღებული შედეგები აჩვენებს, რომ ახალი კონსტელაციები იძლევიან ენერგეტიკული მაჩვენებლის მნიშვნელოვან გაუმჯობესებას, რაც საშუალებას აძლევს სისტემებს უკეთ გაუმკლავდნენ ფედინგიან და ხმაურიან არხებს.

- ასევე, ნაჩვენებია, რომ ახალი კონსტელაციები უზრუნველყოფენ ქსელების უფრო ეფექტურ ფუნქციონირებას მაღალი სიმჭიდროვის პირობებში, რაც მნიშვნელოვანია თანამედროვე ქალაქების ინფორმაციული ინფრასტრუქტურისთვის.

ეს შედეგები წარმოაჩენს კვლევის მაღალ სამეცნიერო ღირებულებას და მნიშვნელოვნად აძლიერებს უსადენო საკომუნიკაციო სისტემების შემდგომი განვითარების პერსპექტივებს. ნაშრომი წარმოადგენს მნიშვნელოვან წვლილს თანამედროვე კომუნიკაციების თეორიისა და პრაქტიკის განვითარებაში, რაც სთავაზობს ახალ გზებს და გადაწყვეტილებებს არსებული გამოწვევების გადასაჭრელად.

## კვლევის თეორიული და მეთოდოლოგიური საფუძვლები

კვლევის თეორიული საფუძვლები ეფუძნება საკომუნიკაციო სისტემების აგების მათემატიკურ პრინციპებს, განსაკუთრებით ფედინგანი არხებისა და მრავალანტენიანი (SIMO, MIMO და MIMO სივრცითი მოდულაციით) სისტემების მოდელირებისას. კვლევაში გამოყენებულია ისეთი მეთოდები, როგორცაა:

- **სიგნალების აგებისა და მათი მახასიათებლების კვლევის მათემატიკური მეთოდები** ორ და ოთხ განზომილებაში არსებული სიგნალებისათვის.
- **მათემატიკური მოდელირება და კომპიუტერული სიმულაცია** ორგანზომილებიანი APSK და ოთხგანზომილებიანი კონსტელაციების გამოყენების ეფექტურობის შესაფასებლად.
- **დამუშავებული ალგორითმების გამოყენება** დეტექტორების ოპტიმიზაციისთვის, რაც უზრუნველყოფს დეტექტირების პროცესის გამარტივებას და შესაბამისად გაზრდილ ეფექტურობას.

## ნაშრომის თეორიული ღირებულება

ნაშრომში წარმოდგენილია ახალი ხედვა და ცოდნა ორგანზომილებიანი და ოთხგანზომილებიანი კონსტელაციების აგებასა და მათ ეფექტურ გამოყენებაში. ნაშრომში წარმოდგენილი მოდელების და მეთოდების საფუძველზე შესაძლებელია სხვადასხვა საკომუნიკაციო სისტემების ეფექტურობის

გაუმჯობესება, რაც მნიშვნელოვან წვლილს შეიტანს საკომუნიკაციო სისტემების განვითარებაში.

## **ნაშრომის პრაქტიკული მნიშვნელობა**

კვლევის პრაქტიკული მნიშვნელობა მდგომარეობს იმაში, რომ ნაშრომის შედეგები პირდაპირი გამოყენების პოტენციალს ფლობენ უახლეს საკომუნიკაციო სისტემებში, განსაკუთრებით ისეთ სფეროებში, როგორცაა მობილური ქსელები, Wi-Fi ქსელები, და “ჭკვიანი” ქალაქების ინფრასტრუქტურა.

ახალი კონსტელაციები და მოდულაციის სქემები შეიძლება გამოყენებული იქნას მაღალეფექტური და სტაბილური უსადენო საკომუნიკაციო ქსელების შექმნისთვის, რომლებიც გაუმჯობესებულ გამტარუნარიანობასა და ენერგოეფექტურობას უზრუნველყოფენ. ეს კვლევა არის საფუძველი მომავალი ტექნოლოგიური ინოვაციებისთვის, რომელიც ხელს შეუწყობს ინტერნეტკავშირის უფრო სწრაფ, საიმედო და მასობრივ გამოყენებას.

## **დასკვნა**

სადოქტორო ნაშრომს შეუძლია მნიშვნელოვანი წვლილი შეიტანოს საკომუნიკაციო ტექნოლოგიების განვითარებაში. მასში განხილული და წარმოდგენილია ახალი ორ და ოთხგანზომილებიანი კონსტელაციები, რომლებიც აჩვენებენ

არსებით გაუმჯობესებას სხვადასხვა საკომუნიკაციო პარამეტრების მიმართ.

ნაშრომი არა მხოლოდ უსადენო საკომუნიკაციო სისტემების არსებული მახასიათებლების გაუმჯობესებას ისახავს მიზნად, არამედ ახალ პერსპექტივებს ქმნის მომავალი კომუნიკაციების სისტემების განვითარებისთვის. ახალი ორ და ოთხგანზომილებიანი კონსტელაციების შემუშავება გვამღვეს შესაძლებლობას, გამოვიყენოთ მათი უპირატესობები ისეთ დარგებში, რომლებიც საჭიროებენ მაღალი სიჩქარის და საიმედოობის საკომუნიკაციო არხებს. ამ სისტემების დახმარებით შესაძლებელი იქნება ეფექტური კავშირების უზრუნველყოფა რთულ გარემოებებში, სადაც ტრადიციული მოდულაციის სქემები ვერ უზრუნველყოფენ საკმარის შედეგებს.

მნიშვნელოვანია აღინიშნოს, რომ ეს კვლევა პასუხობს არსებულ გამოწვევებს და საჭიროებებს, რომლებიც წარმოიშვა უსადენო ქსელების სწრაფი ზრდისა და გამოყენების ფონზე. თანამედროვე სამყაროში, სადაც მილიარდობით ადამიანი ყოველდღიურად იყენებს Wi-Fi და სხვა უსადენო ქსელებს, სისტემების ეფექტურობის გაუმჯობესება გადამწყვეტი მნიშვნელობისაა. ნაშრომი აჩვენებს, რომ შესაძლებელია მნიშვნელოვნად გაუმჯობესდეს ქსელების სიგნალ-ხელშემშლის თანაფარდობა, გამტარუნარიანობა და საერთო ეფექტურობა ახალი კონსტელაციების გამოყენებით.

**მთავარი შედეგები** ნაშრომში მოიცავს:

- **ორგანზომილებიანი APSK კონსტელაციების** შემუშავებას, რომლებიც უზრუნველყოფენ უკეთეს SNR მაჩვენებელს და ენერგოეფექტურობას.

- **ოთხგანზომილებიანი სასიგნალო სისტემების** გამოყენებას, რომლებიც განსაკუთრებით ეფექტურია მრავალანტენიან MIMO სისტემებში.
- **გამარტივებული დეტექტორების** შექმნასა და გამოყენებას, რომლებიც ამცირებენ გამოთვლით სირთულეებს და უზრუნველყოფენ ახალი კონსტელაციების პრაქტიკულ დანერგვას.

დასკვნის სახით, კიდევ ერთხელ შეიძლება აღინიშნოს, რომ კვლევის თეორიული ღირებულება მნიშვნელოვანია, ის ავითარებს ახალ თეორიებს და მიდგომებს, რომლებიც საჭიროა საკომუნიკაციო სისტემების ეფექტურობის გასაზრდელად. ნაშრომში შემოთავაზებული ახალი კონსტელაციები და მოდულაციის სქემები შეიძლება გამოყენებული იყოს როგორც აკადემიურ კვლევებში, ასევე პრაქტიკულ ტექნოლოგიურ დანერგვებში.

ყოველივე ამას უფრო აძლიერებს მისი პრაქტიკული მნიშვნელობაც, რადგან კვლევის შედეგები შეიძლება მყისიერად იქნეს გამოყენებული თანამედროვე და მომავალი საკომუნიკაციო ტექნოლოგიებში. ეს მოიცავს 5G და 6G ტექნოლოგიების განვითარებას, Wi-Fi ქსელების გაუმჯობესებას და “ჭკვიანი” ქალაქების ინფრასტრუქტურის შექმნას. ახალი კონსტელაციები და დეტექტორები საშუალებას იძლევა გაუმჯობესდეს ქსელების გამტარუნარიანობა, შემცირდეს ენერჯის მოხმარება და უზრუნველყოფილ იქნას საიმედო კავშირი რთულ გარემოებებში.

საბოლოოდ, ნაშრომი წარმოადგენს საკომუნიკაციო ტექნოლოგიების განვითარების ახალ ეტაპს, რომელიც ხელს შეუწყობს სწრაფი, საიმედო და ეფექტური საკომუნიკაციო ქსელების შექმნას. ეს კვლევა არის მნიშვნელოვანი ნაბიჯი წინ უსადენო კომუნიკაციების სფეროში და აქვს პოტენციალი, რომ დიდი გავლენა იქონიოს მომავალ ტექნოლოგიურ ინოვაციებზე.

ახალ სისტემათა სქემები, მათი კომპიუტერული სიმულაცია, გამოთვლები და შედეგების გრაფიკული წარმოდგენა განხორციელებულია სისტემებში Matlab, Maple და Visio.



**The University of Georgia**  
*School of Science and Technology*  
**PhD Program: Computer Science**

*Copyright of the manuscript*

**Besiki Sakhiashvili**

# **Development of Methods for Improving the Effectiveness of Wireless Communication Systems**

Thesis submitted for the academic degree of Doctor

**Disertation bulletin**  
(Speciality: Computer Science)

Tbilisi  
2024

The thesis was completed in the School of Science and Technology of the University of Georgia.

Scientific supervisor: Professor, Nodar Ugrelidze

Chairman: Professor, Kakhaber Tavzarashvili

Council member: Professor, Irakli Noselidze

Dissertation Board:

Internal Expert: Professor, Head of Mathematics Department, Emzar Khmaladze

External Expert: Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Faik Bogdanov

External Expert: Institute of Communications Engineering, Ulm University, Germany, Professor Dr. Martin Bossert

Thesis defense be held on October 25, 2024, at 02:00 pm

Address: Kostava 77a, #214 audience, Tbilisi.

Dissertation can be introduced in the library of the University of Georgia.

Dissertation bulletin was sent on September 1, 2024.

Secretary of the Dissertation Council, manager of the doctoral level and qualification thesis – Natia Manjikashvili



# General overview of thesis

## Relevance of the topic

In the era of modern technologies, wireless communication systems have become an integral part of everyday life and have a significant impact on both the private and public sectors. Billions of people use Wi-Fi technologies daily, and it is increasingly becoming the primary means for fast and accessible information transmission. By 2025, there are expected to be approximately 1 billion Wi-Fi hotspots worldwide, reflecting the global expansion and demand for this technology.

The introduction of the Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax) standard aims to improve the efficiency of existing networks, particularly in densely populated urban environments where network capacity and reliability are critically important. Although Wi-Fi 6 enhances network throughput and reduces latency, many technological challenges remain that require further research and development.

Moreover, the rapid development of mobile systems (5G) and the potential of future technologies (6G), alongside the concept of "smart" cities where large data flows are widely used and processed in real-time, is increasing the demand for more efficient communication networks. With urban density growing and the demand for internet services rising, the convergence of networks and the development of hybrid networks, such as Li-Fi and Wi-Fi hybrid models (HLW), are being broadly considered. These networks may form the foundation of future technologies.

Thus, the issue of improving the efficiency of communication systems is not only of technical but also of strategic and global importance. By 2050, the world's population is expected to double, and the intensification of urbanization in densely populated environments will create new types of problems that cannot be solved with current

technologies. Therefore, it is essential to develop new, more efficient modulation schemes and signal systems that ensure reliable, energy-efficient, and fast data transmission with minimal latency.

The research, aimed at enhancing the efficiency of wireless communication systems using new two and four-dimensional constellations, represents significant progress in this direction and makes an important contribution to both the academic and technological fields. This issue is not only relevant in academic circles but also has immense practical importance, as it has the potential to change and improve the architecture and functionality of modern communication networks.

## **The Main Objective and Tasks of the Research**

The main objective of the research is to develop new modulation systems based on novel two- and four-dimensional signal constellations, which enhance the efficiency of wireless communication systems by providing improved signal-to-noise ratios, spectral efficiency, and the ability to use simplified detectors.

The specific tasks include:

- Developing new two-dimensional APSK (Amplitude Phase Shift Keying) constellations based on the proposed methods.
- Investigating the characteristics of the constructed two-dimensional constellations and identifying ways to improve their efficiency.

- Formulating methods for developing new modulation schemes for multi-antenna systems using known four-dimensional signal constellations and studying their characteristics.
- Conducting computer simulations and experiments to accurately evaluate the effectiveness of the new constellations.

## Scientific Novelty and Main Results

The research includes several significant scientific novelties and achievements directly related to improving the efficiency of wireless communication systems.

- **Development of New Two-Dimensional APSK Constellations:**
  - One of the key novelties is the development of methods for constructing two-dimensional APSK constellations and the creation of new signals based on these methods, which significantly improve system efficiency compared to traditional PSK and QAM constellations. Specifically, the new circular APSK signal constellation demonstrates simplicity, high energy efficiency, and enhanced spectral characteristics.
  - The new APSK constellation structure proposed in the research is based on signals arranged in concentric circles, allowing for a significant increase in system efficiency when using this type of signal.

- The theoretical assumptions presented in the research are confirmed by computer simulations, showing that the new APSK constellations achieve high spectral efficiency with simplified signal detection, which is crucial for the requirements of modern wireless networks. These constellations are particularly effective in high-density urban environments where network resource optimization is critical.
- **Development of New Spatial Modulation Schemes Based on Four-Dimensional Signals:**
  - Another important scientific novelty is the development of multi-antenna systems (MIMO, specifically MIMO with spatial modulation) based on four-dimensional signal constellations, offering a better solution for improving efficiency. Using four-dimensional constellations allows for a significant improvement in the system's signal-to-noise ratio and throughput.
  - The development of new spatial modulation systems is based on the decomposition of four-dimensional signal constellations into sub-constellations. These new sub-constellations are particularly effective in multi-antenna systems with spatial modulation and greatly improve performance related to the identification of antenna indices.
  - The dissertation presents various simulation results that demonstrate that the newly developed systems provide significantly better performance compared to the use of conventional two-dimensional

constellations. These systems offer substantial improvements in throughput, which is critical for high-speed networks and particularly relevant for 5G and 6G technologies.

- **Development of Simplified Signal Detection Algorithms:**
  - The research also proposes new simplified signal detection algorithms, which are particularly effective for multi-level circular APSK constellations. These detectors reduce the computational complexity of the receiver and, consequently, the consumption of energy resources, which is crucial for the practical implementation of such systems.
  - The simplification of detectors is based on the structural characteristics of the constellations and their optimization potential. This simplification enables the use of new constellations in networks where high computational power is not available.
- **Computer Simulation Results:**
  - The research includes extensive computer simulations that demonstrate the significant improvements in network performance when using new two-dimensional and four-dimensional constellations. The results show that the new constellations provide considerable enhancements in energy efficiency, allowing systems to better cope with fading and noisy channels.
  - Additionally, the results illustrate that the new constellations ensure more efficient network

functionality in high-density environments, which is crucial for the information infrastructure of modern cities.

These results highlight the high scientific value of the research and significantly strengthen the prospects for further development of wireless communication systems. The dissertation makes a substantial contribution to both the theoretical and practical aspects of modern communication systems, offering new approaches and solutions to existing challenges.

## **Theoretical and Methodological Foundations of the Research**

The theoretical foundations of the research are based on the mathematical principles of constructing communication systems, particularly in the context of fading channels and multi-antenna systems (SIMO, MIMO, and MIMO with spatial modulation). The following methods are used in the research:

- **Mathematical methods for the design and analysis of signals**, focusing on two and four-dimensional signal constellations.
- **Mathematical modeling and computer simulation** to assess the effectiveness of using two-dimensional APSK and four-dimensional constellations.
- **Algorithms for optimizing signal detection processes**, ensuring simplified detection and enhanced efficiency.

## **Theoretical Value of the Dissertation**

The dissertation presents new insights and knowledge on the construction and efficient use of two- and four-dimensional constellations. The models and methods introduced in the dissertation can be applied to improve the efficiency of various communication systems, thereby making a significant contribution to the development of communication systems.

## **Practical Significance of the Dissertation**

The practical significance of the research lies in the fact that its results have direct applicability in cutting-edge communication systems, particularly in fields such as mobile networks, Wi-Fi networks, and the infrastructure of "smart" cities.

The new constellations and modulation schemes developed in this research can be used to create highly efficient and stable wireless communication networks that provide improved throughput and energy efficiency. This research serves as a foundation for future technological innovations, contributing to the faster, more reliable, and widespread use of internet connectivity.

## Conclusion

The dissertation can make a significant contribution to the development of communication technologies. It presents and discusses new two- and four-dimensional constellations that demonstrate substantial improvements in various communication parameters.

The dissertation aims not only to improve the existing characteristics of wireless communication systems but also to create new perspectives for the development of future communication systems. The development of new two- and four-dimensional constellations enables us to leverage their advantages in fields that require high-speed and reliable communication channels. With the help of these systems, it will be possible to provide efficient connections in challenging environments where traditional modulation schemes fail to deliver adequate results.

It is important to note that this research addresses the existing challenges and needs arising from the rapid growth and widespread use of wireless networks. In today's world, where billions of people use Wi-Fi and other wireless networks daily, improving the efficiency of these systems is of critical importance. The dissertation shows that the use of new constellations can significantly enhance the signal-to-noise ratio, throughput, and overall efficiency of networks.

**The main results** of the dissertation include:

- The development of **two-dimensional APSK constellations** that provide better SNR (signal-to-noise ratio) and energy efficiency.
- The use of **four-dimensional signal systems**, which are particularly effective in multi-antenna MIMO systems.



- The creation and application of **simplified detectors** that reduce computational complexity and enable the practical implementation of new constellations.

In conclusion, it can be reaffirmed that the theoretical value of this research is significant, as it develops new theories and approaches necessary for increasing the efficiency of communication systems. The new constellations and modulation schemes proposed in the dissertation can be applied in both academic research and practical technological implementations.

All of this is further strengthened by its practical significance, as the research results can be immediately applied to modern and future communication technologies. This includes the development of 5G and 6G technologies, improvements in Wi-Fi networks, and the creation of "smart" city infrastructures. The new constellations and detectors allow for enhanced network throughput, reduced energy consumption, and reliable connections in challenging environments.

Ultimately, the dissertation represents a new stage in the development of communication technologies, which will contribute to the creation of fast, reliable, and efficient communication networks. This research is an important step forward in the field of wireless communications and has the potential to significantly influence future technological innovations.

Looking ahead, the research lays a solid foundation for exploring even more advanced communication techniques that could be integrated into next-generation technologies. The innovative approaches developed in this dissertation not only enhance the current capabilities of wireless systems but also pave the way for future advancements in areas like quantum communication and AI-driven signal processing. By addressing both theoretical and practical aspects, this work offers a versatile platform for future researchers and industry experts to build upon, potentially

leading to groundbreaking developments in the field of global connectivity and smart infrastructure.

The design of the new systems, their computer simulations, calculations, and graphical presentation of the results were implemented using Matlab, Maple, and Visio.