

**TOSHKENT AXBOROT TEXNOLOGIYALARI UNIVERSITETI**  
**HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI**  
**DSc.13/30.12.2019.T.07.02 RAQAMLI ILMIY KENGASH**  

---

**TOSHKENT AXBOROT TEXNOLOGIYALARI UNIVERSITETI**

**REYRNAZAROV YERNAZAR NURJAMIYEVICH**

**KOGNITIV RADIOALOQA TIZIMLARIDA CHASTOTA SPEKTRINI  
SAMARALI BOSHQARISH USULI VA MODELLARI**

**05.04.02 – Radiotexnika, radionavigatsiya, radiolokatsiya va televideniye tizimlari va  
qurilmalari. Mobil, tolaoptik aloqa tizimlari**

**TEXNIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD) DISSERTATSIYASI  
AVTOREFERATI**

**Toshkent – 2024**

**Falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi avtoreferati mundarijasi**

**Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD)**

**Content of dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD)**

**Reynazarov Yernazar Nurjamiyevich**

Kognitiv radioaloqa tizimlarida chastota spektrini samarali boshqarish usuli va modellari ..... 3

**Рейпназаров Ерназар Нуржамиевич**

Метод и модели эффективного управления частотным спектром в системах когнитивной радиосвязи ..... 21

**Reynazarov Ernazar Nurjamiyevich**

Method and models of effective management of the frequency spectrum in cognitive radio communication systems ..... 39

**E‘lon qilingan ishlar ro‘yxati**

Список опубликованных работ

List of published works ..... 43

**TOSHKENT AXBOROT TEXNOLOGIYALARI UNIVERSITETI**  
**HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI**  
**DSc.13/30.12.2019.T.07.02 RAQAMLI ILMIY KENGASH**  

---

**TOSHKENT AXBOROT TEXNOLOGIYALARI UNIVERSITETI**

**REYRNAZAROV YERNAZAR NURJAMIYEVICH**

**KOGNITIV RADIOALOQA TIZIMLARIDA CHASTOTA SPEKTRINI  
SAMARALI BOSHQARISH USULI VA MODELLARI**

**05.04.02 – Radiotexnika, radionavigatsiya, radiolokatsiya va televideniye tizimlari va  
qurilmalari. Mobil, tola-optik aloqa tizimlari**

**TEXNIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)  
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

**Toshkent – 2024**

**Texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2023.3.PhD/T3937 raqam bilan ro'yxatga olingan.**

Dissertatsiya Muhammad al-Xorazmiy nomidagi Toshkent axborot texnologiyalari universitetida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengash veb-sahifasida ([www.tuit.uz](http://www.tuit.uz)) va "ZiyoNet" axborot-ta'lim portalida ([www.ziynet.uz](http://www.ziynet.uz)) joylashtirilgan.

**Ilmiy rahbar:**

**Xujamatov Xalimjon Ergashevich**  
texnika fanlari doktori, dotsent

**Rasmiy opponentlar:**

**Davronbekov Dilmurod Abdujalilovich**  
texnika fanlari doktori, professor

**Djabborova Muattar Anvarjonovna**  
texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)

**Yetakchi tashkilot:**

**Toshkent davlat transport universiteti**

Dissertatsiya himoyasi Toshkent axborot texnologiyalari universiteti huzuridagi DSc.13/30.12.2019.T.07.02 raqamli Ilmiy kengashning 2024-yil "\_\_\_" \_\_\_\_\_ soat \_\_\_ dagi majlisida bo'lib o'tadi. (Manzil: 100084, Toshkent shahri, Amir Temur ko'chasi, 108-uy. Tel.: (+99871) 238-64-15; e-mail: [tuit@tuit.uz](mailto:tuit@tuit.uz)).

Dissertatsiya bilan Muhammad al-Xorazmiy nomidagi Toshkent axborot texnologiyalari universiteti Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (\_\_\_ - raqam bilan ro'yxatga olingan). (Manzil: 100084, Toshkent, Amir Temur ko'chasi, 108-uy. Tel.: (+99871) 238-64-15).

Dissertatsiya avtoreferati 2024-yil "\_\_\_" \_\_\_\_\_ da tarqatildi.  
(2024-yil "\_\_\_" \_\_\_\_\_ dagi \_\_\_ - raqamli reestr bayonnomasi).

**B.Sh.Maxkamov**

Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash raisi, iqtisodiyot fanlari doktori, professor

**M.S.Saitkamolov**

Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash ilmiy kotibi, iqtisodiyot fanlari doktori

**D.Y.Irgasheva**

Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash huzuridagi ilmiy seminar raisi, texnika fanlari doktori, professor

## **KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)**

**Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati.** Jahonda radiochastota spektridan foydalanish samaradorligini oshirish, aloqa vositalarida dasturiy boshqarish tamoyillari, axborotni qayta ishlashning ilg'or texnologiyalari, radiochastota spektriga kirishni boshqarishning mavjud qurilmalarini takomillashtirishga katta e'tibor qaratilmoqda. Ushbu yo'nalishda, jumladan ma'lum bir aloqa operatoriga litsenziyalash asosida ajratilgan radiochastota spektri polosasini ma'lumotlarni uzatish va qabul qilish uchun vaqtincha egallashga qodir bo'lgan texnik vositalari hamda apparat-dasturiy ta'minotini ishlab chiqishga alohida e'tibor qaratilmoqda. Bu borada rivojlangan mamlakatlarda ham kognitiv radioaloqa tizimlarida radiochastota spektrining egallanmagan qismlarini ishonchli va samarali aniqlashning yangi texnika, texnologiya hamda usullarini ishlab chiqish muhim vazifalardan biri hisoblanmoqda.

Jahonda simsiz tarmoqlarning kanal resursini taqsimlash va kognitiv radioaloqa tizimlarida chastota spektri bo'yicha qaror qabul qilish usullarini ishlab chiqishga qaratilgan qator ilmiy tadqiqot ishlari olib borilmoqda. Ushbu sohada, jumladan kognitiv sikl asosida radiochastota spektridan ikkilamchi foydalanish uchun radioaloqa tizimlarining kanallarni egallash va bo'shatish, spektrni egallanmagan qismlarini aniqlash, signallarga shovqin qo'shish va so'ndirish jarayonlarini real vaqt mobaynida tadqiq qilish hamda spektrni ko'p kanalli zondlash hamda radiochastotadan foydalanish samaradorligini oshirish imkonini beruvchi modellarni ishlab chiqishga alohida e'tibor qaratilmoqda. Shu bilan birga birlamchi tarmoqqa xalaqitlarni kamaytirish imkonini beruvchi ikkita chegaraviy qiymat va mashinali o'qitishga asoslangan hamda radiochastota spektrini zondlash hamda kanal holati bo'yicha qaror qabul qilish tizimining aniqligini oshirish imkonini beruvchi usul va modellarni ishlab chiqish dolzarb hisoblanmoqda.

Respublikamizda telekommunikatsiya va axborot texnologiyalari sohasini yanada takomillashtirishga, simsiz va mobil aloqa qamrovini oshirish hamda aloqa sifatini yaxshilashga va radiochastota spektridan samarali foydalanishga qaratilgan keng qamrovli chora-tadbirlar amalga oshirilmoqda. 2022 – 2026-yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasida, jumladan “Raqamli infratuzilmani yanada rivojlantirish orqali barcha aholi maskanlarini va ijtimoiy obyektlarini va magistral avtomobil yo'llarini keng polosali ulanish tarmoqlari bilan qamrab olish”<sup>1</sup> vazifalari belgilangan. Mazkur vazifalarni amalga oshirish, shuningdek kognitiv radio tarmoqda spektrni zondlash jarayonini tadqiq qilish model va algoritmlarini, tarmoqda spektr holati bo'yicha qaror qabul qilishning samarador usuli hamda modellarini, spektrni zondlash modeli va algoritmini ishlab chiqish muhim vazifalardan biri hisoblanadi.

O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2020-yil 10-oktabrdagi PF-6079-son ““Raqamli O'zbekiston – 2030” strategiyasini tasdiqlash va uni samarali amalga oshirish chora-tadbirlari to'g'risida”gi va 2022-yil 28-yanvardagi PF-60-son “2022 – 2026-yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi

---

<sup>1</sup> O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi PF-60-son “2022 – 2026-yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to'g'risida”gi Farmoni

to'g'risida"gi Farmonlari, 2013-yil 22-oktabrdagi PQ-2053-son "Radiochastota spektrini boshqarishni tashkil qilish va foydalanishni takomillashtirish to'g'risida"gi, 2018-yil 21-noyabrdagi PQ-4022-son "Raqamli iqtisodiyotni rivojlantirish maqsadida raqamli infratuzilmani yanada modernizatsiya qilish chora-tadbirlari to'g'risida"gi va 2019-yil 4-oktabrdagi PQ-4477-son "2019 – 2030-yillar davrida O'zbekiston Respublikasining "Yashil" iqtisodiyotga o'tish strategiyasini tasdiqlash to'g'risida"gi Qarorlari hamda Vazirlar Mahkamasining 2019-yil 18-yanvardagi 48-son "O'zbekiston Respublikasida "Aqlli shahar" texnologiyalarini joriy etish konsepsiyasini tasdiqlash to'g'risida"gi va 2020-yil 22-dekabrda 801-son "Radiochastota spektridan foydalanish sohasida ruxsat etish hamda radioelektron vositalar va yuqori chastotali qurilmalardan foydalanishni tartibga solish to'g'risida"gi Qarorlari va mazkur faoliyatga tegishli meyoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishda ushbu dissertatsiya tadqiqoti muayyan darajada xizmat qiladi.

**Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga mosligi.** Ushbu tadqiqot ishi respublika fan va texnologiyalar rivojlanishining IV. "Axborotlashtirish va axborot-kommunikatsiya texnologiyalarini rivojlantirish" yo'nalishi doirasida bajarilgan.

**Muammoning o'rganilganlik darajasi.** Kognitiv radioaloqa tizimlarida birlamchi foydalanuvchilarga xalaqitlarni maksimal kamaytirgan, ularning ishonchligini yuqori darajada ta'minlagan holda ikkilamchi foydalanuvchilarga xizmat ko'rsatish sifatini oshirish tamoyillari, ularda qo'llanilayotgan radiochastota spektrini zondlash, boshqarish va ulashish, shu jumladan, spektrni tahlil qilish hamda holati bo'yicha qaror qabul qilish muammolarining yechimlari, kognitiv tarmoq tugunlari o'rtasida o'lgan parametrlar bo'yicha axborotlarni qabul qilish, ishlov berish va uzatish jarayonlarining tadqiqi bo'yicha ilmiy izlanishlar olib borilmoqda.

Ushbu tadqiqot yo'nalishiga Y.Ch. Liang, D. Das, J. Mitola, S. Haykin, E. Kitcher, M.H. Rehmani, A.Yu. Grebeshkov, V.V. Butenko, A.E. Kucheryayev va boshqa taniqli xorijiy olimlarning ilmiy ishlari bag'ishlangan. Shuningdek belgilangan muammoni tadqiq qilish masalalariga respublikamiz olimlari D.A. Davronbekov, U.B. Amirsaidov, Yu.V. Pisetskiy, D.N. Likonsev, V.I. Praxov, Sh.U.Pulatov, A.Sh. Shaxobiddinov, A.A. Nigmanov, X.E. Xujamatov va boshqalarning ilmiy ishlari bag'ishlangan.

Kognitiv radioaloqa tizimlarida kanal resurslarini taqsimlashning mavjud usullari, qoida tariqasida, birlamchi foydalanuvchining ishga tushirilishi aniqlanganda ishchi kanalni so'zsiz bo'shatishni ta'minlamaydi. Hozirgi vaqtgacha ikkilamchi foydalanuvchining ishlashi birlamchi foydalanuvchi zondlash momentlari orasidagi vaqt oralig'ida ishlay boshlashini hisobga olgan holda batafsil o'rganilmagan. Bunda ikkilamchi foydalanuvchi uzatish muhitiga kirishni boshqarish doirasida ma'lumotni qabul qilish va uzatish jarayonini davom ettirish uchun zudlik bilan boshqa mavjud kanalga o'tishi kerak. Olib borilgan tadqiqotlar shuni ko'rsatdiki, ko'rib chiqilayotgan sharoitlarda radiochastota kanal resurslarini taqsimlashning belgilangan muammosi, shu jumladan mavjud kanal resurslarini aniqlash usullarini takomillashtirish hisobidan ikkilamchi foydalanuvchining ruxsat

etilgan kanalga kirish va aloqa xizmatlarini ko'rsatish uchun tanlangan uzatish kanalining sifatini baholash muammolari batafsil o'rganilmagan.

**Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan oliy ta'lim muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog'liqligi.** Dissertatsiya tadqiqoti Muhammad al-Xorazmiy nomidagi Toshkent axborot texnologiyalari universiteti ilmiy tadqiqot rejasining №Uzb-Ind-2021-94 "CRN-ga asoslangan IoT-dan foydalaniladigan "Aqlli shahar" tizimlarida energiya tejamkor aloqa va ma'lumotlar oqimi" (2021-2023) xalqaro qo'shma loyihasi doirasida bajarilgan.

**Tadqiqotning maqsadi** kognitiv radioaloqa tizimida chastota spektrini samarali boshqarish usuli va modellarini ishlab chiqishdan iborat.

**Tadqiqotning vazifalari:**

kognitiv radioaloqa tizimlarining ishlash tamoyillari va spektrni zondlash usullarini tahlil qilish;

kognitiv radioaloqa tizimlarining ishlash jarayonlarini real vaqt mobaynida tadqiq qilish imkonini beruvchi model ishlab chiqish;

kognitiv radioaloqa tizimlari signallarini zondlash chegaraviy qiymatini moslashuvchan sozlashni amalga oshiruvchi model ishlab chiqish;

kognitiv radioaloqa tizimida spektr holati bo'yicha qaror qabul qilishning birlamchi aloqa tizimiga xalaqitlarni kamaytirish imkonini beruvchi usulini ishlab chiqish;

kognitiv radioaloqa tizimida radiochastota spektrini zondlash hamda spektr holati bo'yicha qaror qabul qilish aniqligini oshiruvchi model ishlab chiqish.

**Tadqiqotning obyekt**i sifatida kognitiv radioaloqa tizimida spektrni zondlash hamda spektr bo'yicha qaror qabul qilish apparat va dasturiy vositalari olingan.

**Tadqiqotning predmetini** kognitiv radioaloqa tizimida spektrni moslashuvchan zondlash va sun'iy intellekt yordamida spektr bo'yicha qaror qabul qilish jarayonlari tashkil etadi.

**Tadqiqotning usullari.** Tadqiqot jarayonida signallarni uzatish nazariyasi, imitatsion modellashtirish, mashinali o'qitish, ma'lumotlarni intellektual tahlil qilish, ko'p kriteriyali qaror qabul qilish, Bayes tarmoqlari, ssenariy tahlil va ordinal ustuvor yondashuv usullaridan foydalanilgan.

**Tadqiqotning ilmiy yangiligi** quyidagilardan iborat:

kognitiv sikl asosida radiochastota spektridan ikkilamchi foydalanish uchun radioaloqa tizimlarining kanallarni egallash va bo'shatish, spektrni egallanmagan qismlarini aniqlash, signallarga shovqin qo'shish va so'ndirish jarayonlarini real vaqt mobaynida tadqiq qilish hamda spektrni ko'p kanalli zondlash imkonini beruvchi model ishlab chiqilgan;

radiochastotadan foydalanish samaradorligini oshirish uchun noto'g'ri signal ehtimolligi va teskari Q funksiya asosida kognitiv radioaloqa tizimlari signallarini zondlash chegaraviy qiymatini moslashuvchan sozlash imkonini taqdim etuvchi model ishlab chiqilgan;

kognitiv radioaloqa tizimlarida spektr holati bo'yicha samarali qaror qabul qilish va birlamchi tarmoqqa xalaqitlarni kamaytirish imkonini beruvchi ikkita chegaraviy qiymat va mashinali o'qitishga asoslangan ikki bosqichli usul ishlab chiqilgan;

mashinali o'qitish algoritmlari asosida radiochastota spektrini zondlash hamda kanal holati bo'yicha ikkilik tasniflagichning qaror qabul qilish aniqligini oshirish imkonini beruvchi gibril model ishlab chiqilgan.

**Tadqiqotning amaliy natijalari** quyidagilardan iborat:

kognitiv radioaloqa tizimlarining ishlash jarayonini tadqiq qilish dasturi yaratilgan;

kognitiv radioaloqa tizimlarida signallarni zondlash chegaraviy qiymatini samarali aniqlash dasturi yaratilgan;

spektrni zondlash va tahlil qilish apparat-dasturiy vositasi loyihalashtirilgan hamda imitatsion modeli ishlab chiqilgan;

spektr holati bo'yicha qaror qabul qilish uchun bilimlar bazasi to'plangan va mashinali o'qitishga asoslangan dastur yaratilgan.

**Tadqiqot natijalarining ishonchliligi.** Tadqiqot natijalarining ishonchliligi kognitiv radioaloqa tizimlarida radiochastota spektri holati bo'yicha qaror qabul qilish usuli, spektrni zondlash va tahlil qilish modeli, qaror qabul qilish modeli va algoritmi ishlab chiqilganligi hamda olingan tadqiqotlar natijalari umumqabul qilingan mezonlar asosida qiyosiy solishtirish orqali izohlangan.

**Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati.** Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati kognitiv sikl asosida radioaloqa tizimlarining ishlash jarayonini real vaqt mobaynida tadqiq qilish va signallarini zondlash chegaraviy qiymatini moslashuvchan sozlashni amalga oshiruvchi modellari, ikkita chegaraviy qiymat va mashinali o'qitish asosida spektr holati bo'yicha qaror qabul qilishning birlamchi aloqa tizimiga xalaqitlarni kamaytirish imkonini beruvchi usuli, mashinali o'qitish asosida radiochastota spektrini zondlash hamda spektr holati bo'yicha qaror qabul qilish aniqligini oshiruvchi modeli ishlab chiqilganligi bilan baholanadi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati kognitiv radioaloqa tizimlari ishlash jarayonini tadqiq qilish va signallarni zondlash chegaraviy qiymatini aniqlash dasturlari yaratilganligi, spektrni zondlash va tahlil qilish apparat-dasturiy vositasi loyihalashtirilganligi va imitatsion modeli ishlab chiqilganligi, spektr bo'yicha qaror qabul qilish uchun bilimlar bazasi to'planganligi va mashinali o'qitishga asoslangan dastur ishlab chiqilganligi bilan izohlanadi.

**Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi.** Kognitiv radioaloqa tizimlarida chastota spektrini samarali boshqarish usuli va modellari bo'yicha olingan natijalar asosida:

mashinali o'qitish algoritmlari asosida radiochastota spektrini zondlash hamda kanal holati bo'yicha ikkilik tasniflagichning qaror qabul qilish aniqligini oshirish imkonini beruvchi gibril model O'zbekiston Respublikasi Raqamli texnologiyalar vazirligi tasarrufidagi korxonalarda, xususan, Elektromagnit moslashuv markazi DUKga joriy etilgan (Raqamli texnologiyalar vazirligining 2023-yil 20-iyuldagi 34-8/4933-son ma'lumotnomasi). Ilmiy tadqiqot natijasida ajratilgan radiochastota polosalarida litsenziyalanmagan foydalanuvchi qurilmalarini aniqlash samaradorligini 10-15 % gacha oshirish, simsiz aloqa xizmatlariga taqsimlangan polosalardagi radiochastotalarning o'zlashtirilishini baholash aniqligini 0,9995 gacha oshirish imkoni yaratilgan;

kognitiv radioaloqa tizimlarida spektr holati bo'yicha samarali qaror qabul qilish va birlamchi tarmoqqa xalaqitlarni kamaytirish imkonini beruvchi ikkita chegaraviy qiymat va mashinali o'qitishga asoslangan ikki bosqichli usul "UNICON.UZ" DUKga joriy etilgan (Raqamli texnologiyalar vazirligining 2023-yil 20-iyuldagi 34-8/4933-son ma'lumotnomasi). Ilmiy tadqiqot natijasida aloqa xizmatlariga taqsimlangan polosalardagi radiochastota spektridan foydalanishni tahlil qilish, radiospektrning bandligi, hamda alohida tarmoq va radiostansiyalar to'g'risida ma'lumotlarni yig'ish holatini yaxshilash, simsiz aloqa xizmatlariga taqsimlangan polosalardagi radiochastotalarning o'zlashtirishini baholash aniqligini 0,9995 gacha oshirish imkoni yaratilgan;

kognitiv sikl asosida radiochastota spektridan ikkilamchi foydalanish uchun radioaloqa tizimlarining kanallarni egallash va bo'shatish, spektrni egallanmagan qismlarini aniqlash, signallarga shovqin qo'shish va so'ndirish jarayonlarini real vaqt mobaynida tadqiq qilish hamda spektrni ko'p kanalli zondlash imkonini beruvchi model hamda radiochastotadan foydalanish samaradorligini oshirish uchun noto'g'ri signal ehtimolligi va teskari Q funksiya asosida kognitiv radioaloqa tizimlari signallarini zondlash chegaraviy qiymatini moslashuvchan sozlash imkonini taqdim etuvchi model "ONIX GROUP" MChJga joriy etilgan (Raqamli texnologiyalar vazirligining 2023-yil 20-iyuldagi 34-8/4933-son ma'lumotnomasi). Natijada videokameralar va sensorlar tomonidan yig'ilgan ma'lumotlar oqimlari simsiz tarmoq orqali litsenziyalangan radiochastota polosalarining asosiy foydalanuvchilar tomonidan egallanmagan qismlari orqali almashishga hamda modellarni Aqlli uy tizimining aloqa sathida joriy qilish orqali radiochastota spektridan foydalanish samaradorligini 5-8 % gacha oshirishga erishilgan.

**Tadqiqot natijalarining aprobatyasi.** Tadqiqot natijalari 13 ta xalqaro, 5 ta respublika ilmiy-amaliy konferensiyalar hamda ilmiy seminarlarda muhokama qilingan.

**Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi.** Tadqiqot mavzusi bo'yicha jami 38 ta ilmiy ishlar, ulardan 16 ta maqolalar O'zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasi tavsiya etgan jurnallarda, shu jumladan 13 ta xorijiy, 3 ta respublika miqyosidagi jurnallarda chop etilgan, hamda 4 ta EHM uchun yaratilgan dasturiy vositalarni qayd qilish guvohnomalari olingan.

**Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi.** Dissertatsiya ishi kirish, uchta bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati va ilovalardan iborat. Dissertatsiyaning umumiy hajmi 120 betni tashkil etadi.

## DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

**Kirish** qismida dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati asoslab berilgan, tadqiqotning O'zbekiston Respublikasi fan va texnologiyalari taraqqiyotining ustuvor yo'nalishlariga mosligi ko'rsatilgan, tadqiqotning maqsad va vazifalari belgilab olingan, tadqiqot obyekti va predmeti aniqlangan, natijalarning ishonchliligi asoslangan hamda ularning nazariy va amaliy ahamiyati ochib berilgan, tadqiqot natijalarini amalga joriy qilish holati, nashr etilgan ishlar hamda dissertatsiyaning tuzilishi bo'yicha ma'lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiyaning **“Kognitiv radioaloqa tizimlarining ishlash tamoyillari va spektrni zondlash usullarining tahlili”** deb nomlangan birinchi bobida dinamik spektrga kirish usullari va kognitiv radioaloqa tizimlari (KRAT)ning ishlash tamoyillari, asosiy funksiyalari va spektrni boshqarish hamda zondlash usullari tahlil qilingan, shuningdek, masalaning qo‘yilishi bayon qilingan.

Hozirgi vaqtda radiochastota spektri (RChS)ning ba’zi diapazonlaridan haddan tashqari ko‘p foydalanilib, shuningdek, ba’zi diapazonlarda spektrning katta qismi ishlatilmayotganligi sababli spektrni tayinlashning an’anaviy siyosati samarasiz bo‘lib qolmoqda hamda spektrdan foydalanishga bo‘lgan yangi talablarga javob bera olmayapti. Bu muammoni ilg‘or modulyatsiya va kodlash usullari, ko‘p antennali usullar, ulanishlarni moslashtirish hamda boshqa yangi texnologiyalar yordamida to‘liq yechib bo‘lmaydi. Chunki, ushbu texnologiyalar yordamida radiokanal sig‘imini faqat ma’lum bir chegaragacha oshirish imkonini beradi. Ushbu muammoni samarali hal qilish uchun spektrga dinamik kirish texnologiyalarini, xususan kognitiv radioaloqa tizimlari va tarmoqlarini amaliyotga joriy qilish zarur. Kognitiv radioaloqa tarmoq konsepsiyasi birlamchi foydalanuvchilar tomonidan joriy vaqtda ishlatilmayotgan RChSning bo‘sh joylarini ikkilamchi foydalanuvchilar aloqasi uchun ishlatishga asoslanganligi sababli, ushbu turdagi tarmoqqa quyidagi asosiy ikkita talab qo‘yiladi: 1) birlamchi foydalanuvchilarning ishlashiga xalaqit qilmaslik va 2) ikkilamchi foydalanuvchi uchun xizmat ko‘rsatish sifatini ta’minlash. Buning uchun KRAT an’anaviy simsiz aloqa tizimiga nisbatan spektrni zondlash, spektrni boshqarish, spektrni ulashish va spektrdan foydalanish mobilligini ta’minlash kabi qo‘shimcha funksiyalarni samarali bajara olishi talab etiladi.

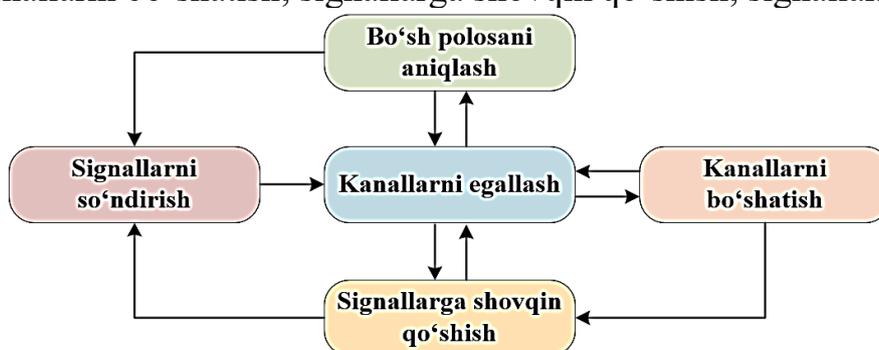
Kognitiv radioaloqa tizimlarida ikkilamchi foydalanuvchilar birlamchi foydalanuvchilarga xalaqit bermasligi uchun, ularning mavjudligini ishonchli tarzda aniqlash murakkab vazifa hisoblanadi. Bu spektrni zondlash yordamida amalga oshiriladi. Spektrni zondlashda eng keng qo‘llaniladigan usullar – energiyani aniqlash, siklostatsionar xususiyat, moslashtirilgan filtrlash va kovariatsiya matritsasiga asoslangan aniqlash usullari hisoblanadi. Ular orasida, amalga oshirish osonligi va kam xarajat talab qilishi, hamda birlamchi signal haqida oldindan ma’lumotni talab qilmasligi sababli energiyani aniqlash usullari ekspluatatsiyada keng qo‘llaniladi. Kognitiv radio tarmoqlarida RChS resurslaridan samarali foydalanishni ta’minlashda energiya detektorini asosida spektrni hamkorlikda aniqlash muhim rol o‘ynaydi. Hamkorlikda zondlash usullarining har xil model va algoritmlari taklif qilingan bo‘lib, ularning ishlashi asosan – signalni to‘g‘ri aniqlash ehtimolligi, noto‘g‘ri signal ehtimolligi, energiya samaradorligi hamda o‘tkazish qobiliyati kabi ko‘rsatkichlar yordamida baholanadi. Bunda, energiyani aniqlashning ikki chegaraviy qiymatni o‘rnatish hamda energetik qiymatlarni baholashda mashinali o‘qitishni qo‘llashga asoslangan gibril usul va modellari yuqori samara berishi mumkin.

Spektr holati bo‘yicha qaror qabul qilishda, spektrni zondlash yordamida olingan test statistikasi ikkita sinfdan biriga mansub bo‘ladi: 1) signal mavjud emas ya’ni  $H_0$  sinfi va 2) signal mavjud ya’ni  $H_1$  sinfi. Ideal holatda tasniflagichda agar faqat shovqin signali kuzatilgan bo‘lsa  $H_0$  sinfini, shovqin signali bilan birga

foydalanuvchi signali kuzatilgan bo'lsa H1 sinfni ko'rsatishi kerak. Buning uchun olingan test statistikasi chegaraviy qiymat bilan taqqoslanadi va qaror qabul qilinadi. Bunda, yoquri aniqlikda qaror qabul qilish uchun signalni to'g'ri aniqlash ehtimolligini oshirgan holda, noto'g'ri signal ehtimolligini kamaytirish talab qilinadi.

Dissertatsiyaning **“Kognitiv radioaloqa tizimida spektrni zondlash jarayonlarini tadqiq qilish”** deb nomlangan ikkinchi bobi KRATda spektrni zondlashning signal energiyasini aniqlashga asoslangan usullari, jumladan, bitta chegaraviy qiymatli, moslashuvchan chegaraviy qiymatli va ikkita chegaraviy qiymatli usullarini tadqiq qilishga bag'ishlangan.

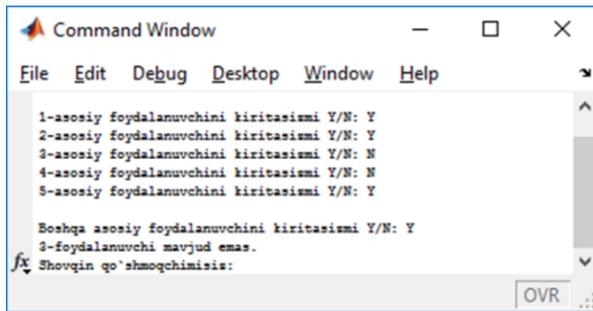
KRATning ishlash jarayonini tadqiq qilish uchun tizimning zaruriy xususiyatlarini o'zida aks ettirgan model talab qilinadi. Tadqiqot doirasida KRATni eksperimental tadqiq qilish uchun soddalashtirilgan model ishlab chiqilgan (1-rasm). Ushbu model bo'yicha kognitiv radio tizimning ishlash jarayoni shartli ravishda quyidagi qismlarga ajratilgan: kanallarni egallash; spektr tuynuklarini aniqlash; kanallarni bo'shatish; signallarga shovqin qo'shish; signallarni so'ndirish.



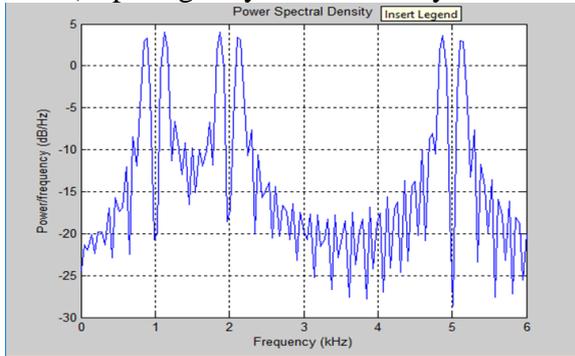
**1-rasm. Kognitiv radioaloqa tizimini tadqiq qilish modelining blok diagrammasi**

Kognitiv radio bilan bog'liq eksperimental simulyatsiya usullari juda kam amalga oshirilgan, shuning uchun ushbu tadqiqot doirasida model konfiguratsiyasining soddaligi, simulyatsiya natijalarini vizuallashtirish va umumlashtirishning osonligi, hamda eng asosiysi, spektrni boshqarish hamda tahlil qilishda ma'lumotlarni sintez qilish va signalni qayta ishlashning bir nechta modullarini o'z ichiga olganligi uchun Matlab modellashtirish muhiti yordamida amalga oshirilgan (2-rasm). Ushbu modelda KRATi turli xil chastotali kanalga ega va har bir foydalanuvchiga ma'lum chastota diapazoni tayinlangan. Dasturni ishga tushirganimizdan so'ng, u foydalanuvchi qo'shishni va unga o'sish tartibida ma'lum bir chastota polosasini belgilashni so'raydi hamda ushbu modelni boshqarish "Buyruqlar oynasi" yordamida amalga oshiriladi.

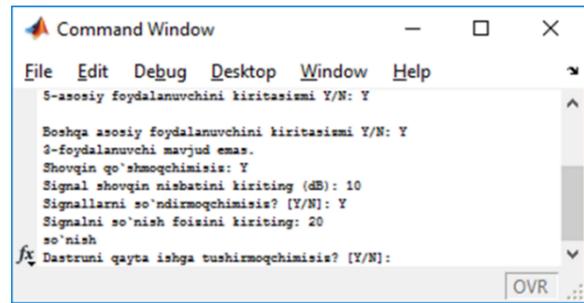
Simulyatsiya natijasida chastota spektriga asosiy foydalanuvchilarni tayinlash; spektr bo'sh polosalariga ikkilamchi foydalanuvchi tayinlash; foydalanuvchi signallariga shovqin qo'shish; foydalanuvchi signallarini so'ndirish; va kanalni bo'shatish holatlarini o'rganish hamda ushbu jarayonlarni tasvirlovchi quvvat-spektral zichlik grafiklarini olish mumkin.



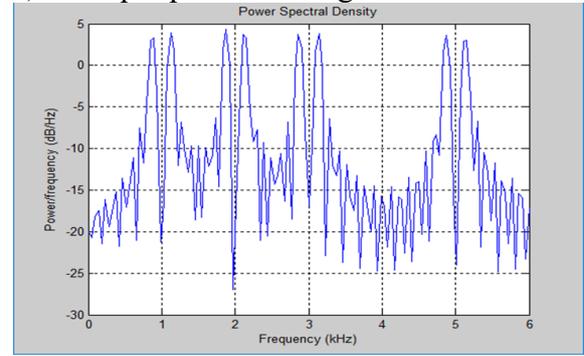
a) Spektrga foydalanuvchi tayinlash



c) Quvvat spektral zichligi egri chizig'i



b) Shovqin qo'shish va signallarni so'ndirish



d) Spektrga yangi foydalanuvchi qo'shilishi

## 2-rasm. KRATni tadqiq qilish modelining buyruqlar oynasi va natijalari

KRATda birlamchi foydalanuvchini aniqlash uchun foydalaniladigan usullardan biri bu bitta chegaraviy qiymatli energiyani aniqlash usulidir. Energiyani aniqlash algoritmi ma'lum bir vaqt ichida signal energiyasini hisoblash va asosiy foydalanuvchining mavjudligi to'g'risida qaror qabul qilish uchun uni oldindan belgilangan chegaraviy qiymat bilan solishtirishni anglatadi. Energiyani aniqlashning birinchi bosqichi asosiy foydalanuvchining qabul qilingan quvvati  $y(t)$  ni baholashdir. Qabul qilingan signalning quvvatini hisoblash uchun polosa kengligi  $w$  bo'lgan polosa filtrining chiqishi diskretlanadi va  $T$  oralig'ida integrallanadi. Shuningdek, natijani aniqlash uchun integral qiymat  $\lambda$  chegaraviy qiymat bilan taqqoslanadi, bu esa o'z navbatida energiyani aniqlash usuli uchun muhim asosiy parametr hisoblanadi. Bu noto'g'ri signal yoki to'g'ri aniqlash ehtimolligi kabi maqsadli ishlash ko'rsatkichi bilan aniqlanishi mumkin. Energiyani aniqlash uchun yagona chegaraviy qiymat usuli (1) ifoda orqali keltirilgan.

$$y(n) = \begin{cases} w(n) \rightarrow H_0 \\ s(n) + w(n) \rightarrow H_1 \end{cases} \quad (1)$$

bu yerda:  $y(n)$  – kognitiv radioda qabul qilingan signalning  $n$ -namunasi;  $w(n)$  – nolga teng o'rtacha qiymat va variatsiyasi  $\sigma_w^2$  ga teng oq Gauss shovqinini;  $s(n)$  – asosiy foydalanuvchi tomonidan uzatilgan nolga teng o'rtacha qiymat va variatsiyasi  $\sigma_s^2$  ga teng signal;  $H_0$  – egallanmagan spektr;  $H_1$  – egallangan spektr.

Shuningdek, signal shovqin nisbati  $\gamma = \sigma_s^2 / \sigma_w^2$  formula orqali ifodalanadi. Agar, kognitiv radioda bitta chegaraviy qiymatli energiya detektorini qo'llansa, test statistikasi (signal energiyasi) quyidagicha ifodalanadi:

$$T_E(y) = \frac{1}{M} \sum_{N=1}^M |y(n)|^2 \quad (2)$$

bu yerda:  $M$  – namunalar soni.  $M$  ning katta qiymatlari uchun ( $M > 10$ ) test statistikasi  $T_E(y)$  Markaziy limit nazariyasi bo'yicha Gauss taqsimotiga taxminan mos keluvchi

ikkita gipotezaga bo‘ysinadi va u quyidagicha ifodalanadi:

$$T_E(y) : \begin{cases} N\left(\sigma_w^2, \frac{2}{M}\sigma_w^4\right) & H_0 \\ N\left((1+\gamma)\sigma_w^2, \frac{2}{M}(1+2\gamma)\sigma_w^4\right) & H_1 \end{cases} \quad (3)$$

Berilgan chegaraviy qiymat  $\lambda$  uchun, agar  $T_E(y) \geq \lambda$  bo‘lganda, birlamchi foydalanuvchi mavjud emas, aks holda birlamchi foydalanuvchi mavjud deb baholanadi. Noto‘g‘ri signal  $P_{fa}$  va to‘g‘ri aniqlash  $P_d$  ehtimolliklari quyidagi ifodalar orqali hisoblanishi mumkin:

$$P_f = P_r(T_E(y) > \lambda | H_0) = Q\left(\left(\frac{\lambda}{\sigma_w^2} - 1\right)\sqrt{\frac{M}{2}}\right) \quad (4)$$

$$P_d = P_r(T_E(y) > \lambda | H_1) = Q\left(\left(\frac{\lambda}{\sigma_w^2} - \gamma - 1\right)\sqrt{\frac{M}{2(2\gamma+1)}}\right) \quad (5)$$

bu yerda:  $Q(x)$  – o‘zgaruvchan standart Gauss tasodifiysining qo‘shimcha kumulativ taqsimot funksiyasi.

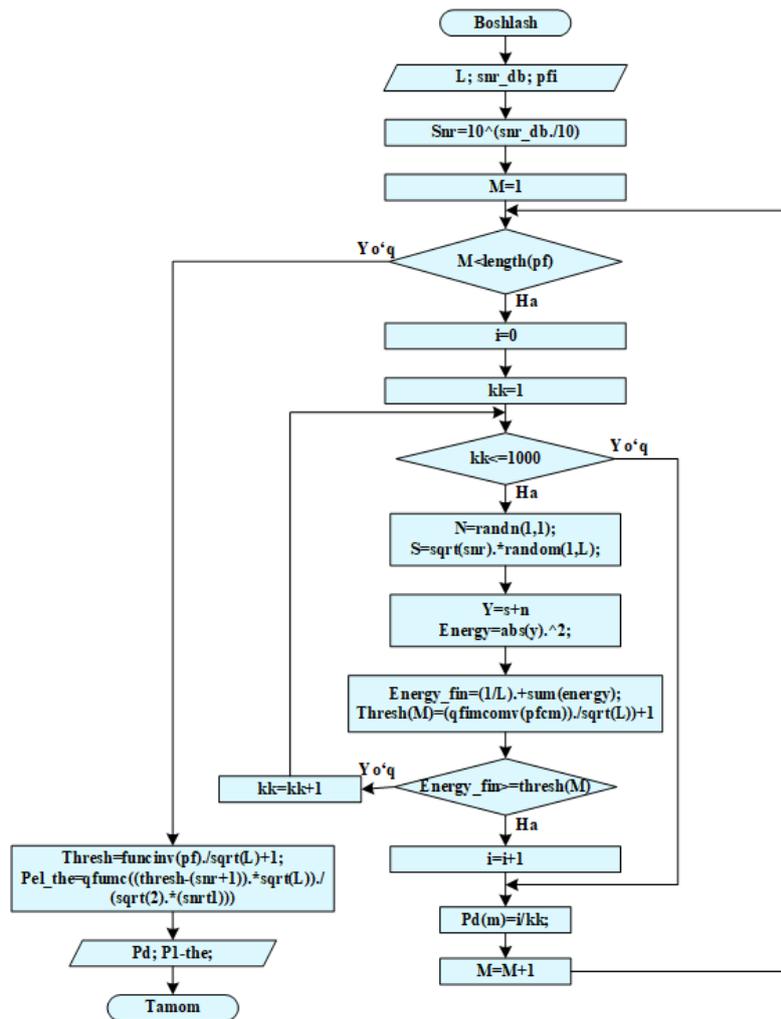
(4) tenglamadan chegaraviy qiymat  $\lambda$  quyidagicha hisoblanishi mumkin:

$$\lambda = Q^{-1}(P_f)\sqrt{2M}\sigma_w^2 + M\sigma_w^2 \quad (6)$$

KRATda spektrni zondlashda energiyani aniqlash usulini tadqiq qilish modeli Matlab modellashtirish muhitida tuzilgan. Ushbu model, energiyani aniqlash chegaraviy qiymatini noto‘g‘ri signal ehtimolligiga bog‘liq baholash imkoniyatini beradi. Ushbu modelni quyidagi asosiy to‘rtta qadam bilan amalga oshiriladi: 1) asosiy foydalanuvchi mavjud emas deb hisoblanadi. Bunda tasodifiy funksiya yordamida shovqin generatsiya qilinadi hamda qabul qilingan signal faqat shovqindan iborat bo‘ladi; 2) agar faqat shovqinning energiyasi chegaraviy qiymatdan yuqori bo‘lsa, u noto‘g‘ri signalga mos keladi; 3) ushbu stsenariy  $N$  ta iteratsiyalar uchun ishga tushiriladi; 4) chegaraviy qiymatning noto‘g‘ri signal ehtimolligiga bog‘liq tavsifi olinadi hamda chegaraviy qiymat baholanadi.

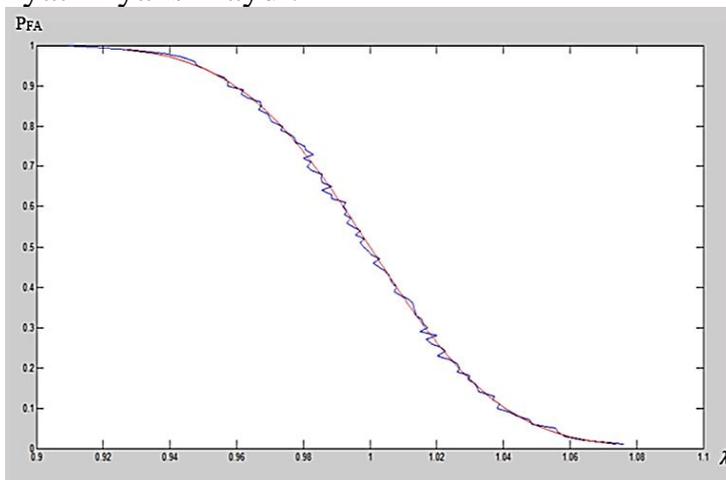
Ushbu modelni amalga oshirish algoritmi (3-rasm) va modelni Matlab modellashtirish muhiti yordamida amalga oshirish natijasida olingan energiyani noto‘g‘ri aniqlash ehtimolligining chegaraviy qiymatga bog‘liqlik tavsifi (4-rasm) keltirilgan. Ushbu xarakteristikadan shuni ko‘rish mumkinki, foydali signalni to‘g‘ri aniqlash ehtimolligini oshirish maqsadida chegaraviy qiymatni kamaytirish noto‘g‘ri signal ehtimolligini oshib ketishiga olib keladi. Shuningdek, analitik ifoda va simulyatsiya yordamida olingan natijalar bir-biriga yaqin qiymatlarga egaligi tuzilgan model yordamida amalga oshirilgan simulyatsiyani adekvatligini isbotlaydi.

Bitta chegaraviy qiymatli energiyani aniqlash usuli shovqinbardoshlikning pastligi, zaif signallarni aniqlay olmasligi, moslashish qobiliyatining yo‘qligi va uzluksiz uzatishni aniqlashdagi kamchiliklari sababli kognitiv radio tarmoqlarida foydalanish uchun cheklaydi. Shu sababli, KRAT energiya detektori uchun moslashuvchan chegaraviy qiymatli algoritmlar taklif qilingan bo‘lib, unda chegaraviy qiymat kanalidagi shovqin darajasiga qarab sozlanadi. Chegaraviy qiymat ma’lum bir vaqt intervalida hisoblangan shovqin quvvatiga qarab yangilanadi.



**3-rasm. Energiyani aniqlash chegaraviy qiymatini topish bo'yicha eksperimental modelni amalga oshirish algoritmi**

Ushbu algoritm past signal shovqin nisbatli muhitlarda belgilangan bitta chegaraviy qiymatli energiya detektoriga qaraganda yaxshiroq ishlaydi, lekin u ko'proq hisoblash resurslarini talab qiladi. Moslashuvchan chegaraviy qiymatli algoritmlarni qo'llash energiya detektorining ishonchliligini oshiradi va shu bilan uning noto'g'ri aniqlash ehtimolligi hamda noto'g'ri signal ehtimolligi nuqtai nazaridan ish faoliyatini yaxshilaydi.



**4-rasm. Energiyani aniqlash chegaraviy qiymati (nazariy va eksperimental)**

KRATda aloqa trafiginini kamaytirish maqsadida energiyani aniqlash uchun ikkita chegaraviy qiymatli zondlash usuli taklif qilingan. Bunda, agar  $X > \lambda_2$  dan ortiq bo'lsa  $H_1$  gipoteza,  $\lambda_1$  dan kam bo'lsa  $H_0$  gipoteza to'g'ri, hamda kuzatilgan energiya ikkita chegaraviy qiymat o'rtasida (noaniq hudud) joylashgan bo'lsa, ya'ni  $\lambda_1 < X < \lambda_2$ , hech qanday qaror qabul qilinmaydi va kognitiv radio yana zondlash fazasiga qaytadi.

(6) ifoda orqali  $\lambda_1$  va  $\lambda_2$  chegaraviy qiymatlari quyidagicha aniqlanadi:

$$\lambda_1 = (1 - \rho)\lambda \quad (7)$$

$$\lambda_2 = (1 + \rho)\lambda \quad (8)$$

bu yerda:  $\rho$  – noaniqlik parametridir.

Ikkita chegaraviy qiymatli energiyani aniqlash orqali zondlash usulida qabul qilingan signal chegaraviy qiymatlar bilan taqqoslangandan so'ng qaror qabul qilishning imkoni bo'lmasa, ya'ni signal noaniq hududda joylashgan bo'lsa, kognitiv qurilma ma'lum bir vaqt intervalidan keyin ushbu chastota kanalini zondlashni qayta amalga oshiradi. Shuningdek, kooperativ qaror qabul qilishga asoslangan ikkita chegaraviy qiymatdan foydalanadigan zondlash usuli ham taklif qilingan. Yuqoridagilardan farqli ravishda, ushbu usul KRATning aniqlash qobiliyatini yaxshilash uchun qo'llaniladi. Bunda energiya detektori ikkita chegaraviy qiymatga ega bo'ladi. Har bir ikkilamchi foydalanuvchi spektrni alohida zondlash uchun energiyani aniqlashni amalga oshiradi. Shundan so'ng lokal qarorlar qabul qilinadi, farqli jihati, agar signal energiyasining kuzatuv qiymatlari noaniq hududda joylashgan bo'lsa birlashtirish markaziga ushbu qiymatlar uzatiladi hamda birlashtirish markazi ma'lum bir algoritmlar asosida asosiy foydalanuvchi mavjud yoki yo'qligi haqida yakuniy qaror qabul qiladi.

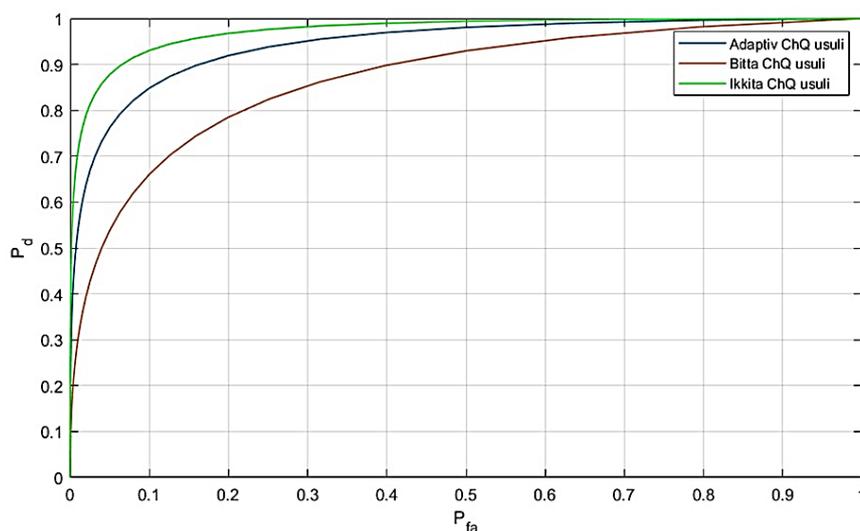
Ikkilamchi tugunlardan birining ishlamay qolishi va signalning so'nish muammolarini bartaraf etish uchun ushbu usul yaxshi samara berishi isbotlangan. Har bir ikkilamchi foydalanuvchi o'zining lokal qarorini birlashtirish markaziga yuboradi. Keyin har bir qaror natijasi ma'lum birlashtirish qoidalari, ya'ni yumshoq, qattiq, gibril va boshqa qoidalar ostida birlashtiriladi. Ikkita chegaraviy qiymatli energiya detektoriga asoslangan YOKI birlashtirish qoidasi bo'yicha kooperativ zondlash usuli uchun to'g'ri aniqlanish ehtimolligi ( $P_d$ ) va noto'g'ri signal ehtimolligi ( $P_f$ ) quyidagicha ifodalanadi:

$$P_d = 1 - \prod_{i=1}^K (1 - P_{di}) \quad (9)$$

$$P_f = 1 - \prod_{i=1}^K (1 - P_{fi}) \quad (10)$$

bu yerda:  $P_{di}$  va  $P_{fi}$  – mos ravishda  $i$ -chi ikkilamchi foydalanuvchining to'g'ri aniqlash ehtimolligi va noto'g'ri signal ehtimolligi;  $K$  – spektrni kooperativ zondlashda ishtirok etuvchi kognitiv foydalanuvchilar soni.

Yuqoridagi usullarning qiyosiy samaradorligini to'g'ri aniqlash ehtimolligi ( $P_d$ ) va noto'g'ri signal ehtimolligi ( $P_{fa}$ ) bo'yicha baholangan. Bunda baholash natijasi Matlab modellash muhitida qabul qilgichning ishchi xarakteristikasi egri chizig'i yordamida tasvirlangan (5-rasm).



**5-rasm. Radiochastota spektrini zondlashning energiya detektoriga asoslangan usullarini qiyosiy baholash grafigi**

Natijalar shuni ko'rsatdiki, moslashuvchan chegaraviy qiymatli va ikkita chegaraviy qiymatli energiya detektorlari signal shovqin nisbati past bo'lgan muhitlarda belgilangan bitta chegaraviy qiymatli energiya detektoriga nisbatan mos ravishda 8 va 11% gacha yaxshiroq ishlaydi.

Dissertatsiyaning **“Kognitiv radioaloqa tizimida spektr holati bo'yicha qaror qabul qilish usuli va modellari”** deb nomlangan uchinchi bobi kognitiv radioaloqa tizimida chastota spektrini samarali boshqarish bo'yicha ishlab chiqilgan usul va modellarni bayon qilishga, jumladan, kognitiv radioaloqa tizimida spektr holati bo'yicha qaror qabul qilishning ikkita chegaraviy qiymatli va mashinali o'qitishga asoslangan samarador usuli, spektrni zondlash, spektr holati bo'yicha qaror qabul qilish modellariga bag'ishlangan.

Kognitiv radio tarmoqda spektr holati bo'yicha qaror qabul qilishning ikkita chegaraviy qiymatli va mashinali o'qitishga asoslangan usuli kognitiv tarmoqda  $N$  kognitiv foydalanuvchi borligini nazarda tutib, bunda  $N$  musbat butun sonidir. Har bir kognitiv foydalanuvchi ikkita chegaraviy qiymatni o'rnatadi. Birinchidan, barcha kognitiv foydalanuvchilar energiyani lokal zondlashni amalga oshiradilar, ular orasida  $K$  foydalanuvchilar lokal qarorlar qabul qilishlari mumkin, qolgan  $N-K$  foydalanuvchilari esa ikkita chegaraviy qiymat oralig'idagi energiya qiymatlarini o'lchaydilar.

Keyin  $K$  kognitiv foydalanuvchilari orasidan aloqa o'rnatishga davogarlik qilayotgan ikkilamchi foydalanuvchilar lokal qaror natijalarini global qaror sifatida qabul qiladi. Lokal qaror qabul qilmagan  $N-K$  kognitiv foydalanuvchilar orasidagi aloqa o'rnatishga davogarlik qilayotgan ikkilamchi foydalanuvchilar esa global qaror qabul qilish markazidan qaror natijasini kutadi. Buning uchun, barcha kognitiv foydalanuvchilar zondlangan energiya qiymatlarini global qaror qabul qilish markaziga uzatishadi. U yerda qabul qilib olingan energetik qiymatlar klassifikatsiya masalasini yechishga mo'ljallangan olidindan o'qitilgan Mashinali o'qitish moduliga yo'naltiriladi. Ushbu usul qaror qabul qilish vaqtini qisqartiradi va aniqlash samaradorligini oshiradi. Yo'qorida ta'riflangan ikkita chegaraviy qiymatli kooperativ spektrni zondlash usuli, quyidagi bosqichlarni o'z ichiga oladi:

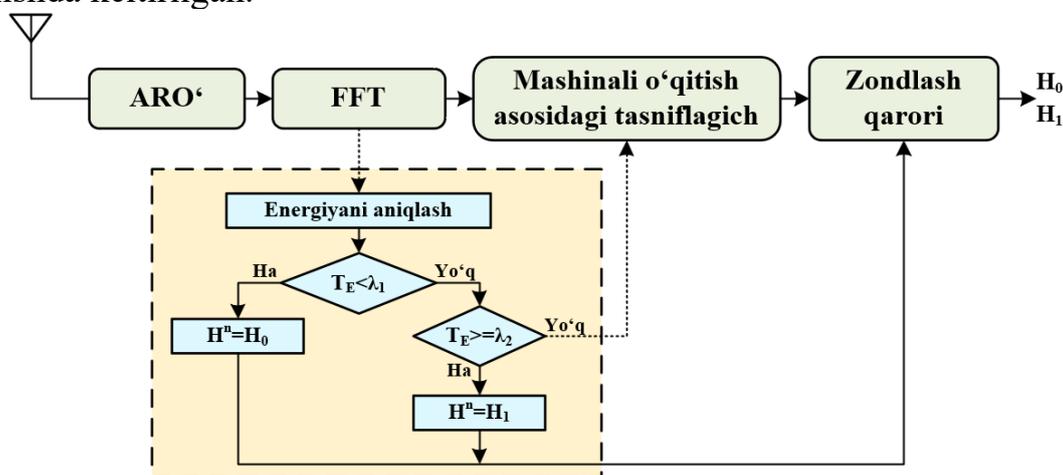
1-bosqich: N ta kognitiv foydalanuvchi kognitiv tarmoqda teng taqsimlangan. Atrof-muhitning signal-shovqin nisbati bir xil, tarmoqdagi turli kognitiv foydalanuvchilar joriy spektrning energiya qiymatini olish uchun joriy spektr muhitining vakolatli foydalanuvchilari tomonidan energiyani zondlashni amalga oshiradi;

2-bosqich: Lokal sezib olingan qiymatni 0 yoki 1 deb baholash uchun ikkita chegaraviy qiymat oʻrnatiladi. Har bir kognitiv foydalanuvchi 1-bosqichda olingan energiya qiymatiga va ikkita chegaraviy qiymatga qarab lokal qaror qabul qiladi. Agar energiya qiymati chegaraviy qiymatlarning orasida boʻlsa, kognitiv foydalanuvchi lokal qaror chiqarmaydi. Agar energiya qiymati chegaraviy qiymatlardan tashqarida boʻlsa, ikkilamchi foydalanuvchi lokal qaror natijasini oladi va uni global qaror sifatida foydalanadi;

3-bosqich: Barcha kognitiv foydalanuvchilar qaror qabul qilish markaziga energetik qiymatlarni uzatadilar, ular orasidan faqat lokal qaror qabul qila olmagan va aloqa oʻrnatishga davogarlik qilayotganlari javobni, yaʼni global qaror natijasini talab qiladi;

4-bosqich: Qaror qabul qilish markazi oldindan oʻqitilgan mashinali oʻqitish moduliga yangi energetik qiymatlarni kiritadi. U yerda klassifikatsiya masalasini yechishga moʻljallangan mashinali oʻqitish algoritmi yordamida global qaror qabul qilinadi.

Taklif qilingan usulning asosiy maqsadi, spektrdan samaraliroq foydalanishga erishish uchun spektrning foydalanilmayotgan qismini yuqori darajada aniqlashdir. Bunda, spektrni zondlash jarayonini amalga oshirish bosqichlari 6-rasmda sxematik koʻrinishda keltirilgan.



**6-rasm. Spektrni zondlash usulini amalga oshirish blok sxemasi**

Spektrni zondlash usulini amalga oshirish jarayonida birinchidan, SDR (Software Defined Radio) tomonidan qabul qilingan signal analog-raqamli oʻzgartirgich (AROʻ) orqali raqamlashtiriladi, soʻngra polosa filtridan oʻtadi. Keyin filtrlangan signal tezkor Fure oʻzgartirgich (FFT) bloki orqali chastota domeniga aylanadi hamda mashinali oʻqitishga asoslangan tasniflagichdan signal mavjudligini (H1) yoki yoʻqligini (H0) hal qilish uchun foydalaniladi.

Qabul qilingan birlamchi foydalanuvchi yoki shovqin signallarini tasniflash uchun bir nechta tasniflagichlarning ishlashi taqqoslanib, ular orasida quyidagi uchta

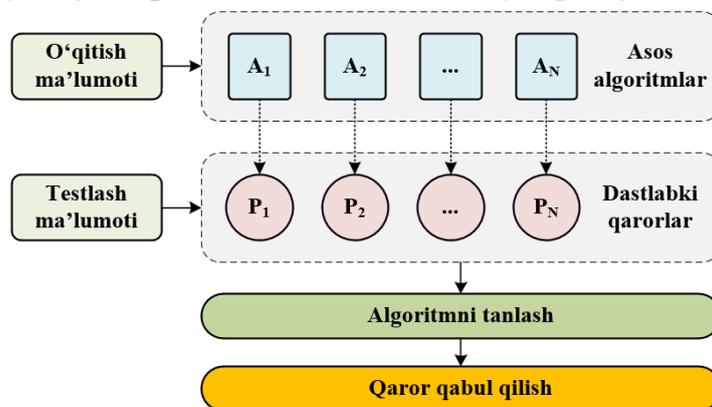
algoritm bo'yicha tadqiqot olib borilgan: Random Forest (RF), Support Vector Machines (SVM), K-Nearest Neighbor (k-NN). O'qituvchili o'qitish usullari odatda ikkita asosiy bosqichdan iborat: o'qitish va tasniflash. Spektrni aniqlashni amalga oshirishda foydalanilgan ma'lumotlar bazasi HackRF One va GNURadio apparat-dasturiy vositasi yordamida qurilgan model hamda 2.4 GHz chastotali 802.11ax standartidagi tarmoq qurilmalari tomonidan yaratilgan. Ma'lumotlar to'plamidan o'qitish va testlash bosqichida qanday foydalanilganligi 1-jadvalda ko'rsatilgan.

1-jadval

O'qitish va testlash bosqichlarida foydalanilgan ma'lumotlar to'plami parametrlari

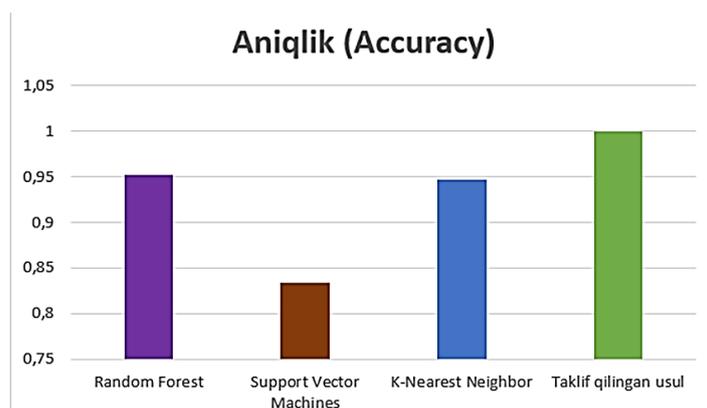
Signal	O'qitish fazasi	Testlash fazasi
Asosiy	10 000	1 000
Shovqin	10 000	1 000

Ma'lumotlar to'plami uzatuvchi va qabul qiluvchi o'rtasidagi bir necha masofalar uchun yaratilgan, birlamchi foydalanuvchiga yaqin bo'lgan ikkilamchi foydalanuvchilar ulardan uzoqda joylashganlariga qaraganda foydalanuvchi mavjudligini ishonchliroq aniqlashlari mumkin. Bundan tashqari, bir-biriga yaqin bo'lgan ikkilamchi foydalanuvchilar bir xil zondlash natijalarini bildirishi mumkin. Spektr ma'lumotlarini tasniflash Python dasturlash tili yordamida RF, SVM, k-NN tasniflagichlarini hisobga olgan holda amalga oshirilgan. RTL-SDR tomonidan olingan N signal ma'lumotlarini o'z ichiga olgan chastota xususiyat vektorlari kirish sifatida olinib, quyidagi o'qitish arxitekturasi tavsiya qilingan (7-rasm).



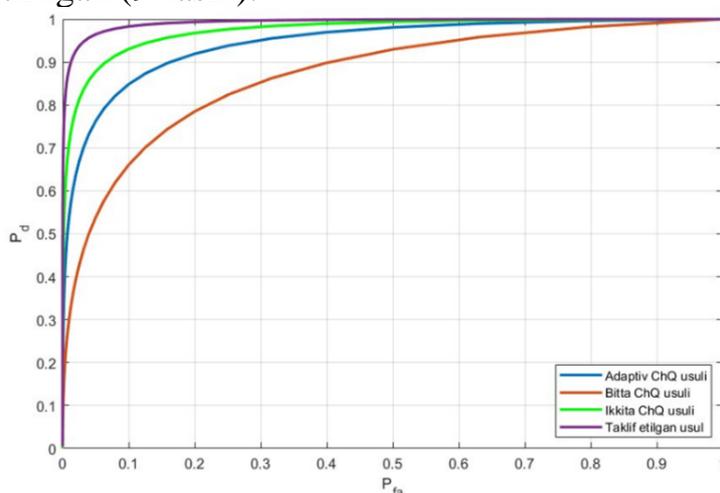
**7-rasm. Mashinali o'qitish modeli uchun arxitektura**

Ushbu arxitektura, asos modellar deb nomlangan ikki yoki undan ortiq asosiy modellarni o'z ichiga olgan. Asos algoritmlar yordamida turli tasniflash modellari o'qitiladi. Keyin, har bir model testlangandan so'ng, real vaqtda qabul qilingan signal asosida qaror qabul qilish uchun aniqlik ko'rsatkichi eng yuqori bo'lgan algoritm tanlab olinadi. Radiokanal uchun kognitiv radio qurilmalarida hisoblangan chastota vektori xususiyat vektori sifatida ko'rib chiqilgan va kanal mavjud yoki yo'qligini aniqlash uchun tasniflagichga kiritilgan. Tasniflagich har bir xususiyat vektorini ikkita sinfdan biriga, ya'ni "kanal mavjud sinf" va "kanal mavjud bo'lmagan sinf" toifalariga ajratadi. Ushbu jarayon yig'ilgan ma'lumotlar to'plami orqali RF, SVM va k-NN tasniflash algoritmlari hamda yangi taklif qilingan usul yordamida amalga oshirilgan hamda natijalar 8-rasmda keltirilgan.



**8-rasm. Spektr ma'lumotlarini o'qitish aniqligi**

Natijada taklif qilgan usulni qo'llash orqali yuqori samaradorlikka erishilgan bo'lib, KRATda spektrni zondlash bo'yicha taklif qilingan usul tadqiq qilingan mavjud usullar bilan qabul qiluvchining ishlash xarakteristikasi egri chizig'i yordamida solishtirilgan (9-rasm).



**9-rasm. Taklif qilingan usulni mavjud usullar bilan qiyosiy baholash grafigi**

Olib borgan tadqiqotlar asosida, spektrdan samarali foydalanishga mashinali o'qitish usullarini qo'llash orqali erishish mumkinligi isbotlangan. Ishda 2.4 GHz chastotali simsiz tarmoq tomonidan yaratilgan haqiqiy signallarga asoslangan soddalashtirilgan spektrni zondlash dasturi taklif qilingan. HackRF One apparat vositasi va GNURadio dasturiy vositasi yordamida zondlangan va tahlil qilingan signal, qaror qabul qilish moduliga yuborilgan. Python dasturida olingan namunani ikkita chegaraviy qiymat bilan taqqoslash va mashinali o'qitish uchun yangi arxitektura asosidagi model yordamida tasniflash masalasini yechish orqali qaror qabul qilish amalga oshirilgan. Natijada RChSdan foydalanish samaradorligini 10-12 % gacha oshirish hamda taqsimlangan polosolardagi radiochastotalarning o'zlashtirilishini 0,9995 gacha aniqlikda baholash imkoniyati yaratilgan.

## XULOSA

“Kognitiv radioaloqa tizimlarida chastota spektrini samarali boshqarish usuli va modellari” mavzusidagi falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi bo'yicha olib borilgan tadqiqotlar natijasida quyidagi xulosalar taqdim etiladi:

1. Olib borilgan tadqiqotlar natijasida kognitiv radioaloqa tizimida RChSni boshqarish uchun kognitiv siklni tashkil qiladigan spektrni zondlash, spektr holati bo'yicha qaror qabul qilish, spektrni ulashish va undan foydalanish mobilligini ta'minlash funksiyalarini o'zida aks ettirgan maxsus arxitektura mavjud bo'lmaganligi sababli ushbu funksiyalarni sathlararo arxitekturada aks ettirishga erishilgan.

2. Radialoqa tizimlarida chastota spektrini zondlashning energiyani aniqlashga, siklostatsionar xususiyatlarga, moslashtirilgan filtrlash va kovariatsiya matritsasiga asoslangan usullari kognitiv radioaloqa tizimlarida qo'llash nuqtai nazaridan qiyosiy tadqiq qilingan hamda energiyani aniqlashga asoslangan usul birlamchi foydalanuvchi haqida oldindan ma'lumot talab qilmasligi, kam hisoblash quvvatini talab qilishi hamda amalga oshirishning soddaligi bilan talablarga mos kelishi asoslangan.

3. Kognitiv radioaloqa tizimini tadqiq qilishning kanallarni egallash, spektrni egallanmagan qismlarini aniqlash, kanallarni bo'shatish, signallarga shovqin qo'shish va so'ndirish jarayonlariga asoslangan modeli tuzilgan bo'lib, u kognitiv siklni boshqarishni quvvat spektral zichligi grafiklari orqali aks ettirish imkonini bergan.

4. Kognitiv radioaloqa tizimining asosiy muammosi hisoblangan birlamchi foydalanuvchilar aloqasining maksimal ishonchligini saqlab qolishga erishishda energiyani aniqlash chegaraviy qiymatini to'g'ri o'rnatish asosiy omil ekanligi energiyani aniqlash chegaraviy qiymatining noto'g'ri signal ehtimoligiga bog'liqlik xarakteristikasi asosida isbotlangan.

5. Spektr bo'yicha qaror qabul qilishning ikkita chegaraviy qiymat va mashinali o'qitishga asoslangan usuli ishlab chiqilgan. Ushbu usul qabul qilgichning ishlash xarakteristikasi asosida baholangan hamda bitta chegaraviy qiymatli usulga nisbatan 13% gacha, adaptiv usulga nisbatan 5% gacha, ikkita chegaraviy qiymatli usulga nisbatan 2% gacha samarali ekanligi aniqlangan. Taklif etilgan usul ajratilgan radiochastota polosalarida litsenziyalanmagan foydalanuvchi qurilmalarini aniqlash samaradorligini 10-15 %gacha oshirish imkonini yaratgan. Shu bilan birga usulni Aqlli uy tizimining aloqa sathida qo'llash RChSdan foydalanish samaradorligini 5-8 %gacha oshirish imkonini bergan.

6. Radiochastota spektrini zondlash va tahlil qilish modeli ishlab chiqilgan. Ushbu model aloqa xizmatlariga taqsimlangan polosalardagi RChSdan foydalanishni tahlil qilish, radiospektrning bandligi, hamda alohida tarmoq va radiostansiyalar to'g'risida ma'lumotlarni yig'ish imkonini bergan.

7. Radiochastota spektri holatini baholash uchun mashinali o'qitishning takomillashtirilgan arxitekturasiga asoslangan modeli ishlab chiqilgan. Ajratilgan radiochastota polosalarida radioelektron vositalardan foydalanishni rejalashtirishda ishlab chiqilgan model qo'llanilganda RChSdan foydalanish samaradorligini 10-12 %gacha oshirishga erishilgan hamda simsiz aloqa xizmatlariga taqsimlangan polosalardagi radiochastotalarning o'zlashtirilishini 0,9995 gacha aniqlikda baholash imkoniyati yaratilgan.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.13/30.12.2019.Т.07.02 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ  
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ТАШКЕНТСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ  
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

---

**ТАШКЕНТСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ**

**РЕЙПНАЗАРОВ ЕРНАЗАР НУРЖАМИЕВИЧ**

**МЕТОД И МОДЕЛИ ЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ  
ЧАСТОТНЫМ СПЕКТРОМ В СИСТЕМАХ КОГНИТИВНОЙ  
РАДИОСВЯЗИ**

**05.04.02 – Системы и устройства радиотехники, радионавигации, радиолокации и  
телевидения. Мобильные, волоконно-оптические системы связи**

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD)  
ПО ТЕХНИЧЕСКИМ НАУКАМ**

**Ташкент-2024**

**Тема диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за № B2023.3.PhD/T3937.**

Диссертация выполнена в Ташкентском университете информационных технологий имени Мухаммада аль-Хоразмий.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский и английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного Совета ([www.tuit.uz](http://www.tuit.uz)) и на информационно-образовательном портале «ZiyoNet» ([www.ziyo.net](http://www.ziyo.net)).

<b>Научный руководитель:</b>	<b>Хужаматов Халимжон Эргашевич</b> доктор технических наук, доцент
<b>Официальные оппоненты:</b>	<b>Давронбеков Дилмурод Абдужалилович</b> доктор технических наук, профессор  <b>Джабборова Муаттар Анваржоновна</b> доктор философии по техническим наукам
<b>Ведущая организация:</b>	<b>Ташкентский государственный транспортный университет</b>

Защита диссертации состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г. в \_\_\_ часов на заседании Научного Совета DSc.13/30.12.2019.T.07.02 при Ташкентском университете информационных технологий (Адрес: 100084, г. Ташкент, ул. Амира Темура, 108. Тел.: (+99871) 238-64-15; e-mail: [tuit@tuit.uz](mailto:tuit@tuit.uz)).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Ташкентского университета информационных технологий имени Мухаммада аль-Хоразмий (регистрационный номер №\_\_\_). (Адрес: 100084, г. Ташкент, ул. Амир Темура, 108. Тел.: (+99871) 238-64-15).

Автореферат диссертации разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 года.  
(реестр протокола рассылки №\_\_ от «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 года.)

**Б.Ш.Махкамов**

Председатель научного совета по присуждению ученых степеней, доктор экономических наук, профессор

**М.С.Саиткамоллов**

Ученый секретарь научного совета по присуждению ученых степеней, доктор экономических наук

**Д.Я.Иргашева**

Председатель научного семинара при научном совете по присуждению учёных степеней, доктор технических наук, профессор

## **ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))**

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** В мире большое внимание уделяется повышению эффективности использования радиочастотного спектра, принципам программного управления в средах связи, передовым технологиям обработки информации, совершенствованию существующих устройств контроля доступа к радиочастотному спектру. В этом направлении особое внимание уделяется развитию технических средств и аппаратно-программного обеспечения, способных временно занимать полосу радиочастотного спектра, выделенную определенному оператору связи на основании лицензии на передачу и прием данных. В связи с этим разработка новых методик, технологий и методов надежного и эффективного выявления незанятых частей радиочастотного спектра в системах когнитивной радиосвязи считается одной из важных задач.

В мире проводится ряд научных исследований, направленных на разработку методов распределения канальных ресурсов беспроводных сетей и принятия решений по частотному спектру в системах когнитивной радиосвязи. В этой области, в том числе исследование в реальном времени процессов присвоения и освобождения каналов систем радиосвязи для вторичного использования радиочастотного спектра на основе когнитивного цикла, выявления незанятых частей спектра, добавления и удаления шумов в сигналы, и многоканального зондирования спектра и радиочастот. Особое внимание уделяется разработке моделей, позволяющих повысить эффективность использования частотного спектра. При этом считается актуальной разработка методов и моделей на основе двух пороговых значений и машинного обучения, позволяющих снизить помехи первичной сети и повысить точность системы зондирования радиочастотного спектра и принятия решений о состоянии канала.

В нашей республике реализуются масштабные меры, направленные на дальнейшее совершенствование сферы телекоммуникаций и информационных технологий, увеличение зоны покрытия беспроводной и мобильной связи и повышение качества связи, а также рациональное и эффективное использование радиочастотного спектра. В стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы, определены задачи «охвата всех населенных пунктов, социальных объектов и автомобильных дорог широкополосными сетями за счет дальнейшего развития цифровой инфраструктуры»<sup>1</sup>. Реализация этих задач, включая разработку моделей и алгоритмов исследования процесса зондирования спектра в когнитивной радиосети, эффективных методов и моделей принятия решений по спектральной ситуации в сети, а также разработку моделей и алгоритмов зондирования спектра является одной из важных задач.

Настоящее диссертационное исследование выполнено на основе Указа Президента Республики Узбекистан № ПФ-6079 от 10 октября 2020 года «Об

---

<sup>1</sup> O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022 yil 28 yanvardagi PF-60-son “2022 – 2026-yillarga mo‘ljallangan Yangi O‘zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to‘g‘risida”gi Farmoni

утверждении стратегии «Цифровой Узбекистан – 2030» и мерах по ее эффективной реализации» и Указа № ПФ-60 от 28 января 2022 года «О стратегии развития Нового Узбекистана на 2022 – 2026 годы», постановлении № ПП-2053 от 22 октября 2013 года «О совершенствовании организации и использования управления радиочастотным спектром», № ПП-4022 от 21 ноября 2018 года «О мерах по дальнейшей модернизации цифровой инфраструктуры в целях развития цифровой экономики» и № ПП-4477 от 4 октября 2019 года «Об утверждении Стратегии по переходу Республики Узбекистан на «зеленую» экономику на период 2019 — 2030 годов», а также на Постановлениях Кабинета Министров № 48 от 18 января 2019 года «Об утверждении Концепции внедрения технологий «умный город» в Республике Узбекистан» и № 801 от 22 декабря 2020 года «О регулировании в области использования радиочастотного спектра и использования радиоэлектронных средств и высокочастотных устройств».

**Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан.** Диссертация выполнена в рамках направления развития науки и технологий Республики IV. «Развитие информатизации и информационно-коммуникационных технологий».

**Степень изученности проблемы.** Ведутся научно исследовательские работы по исследованию процессов приема, обработки и передачи информации по измеряемым параметрам между узлами когнитивной сети, включая анализ спектра и решения проблем принятия решения по состоянию спектра, а также принципы повышения качества обслуживания вторичных пользователей в системах когнитивной радиосвязи, минимизирующие помехи первичным пользователям и обеспечивающие высокую надежность их использования, восприятия, управления и совместного использования радиочастотного спектра.

Исследованиям в этом направлении посвящены научные работы И.Ч. Лян, Д. Дас, Ж. Митола, С. Хайкин, Э. Китчер, М.Х. Рехмани, А.Ю. Гребешков, В.В. Бутенко, А.Е. Кучеряев и других известных зарубежных ученых. Также к этому направлению посвящены научные труды Д.А. Давронбеков, У.Б. Амирсаидов, Ю.В. Писецкий, Д.Н. Ликонцев, В.И. Прахов, Ш.У. Пулатов, А.Ш. Шахобиддинов, А.А. Нигманов, Х.Э. Хужаматов и других местных ученых нашей республики.

Существующие методы выделения канального ресурса в системах когнитивной радиосвязи, как правило, при обнаружении активации основного пользователя не обеспечивают безусловного освобождения рабочего канала. До сих пор работа вторичного пользователя подробно не изучалась, учитывая, что основной пользователь начинает работать в промежутке времени между моментами зондирования. В этом случае вторичному пользователю необходимо немедленно переключиться на другой доступный канал, чтобы продолжить процесс приема и передачи информации в рамках контроля доступа к среде передачи. Результаты анализа предыдущих исследований показали, что недостаточно были изучены проблемы выделения ресурсов радиочастотных каналов в рассматриваемых условиях, в том числе проблемы

оценки качества выбранного канала передачи для обеспечения санкционированного доступа к каналу и услуг связи вторичного пользователя за счет совершенствования существующих методов определения ресурсов канала.

**Взаимосвязь темы диссертации с научными исследованиями организаций высшего образования, где выполнена диссертационная работа.** Диссертационное исследование выполнено в рамках международного совместного проекта Uzb-Ind-2021-94 «Энергоэффективная связь и поток данных в «умном городе» с использованием IoT на базе CRN» (2021-2023) на основе научно-исследовательского плана Ташкентского университета информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразмий.

**Целью исследования** является разработка метода и моделей эффективного управления частотным спектром в системе когнитивной радиосвязи.

**Задачи исследования:**

анализ принципов работы систем когнитивной радиосвязи и методов зондирования спектра;

разработка модели, позволяющей исследовать рабочие процессы систем когнитивной радиосвязи в режиме реального времени;

разработка модели, реализующей адаптивную настройку порогового значения обнаружения сигналов систем когнитивной радиосвязи;

разработка метода принятия решения о состоянии спектра в системе когнитивной радиосвязи, позволяющего снизить помехи в первичной системе связи;

разработка модели, повышающей точность восприятия радиочастотного спектра и принятия решений о состоянии спектра в системе когнитивной радиосвязи.

**Объектом исследования** являются аппаратные и программные средства зондирования спектра и принятия решений по использованию спектра в системе когнитивной радиосвязи.

**Предметом исследования** являются процессы адаптивного зондирования спектра и принятия решений по использованию спектра с помощью искусственного интеллекта в системе когнитивной радиосвязи.

**Методы исследования.** В процессе исследований использовались методы теории передачи сигналов, имитационного моделирования, машинного обучения, интеллектуального анализа данных, многокритериального принятия решений, байесовских сетей, сценарного анализа и порядково-приоритетного подхода.

**Научная новизна исследования** заключается в следующем:

разработана модель, позволяющая в реальном времени исследовать процессы присвоения и освобождения каналов, выявлять незанятые части спектра, добавлять и удалять шумы в сигналы систем радиосвязи, а также осуществлять многоканальное зондирование спектра для вторичного использования радиочастотного спектра на основе когнитивного цикла;

разработана модель с целью повышения эффективности использования радиочастот, позволяющая гибко настраивать пороговое значение

обнаружения сигналов систем когнитивной радиосвязи на основе вероятности ложного сигнала и обратной Q-функции;

разработан двухэтапный метод, позволяющий эффективно принимать решения о состоянии спектра и снижать помехи первичной сети в системах когнитивной радиосвязи основанный на двух пороговых значениях и машинном обучении;

разработана гибридная модель, позволяющая повысить точность определения радиочастотного спектра и двоичного классификатора состояния каналов на основе алгоритмов машинного обучения.

**Практические результаты исследования** заключаются в следующем:

создана программа исследования рабочего процесса систем когнитивной радиосвязи;

создана программа эффективного определения порогового значения обнаружения сигнала в системах когнитивной радиосвязи;

спроектирован аппаратно-программный комплекс для зондирования и анализа спектра и разработана имитационная модель;

собрана база знаний и создана программа на основе машинного обучения для принятия решений о состоянии спектра.

**Достоверность результатов исследований.** Достоверность результатов исследования объясняется методом принятия решений о состоянии радиочастотного спектра в системах когнитивной радиосвязи, моделью восприятия и анализа спектра, моделью и алгоритмом принятия решений, а также результатами исследования, полученные путем сравнительного анализа на основе общепринятых критериев.

**Научная и практическая значимость результатов исследования.** Научная значимость результатов исследования заключается в том, что они позволяют изучить работу систем радиосвязи в режиме реального времени на основе когнитивного цикла и снизить помехи основной системе связи за счет адаптивной регулировки порогового значения зондирования сигналов, принятия решений о состоянии спектра на основе двух пороговых значений и машинного обучения. Метод оценивается путем разработки модели, повышающий точность зондирования радиочастотного спектра и принятия решений о состоянии спектра на основе машинного обучения.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что созданы программы для изучения процесса работы систем когнитивной радиосвязи и определения предельного значения обнаружения сигналов, разработан аппаратно-программный комплекс для зондирования и анализа спектра, а также разработаны имитационная модель, база знаний для принятия решений о состоянии спектра и программа на основе машинного обучения.

**Внедрение результатов исследований.** По полученным результатам метода и моделей эффективного управления частотным спектром в системах когнитивной радиосвязи:

модель на основе машинного обучения, повышающая точность зондирования радиочастотного спектра и принятия решений о состоянии спектра внедрена на предприятиях Министерства цифровых технологий

Республики Узбекистан, в частности, в ГУП Центр электромагнитной совместимости (Справка Министерство цифровых технологий от 20 июля 2023 года № 34-8/4933). В результате научных исследований удалось повысить эффективность обнаружения нелегальных пользовательских устройств в выделенных диапазонах радиочастот до 10-15%, повысить точность обнаружения присвоения радиочастот в полосах, выделенных службам беспроводной связи до 0,9995;

метод принятия решений о состоянии спектра на основе двух пороговых значений и машинного обучения, позволяющий снизить помехи первичной системе связи внедрен в ГУП UNICON.UZ (Справка Министерство цифровых технологий от 20 июля 2023 года № 34-8/4933). В результате научных исследований, анализа использования радиочастотного спектра в полосах, выделенных службам связи, использования радиоспектра и улучшения состояния сбора данных об отдельных сетях и радиостанциях, точность определения использования радиочастот в полосах, выделенных службам беспроводной связи до 0,9995;

модель, позволяющая в режиме реального времени исследовать процессы присвоения каналов, выявления свободных частей спектра, освобождения каналов, добавления и подавления шумов к сигналам, основанная на когнитивном цикле и модель адаптивного регулирования порогового значения зондирования сигналов систем когнитивной радиосвязи на основе вероятности ложного сигнала и обратной Q функции внедрены в ООО «ONIKS GRUPP» (Справка Министерство цифровых технологий от 20 июля 2023 года № 34-8/4933). В результате удалось обмениваться потоками данных, вырабатываемыми видеокамерами и датчиками, через беспроводную сеть через те части лицензируемых радиочастотных диапазонов, которые не заняты основными пользователями, а также путем внедрения моделей на уровне связи системы «Умный дом» удалось повысить эффективность использования радиочастотного спектра до 5-8%.

**Апробация результатов исследования.** Результаты исследований апробированы и обсуждены на 13 международных, 5 республиканских научно-практических конференциях и на научных семинарах.

**Опубликованность результатов исследования.** Всего по теме исследования опубликованы 38 научных работ, в том числе 16 статей в журналах, рекомендованных Высшей Аттестационной Комиссией Республики Узбекистан, в том числе 13 зарубежных, 3 республиканских журналах, а также получены 4 свидетельства о регистрации программных средств, созданных для ЭВМ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объем диссертации составляет 120 страниц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Во введении** обоснованы актуальность работы и востребованность темы диссертации, определены цель и задачи, объект и предмет исследования;

приводится соответствие исследований приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан, изложена научная новизна, практические результаты исследования, обоснована достоверность полученных результатов, приведены теоретическая и практическая значимость, сведения о внедрении результатов исследования, а также сведения об опубликованности результатов и структура диссертации.

В первой главе диссертации под названием «**Анализ принципов систем когнитивной радиосвязи и методов зондирования спектра**» анализируются методы динамического доступа к спектру, принципы сетей когнитивной радиосвязи (КРС), основные функции, методы управления спектром и зондирования, а также полностью описывается исследуемая проблема.

На данный момент некоторые полосы РЧС используются чрезмерно, а в некоторых полосах большая часть спектра используется недостаточно эффективно, традиционная политика распределения спектра остается неэффективной и неспособной удовлетворить новые потребности в использовании спектра. Эту проблему невозможно полностью решить с помощью передовых методов модуляции и кодирования, методов использования нескольких антенн, согласования каналов и других новых технологий. Потому что, с помощью этих технологий пропускную способность радиоканала можно увеличить лишь до определенного предела. Для эффективного решения этой проблемы необходимо внедрение технологий динамического доступа к спектру, в частности систем и сетей КРС. Поскольку концепция сети КРС основана на использовании свободных участков РЧС, которые в настоящее время не используются первичными пользователями для связи вторичных пользователей, к сети этого типа предъявляются следующие два основных требования: 1) не мешать работе основных пользователей и 2) предоставлять услуги вторичному пользователю, для обеспечения качества обслуживания. Для этого система КРС должна быть способна эффективно выполнять дополнительные функции, такие как зондирование и управление спектром, а также совместное использование и обеспечение мобильности использования спектра по сравнению с традиционной системой беспроводной связи.

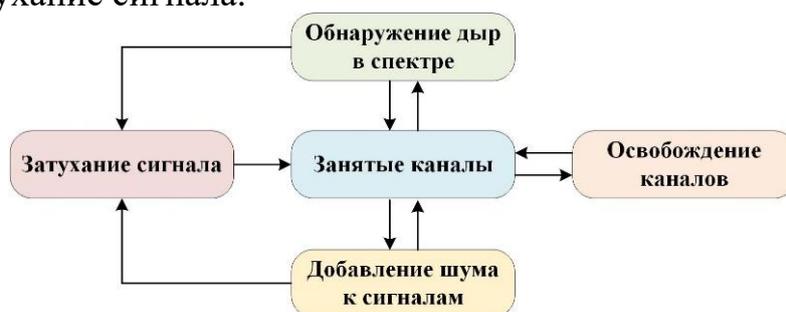
В системах КРС вторичные пользователи должны надежно обнаруживать присутствие первичных пользователей, чтобы не мешать им, и это по своей сути сложная задача. Обычно это делается с помощью спектрального зондирования. Наиболее широко используемыми методами измерения спектра являются методы обнаружения энергии, циклостационарные свойства, адаптивная фильтрация и методы обнаружения ковариационной матрицы. Среди них широко используются в эксплуатации методы обнаружения энергии, поскольку они просты в реализации, требуют низкой стоимости и не требуют предварительной информации о первичном сигнале. Кооперативное определение спектра на основе детектора энергии играет важную роль в обеспечении эффективного использования ресурсов РЧС в сетях когнитивного радио. Предлагаются различные модели и алгоритмы методов кооперативного зондирования, и их эффективность в основном оценивается с помощью таких

показателей, как вероятность правильного обнаружения сигнала, вероятность ложной тревоги, энергоэффективность и пропускная способность. В этом случае высокой эффективностью могут оказаться гибридные методы и модели, основанные на установлении двух пороговых значений и использовании машинного обучения при оценке значений энергии.

При принятии решения о состоянии спектра тестовая статистика, полученная путем измерения спектра, относится к одному из двух классов: 1) сигнал отсутствует, т. е. класс  $H_0$ , и 2) сигнал присутствует, т. е. класс  $H_1$ . В идеальном случае классификатор должен указывать класс  $H_0$ , если наблюдается только шумовой сигнал, и класс  $H_1$ , если пользовательский сигнал наблюдается вместе с шумовым сигналом. Для этого полученная статистика теста сравнивается с пороговым значением и принимается решение. В этом случае необходимо снизить вероятность ложной тревоги и одновременно повысить вероятность правильного обнаружения сигнала для принятия решения с высокой точностью.

Вторая глава диссертации под названием «**Исследование процессов зондирования спектра в системе когнитивной радиосвязи**» посвящена исследованию методов зондирования спектра в КРС на основе определения энергии, в том числе однопороговых, адаптивно-пороговых и двухпороговых методов.

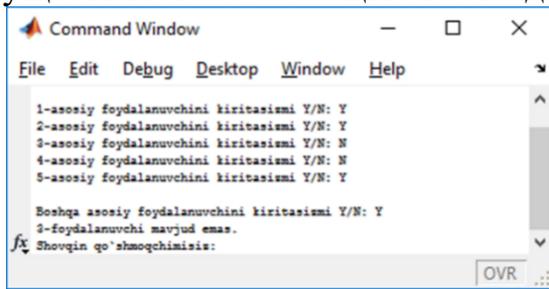
Для исследования рабочего процесса КРС необходима модель, отражающая необходимые характеристики системы. В рамках исследования была разработана упрощенная модель экспериментального исследования КРС (рис. 1). Согласно этой модели процесс работы системы когнитивного радио условно разделяется на следующие подпроцессы: присвоение каналов; обнаружение дыр в спектре; освобождение каналов; добавление шума к сигналам; затухание сигнала.



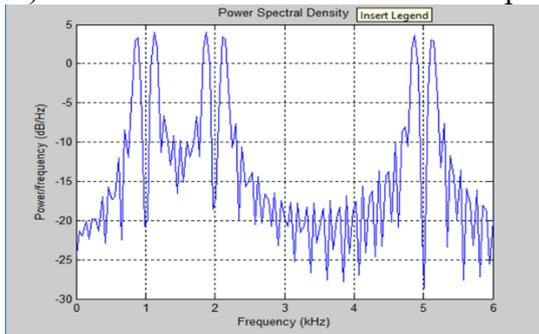
**Рисунок 1. Блок-схема исследовательской модели КРС**

Было выполнено несколько экспериментальных методов моделирования, связанных с когнитивным радио, поэтому в это исследование включены простота конфигурации модели, простота визуализации и обобщенные результаты моделирования, а также, что наиболее важно, несколько методов синтеза данных и обработки сигналов при управлении и анализе спектра. Он был реализован с использованием среды моделирования Matlab. В этой модели КРС имеет несколько разных частотных каналов и каждому пользователю закреплен определенный диапазон частот. После того, как мы запускаем программу, она просит добавить пользователя и назначить ему

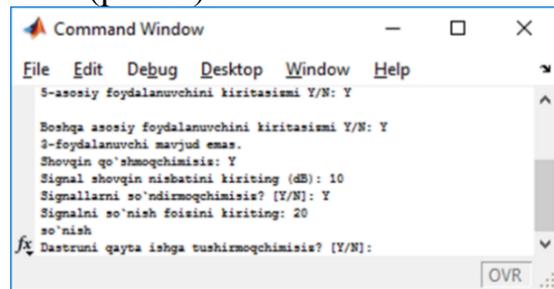
конкретный диапазон частот в порядке возрастания. Управление моделью осуществляется с помощью Командного окна (рис. 2).



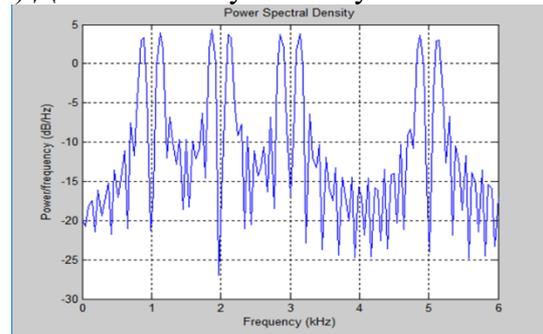
а) Назначение пользователя в спектре



в) Кривая мощность-спектральной плотности



б) Добавление шума и затухание сигнала



г) Добавление нового пользователя в спектре

## Рисунок 2. Командное окно и результаты модели исследования КРС

В результате моделирования выполняются назначение основных пользователей к спектру частот; выделение вторичного пользователя в свободные полосы спектра; добавление шума к пользовательским сигналам; затухание сигнала; и изучаются освобождение состояния канала и можно получить графики спектральной плотности мощности, изображающие эти процессы.

Одним из методов, используемых для идентификации основного пользователя в КРС, является метод обнаружения энергии с одним пороговым значением. Алгоритм определения энергии заключается в вычислении энергии сигнала за определенное время и сравнении ее с заданным пороговым значением для принятия решения о присутствии основного пользователя. Первым шагом в определении энергии является оценка полученной мощности  $y(t)$  основного пользователя. Чтобы вычислить мощность принятого сигнала, выходной сигнал полосового фильтра с полосой пропускания  $w$  дискретизируется и интегрируется по интервалу  $T$ . Наконец, интегральное значение  $\lambda$  сравнивается с пороговым значением для определения результата. Пороговое значение является важным ключевым параметром метода определения энергии. Это можно определить по целевому показателю производительности, такому как ложная тревога или вероятность правильного обнаружения. Однопороговый метод определения энергии можно записать выражением (1).

$$y(n) = \begin{cases} w(n) \rightarrow H_0 \\ s(n) + w(n) \rightarrow H_1 \end{cases} \quad (1)$$

здесь:  $y(n)$  –  $n$ -й отсчет принятого сигнала когнитивного радио;  $w(n)$  – белый Гауссовский шум с нулевым средним значением и дисперсией  $\sigma_w^2$ ;  $s(n)$  – сигнал, передаваемый основным пользователем, со средним значением равным нулю и вариацией равной  $\sigma_s^2$ ;  $H_0$  – незанятый спектр;  $H_1$  – занятый спектр.

Отношение сигнал/шум выражается формулой  $\gamma = \sigma_s^2/\sigma_w^2$ . Если в когнитивном радио используется однопороговый детектор энергии, статистика теста (энергия сигнала) выражается как:

$$T_E(y) = \frac{1}{M} \sum_{N=1}^M |y(n)|^2 \quad (2)$$

здесь  $M$  – количество выборок. Для больших значений  $M$  ( $M > 10$ ) тестовая статистика  $T_E(y)$  подчиняется двум гипотезам, аппроксимирующим распределение Гаусса согласно теории центрального предела, и выражается как:

$$T_E(y) : \begin{cases} N\left(\sigma_w^2, \frac{2}{M}\sigma_w^4\right) & H_0 \\ N\left((1+\gamma)\sigma_w^2, \frac{2}{M}(1+2\gamma)\sigma_w^4\right) & H_1 \end{cases} \quad (3)$$

Для данного порогового значения  $\lambda$ , если  $T_E(y) \leq \lambda$ , основной пользователь не существует, в противном случае основной пользователь оценивается как присутствующий. Вероятности ложной тревоги  $P_f$  и правильного обнаружения  $P_d$  можно рассчитать по следующим выражениям:

$$P_f = P_r(T_E(y) > \lambda | H_0) = Q\left(\left(\frac{\lambda}{\sigma_w^2} - 1\right)\sqrt{\frac{M}{2}}\right) \quad (4)$$

$$P_d = P_r(T_E(y) > \lambda | H_1) = Q\left(\left(\frac{\lambda}{\sigma_w^2} - \gamma - 1\right)\sqrt{\frac{M}{2(2\gamma + 1)}}\right) \quad (5)$$

здесь  $Q(x)$  – аддитивная кумулятивная функция распределения переменной стандартной Гауссовой случайной величины.

Из урав. (4) пороговое значение  $\lambda$  можно рассчитать следующим образом:

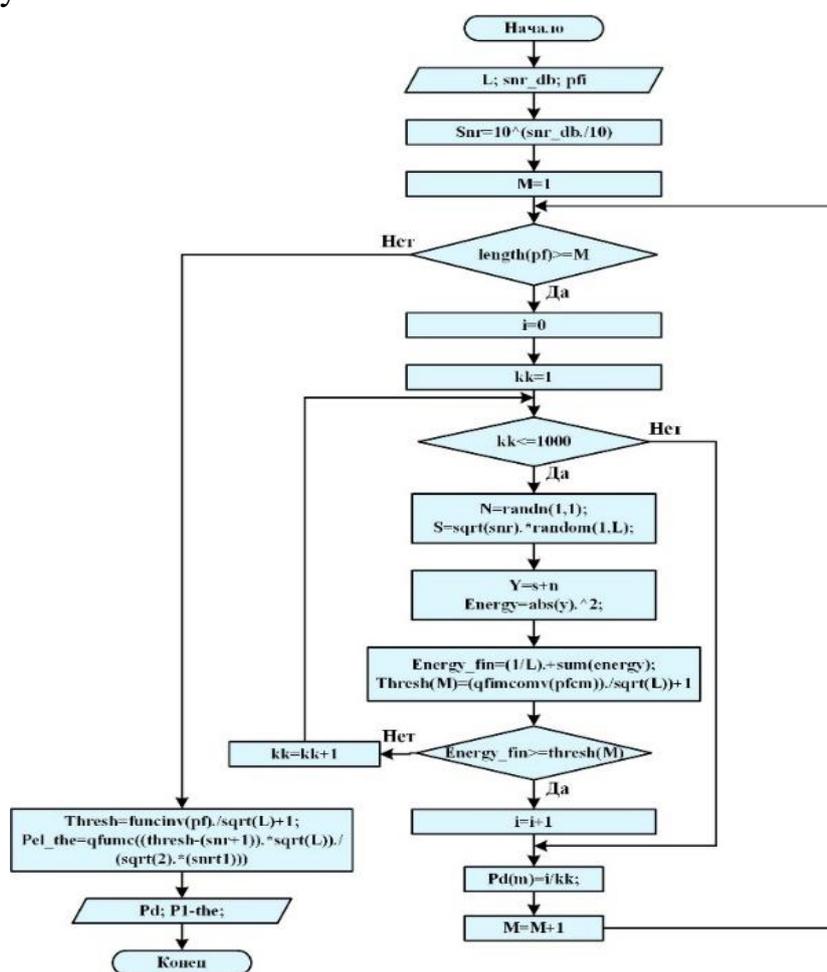
$$\lambda = Q^{-1}(P_f) \sqrt{2M} \sigma_w^2 + M \sigma_w^2 \quad (6)$$

В КРС создана Matlab-модель для исследования метода определения энергии при спектральном зондировании. Данная модель дает возможность оценить пороговое значение обнаружения энергии в зависимости от вероятности ложной тревоги. Эту модель можно объяснить четырьмя основными этапами: 1) Основной пользователь считается недоступным. В этом случае шум генерируется с помощью случайной функции, а полученный сигнал состоит только из шума; 2) Если только энергия шума превышает пороговое значение, это соответствует ложному сигналу; 3) Этот сценарий выполняется  $N$  итераций; 4) Получено описание порогового значения в зависимости от вероятности ложной тревоги и оценено пороговое значение.

Представлены алгоритм реализации данной модели (рис. 3) и характеристика вероятности ошибочного определения энергии, полученной в результате реализации модели с помощью среда моделирования Matlab (рис. 4). Из этой характеристики видно, что уменьшение порогового значения

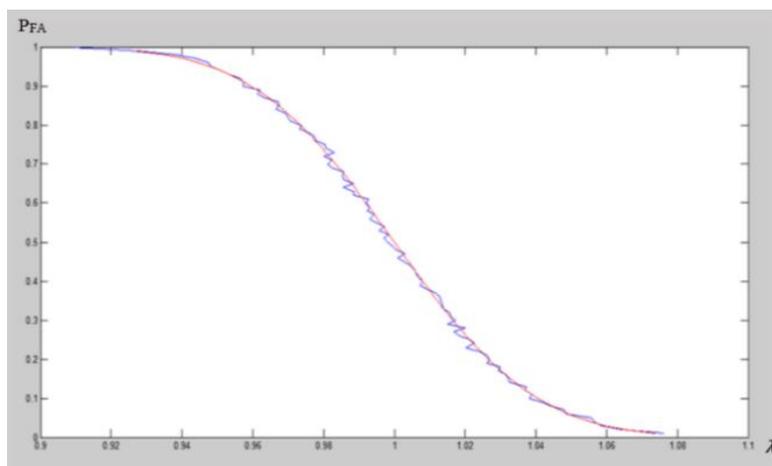
с целью повышения вероятности правильного обнаружения полезного сигнала приводит к увеличению вероятности ложного сигнала. Также результаты, полученные с помощью аналитического выражения и моделирования, доказывают адекватность моделирования, проведенного с использованием построенной модели, имеющие близкие друг к другу значения.

Восприимчивость однопорогового метода обнаружения энергии к шуму, неспособность обнаруживать слабые сигналы, отсутствие адаптивности и недостатки в обнаружении непрерывной передачи ограничивают его использование в сетях когнитивного радио. Поэтому для детектора энергии КРС предложены адаптивные алгоритмы порогового значения, в которых пороговое значение регулируется в зависимости от уровня шума в канале. Пороговое значение периодически обновляется на основе рассчитанной мощности шума.



**Рисунок 3. Алгоритм реализации экспериментальной модели поиска порогового значения детектирования энергии**

Этот алгоритм работает лучше, чем однопороговый детектор энергии, определенный в средах с низким соотношением сигнал/шум, но требует больше вычислительных ресурсов. Использование алгоритмов адаптивного порогового определения повышает надежность детектора энергии и, таким образом, улучшает его характеристики с точки зрения вероятности ложного обнаружения и вероятности ложной тревоги.



**Рисунок 4. Пороговое значение обнаружения энергии (теоретическое и экспериментальное)**

Чтобы уменьшить коммуникационный трафик в КРС, предложены два метода измерения порогового значения для обнаружения энергии. При этом, если  $X$  больше  $\lambda_2$ , верна гипотеза  $H_1$ , если меньше  $\lambda_1$ , верна гипотеза  $H_0$ , а наблюдаемая энергия находится между двумя пороговыми значениями (неопределенная область), т.е.  $\lambda_1 < X < \lambda_2$ , решение не принимается, и когнитивное радио возвращается к фазе восприятия.

(6) по выражению и пороговые значения  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  можно найти следующим образом: здесь:  $\rho$  – параметр неопределенности.

$$\lambda_1 = (1 - \rho)\lambda \quad (7)$$

$$\lambda_2 = (1 + \rho)\lambda \quad (8)$$

Если невозможно принять решение после сравнения полученного сигнала с пороговыми значениями путем обнаружения энергии с двумя пороговыми значениями, то есть если сигнал находится в неопределенной области, когнитивное устройство продолжит зондирование этого частотного канала через определенный интервал времени повторно. Также предлагается метод зондирования с использованием двух пороговых значений, основанный на совместном принятии решения. В отличие от описанного выше, этот метод используется для улучшения способности КРС обнаруживать макросы. В этом случае детектор энергии будет иметь два пороговых значения. Каждый дополнительный пользователь выполняет определение энергии для отдельного зондирования спектра. После этого принимаются локальные решения, разница в том, что если контрольные значения энергии сигнала находятся в неопределенной зоне, то эти значения передаются в центр агрегации, а центр агрегации принимает окончательное решение. от того, присутствует или нет основной пользователь на основе определенных алгоритмов.

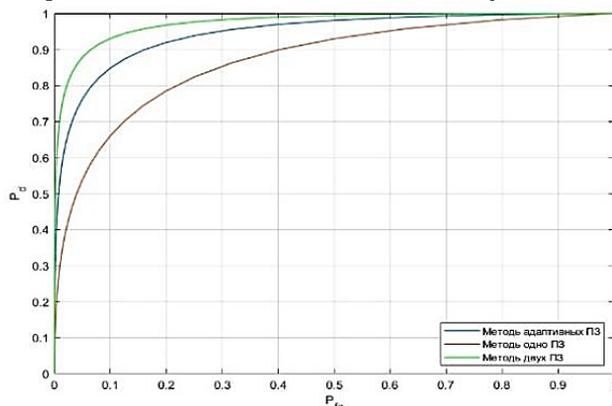
Доказано, что этот метод хорошо работает для решения проблем сбоя узла и затухания сигнала. Каждый вторичный пользователь отправляет свое локальное решение в центр агрегации. Каждый результат когнитивного радио затем объединяется по определенным правилам комбинирования, то есть мягким, жестким, гибридным и другим. Вероятность правильного обнаружения ( $P_d$ ) и вероятность ложной тревоги ( $P_f$ ) для метода кооперативного

обнаружения на основе правила комбинации ИЛИ на основе двух детекторов энергии порогового значения выражаются следующим образом:

$$P_d = 1 - \prod_{i=1}^K 1 - P_{di} \quad (9)$$

$$P_f = 1 - \prod_{i=1}^K 1 - P_{fi} \quad (10)$$

здесь  $P_{di}$  и  $P_{fi}$  – вероятность правильного обнаружения и вероятность ложной тревоги  $i$ -го пользователя соответственно, а  $K$  – количество когнитивных пользователей, участвующих в совместном зондировании спектра.



**Рисунок 5. Схема сравнительной оценки методов зондирования радиочастотного спектра на основе энергодетектора**

Сравнительная эффективность вышеуказанных методов оценивалась по вероятности правильного обнаружения ( $P_d$ ) и вероятности ложной тревоги ( $P_{fa}$ ). В этом случае результат оценки описывается с помощью рабочей характеристики приемника в среде Matlab (рис. 5).

Результаты показывают, что детекторы энергии с адаптивным порогом и детекторы с двойным порогом работают на 8 и 11% лучше, чем детекторы энергии с фиксированным одиночным порогом в средах с низким соотношением сигнал/шум соответственно.

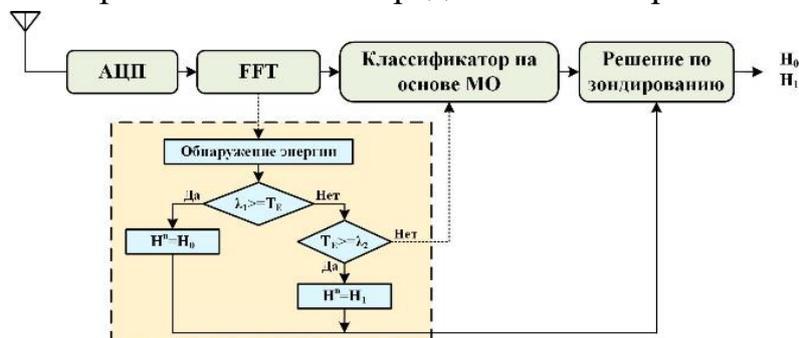
В третьей главе диссертации, под названием «**Метод и модели принятия решений о состоянии спектра в системе когнитивной радиосвязи**», описаны метод и модели, разработанные для эффективного управления частотным спектром в КРС, включая принятие решения о состоянии спектра в КРС рассматриваются два эффективных метода на основе пороговых значений и машинного обучения для приема, определения спектра и моделей принятия решения о состоянии спектра.

Двухпороговый подход, основанный на машинном обучении, к принятию решений о распределении спектра в когнитивной радиосети предполагает, что в когнитивной сети есть  $N$  когнитивных пользователей, где  $N$  – положительное целое число. Каждый когнитивный пользователь устанавливает два пороговых значения. Во-первых, все когнитивные пользователи выполняют локальное измерение энергии, среди которых пользователи  $K$  могут принимать локальные решения, а остальные пользователи  $N-K$  получают значения энергии между двумя пороговыми значениями.

Тогда вторичные пользователи, которые пытаются установить связь между  $K$  когнитивными пользователями, принимают результаты локального решения

как глобальное решение. Вторичные пользователи, которые не способны принять локальное решение и пытаются установить связь между когнитивными пользователями  $N$ - $K$ , ожидают результата глобального решения от глобального центра принятия решений. Для этого все когнитивные пользователи передают измеренные значения энергии в глобальный центр принятия решений. Там он пересылает полученные значения энергии в предварительно обученный модуль машинного обучения, предназначенный для решения задачи классификации. Этот метод сокращает время принятия решений и повышает эффективность обнаружения. Описанный выше метод двухпорогового кооперативного спектрального зондирования включает следующие этапы: Шаг 1:  $N$  когнитивных пользователей равномерно распределены в когнитивной сети. Соотношение сигнал/шум среды одинаковое, каждый когнитивный пользователь в сети выполняет измерение энергии авторизованными пользователями среды текущего спектра для получения значения энергии текущего спектра; Шаг 2: устанавливаются два пороговых значения для оценки локального измеренного значения как 0 или 1. Каждый когнитивный пользователь принимает локальное решение на основе значения энергии, полученного на шаге 1, и двух пороговых значений. Если значение энергии находится между пороговыми значениями, когнитивный пользователь не принимает локальное решение. Если значение энергии выходит за пределы пороговых значений, вторичный пользователь принимает результат локального решения и использует его в качестве глобального решения; Шаг 3: все когнитивные пользователи передают в центр принятия решений энергетические значения, среди которых только те, кто не смог принять локальное решение и пытается установить связь, требуют ответа, то есть глобального результата решения; Шаг 4: центр принятия решений вводит новые значения энергии в предварительно обученный модуль машинного обучения. Там глобальное решение принимается с помощью алгоритма машинного обучения, предназначенного для решения задачи классификации.

Основной задачей предлагаемого метода является выявление неиспользуемой части спектра на высоком уровне для достижения более эффективного использования спектра. При этом этапы выполнения операции зондирования спектра схематически представлены на рис. 6.



**Рисунок 6. Блок-схема реализации метода спектрального зондирования**

В процессе реализации метода зондирования спектра сигнал, принимаемый SDR (Software Defined Radio), сначала оцифровывается через аналого-цифровой преобразователь, а затем проходит через полосовой

фильтр. Отфильтрованный сигнал затем преобразуется в частотную область с помощью блока FFT (быстрое преобразование Фурье). Наконец, классификатор на основе машинного обучения используется для принятия решения о том, присутствует ли сигнал (H1) или нет (H0).

Сравниваются производительности нескольких классификаторов для классификации полученных первичных пользовательских или шумовых сигналов и исследуются следующие три алгоритма машинного обучения: RF, SVM, k-NN. Методы обучения под руководством учителя обычно состоят из двух основных этапов: преподавания/обучения и классификации. База данных, используемая для обнаружения спектра, была создана на компьютере, на котором работала модель, построенная с использованием аппаратного обеспечения HackRF One RTL-SDR и программного обеспечения GNURadio, а также беспроводного передатчика 2,4 ГГц. В таблице 1 показано, как набор данных использовался на этапе обучения и тестирования.

Таблица 1

Параметры набора данных, используемые на этапах обучения и тестирования

Сигнал	Этап обучения	Этап тестирования
Основной	10 000	1 000
Шум	10 000	1 000

Данные генерируются для нескольких расстояний между отправителем и получателем. Вторичные пользователи, расположенные рядом с основным пользователем, могут обнаружить присутствие основного пользователя более надежно, чем те, которые расположены дальше от основного пользователя. Кроме того, второстепенные пользователи, находящиеся близко друг к другу, могут сообщать об одних и тех же результатах зондирования. Классификация спектральных данных осуществлялась с использованием языка программирования Python с учетом классификаторов Random Forest (RF), Support Vector Machines (SVM), K-Nearest Neighbor (k-NN). Векторы частотных характеристик, содержащие N данных сигнала, полученные с помощью RTL-SDR, принимаются в качестве входных данных. Таким образом, рекомендуется следующая архитектура обучения (рис. 7).

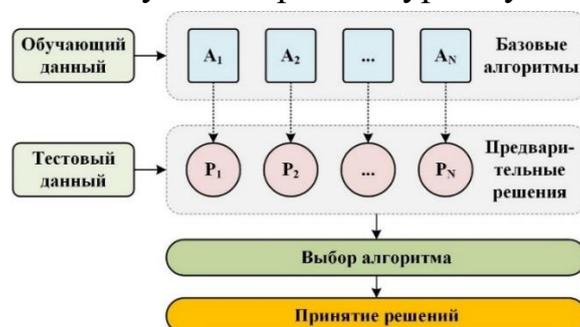
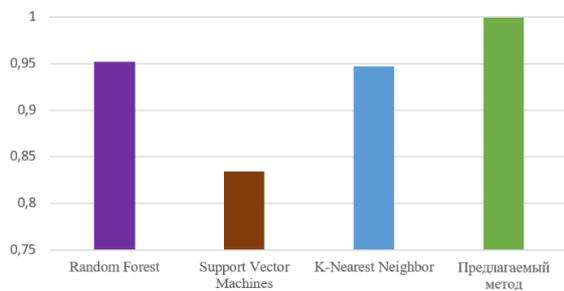


Рисунок 7. Архитектура модели машинного обучения

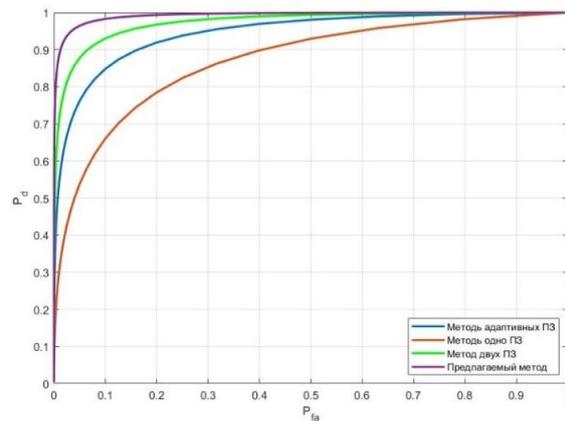
Эта архитектура содержит две или более базовые модели, называемые базовыми моделями. Различные модели классификации обучаются с использованием базовых алгоритмов. Затем после тестирования каждой модели выбирается алгоритм с наибольшей точностью для принятия решения

на основе полученного сигнала в реальном времени. Для радиоканала вычисленный вектор частоты в устройствах когнитивного радио рассматривается как вектор признаков и подается в классификатор, чтобы определить, присутствует ли канал или нет. Классификатор относит каждый вектор признаков к одному из двух классов, то есть «класс присутствия канала» и «класс отсутствия канала». Этот процесс был выполнен с использованием алгоритмов классификации RF, SVM и k-NN и нового предложенного метода на основе собранного набора данных. Полученные результаты показаны на рисунке 8.

В результате установлено, что использование предложенного метода позволяет достичь высокой эффективности. На рисунке 9 сравниваются характеристики приемника предлагаемого метода зондирования спектра в КРС с исследованными существующими методами.



**Рисунок 8. Точность обучения спектральных данных**



**Рисунок 9. График сравнительной оценки предлагаемого метода с существующими методами**

На основе проведенных исследований доказано, что эффективного использования спектра можно добиться, применяя методы машинного обучения. В этой работе предлагается упрощенная программа зондирования спектра, основанная на реальных сигналах, генерируемых беспроводным передатчиком 2,4 ГГц. Сигнал, обнаруженный и проанализированный с помощью аппаратного средства HackRF One и программного средства GNURadio, был отправлен в модуль принятия решений. В среде Python принятие решения осуществляется путем сравнения выборки с двумя пороговыми значениями и решения задачи классификации с помощью модели, основанной на новой архитектуре машинного обучения. В результате удалось повысить эффективность использования РЧС на 10-12% и оценить присвоение радиочастот в распределенных диапазонах с точностью до 0,9995.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате диссертационного исследования доктора философии (PhD) на тему «Метод и модели эффективного управления частотным спектром в системах когнитивной радиосвязи» представлены следующие выводы:

1. В результате проведенных исследований в КРС отсутствует специальная архитектура, отражающая функции зондирования спектра, принятия решений о состоянии спектра, совместного использования спектра и обеспечения мобильности использования спектра, составляющие когнитивный цикл управления РЧС, благодаря чему удалось отразить эти функции в межуровневой архитектуре.

2. Методы зондирования частотного спектра в системах радиосвязи на основе энергетического детектирования, циклостационарных характеристик, адаптивной фильтрации и ковариационной матрицы сравнительно изучены с точки зрения применения в КРС, а метод на основе энергетического детектирования не требует предварительной информации об основном пользователе и требует низкой вычислительной мощности, основанной на соблюдении требований и простоте реализации.

3. Создана модель исследования КРС, основанная на процессах занятия каналов, выявления свободных частей спектра, освобождения каналов, добавления шума к сигналам и их затухания, позволяющая отразить управление когнитивным циклом на графиках спектральной плотности мощности.

4. Основная проблема КРС состоит в том, что правильная установка порогового значения энергетического обнаружения является основным фактором достижения максимальной надежности связи первичных пользователей, доказанной на основе характеристик.

5. Разработан метод принятия решений по спектру на основе двух пороговых значений и машинного обучения. Этот метод оценивается на основе рабочих характеристик приемника и оказывается до 13% более эффективным, чем метод с одним пороговым значением, до 5% более эффективным, чем адаптивный метод, и до 2% более эффективным, чем метод с двумя пороговыми значениями. Предложенный метод позволил повысить эффективность обнаружения нелегальных пользовательских устройств в выделенных диапазонах радиочастот на 10-15%. При этом применение метода на уровне связи системы «Умный дом» позволило повысить эффективность использования РЧС до 5-8%.

6. Разработана модель обнаружения и анализа РЧС. Эта модель позволила службам связи анализировать использование РЧС в выделенных диапазонах, занятость радиоспектра, а также собирать информацию об отдельных сетях и радиостанциях.

7. Разработана модель на основе улучшенной архитектуры машинного обучения для оценки состояния РЧС. При использовании разработанной модели планирования использования радиоэлектронных средств в выделенных диапазонах радиочастот эффективность использования РЧС увеличена до 10-12 %, а также появилась возможность оценить присвоение радиочастот в полосах, выделенных службам беспроводной связи, с точностью до 0,9995.

**SCIENTIFIC COUNCIL AWARDING SCIENTIFIC DEGREES  
DSc.13/30.12.2019.T.07.02 AT TASHKENT UNIVERSITY OF  
INFORMATION TECHNOLOGIES**

---

**TASHKENT UNIVERSITY OF INFORMATION TECHNOLOGIES**

**REYPNAZAROV ERNAZAR NURJAMIYEVICH**

**METHOD AND MODELS OF EFFECTIVE MANAGEMENT OF THE  
FREQUENCY SPECTRUM IN COGNITIVE RADIO COMMUNICATION  
SYSTEMS**

**05.04.02 – Systems and devices of radio engineering, radio navigation, radar and television.  
Mobile, fiber-optic communication systems**

**DISSERTATION ABSTRACT FOR THE DOCTOR OF PHILOSOPHY DEGREE  
(PhD) OF TECHNICAL SCIENCES**

**Tashkent – 2024**

**The theme of the dissertation of a doctor of philosophy (PhD) of technical sciences was registered by the Higher Attestation Commission under the Ministry of Higher Education, Science and Innovations of the Republic of Uzbekistan under number B2023.3.PhD/T3937.**

The dissertation has been prepared at Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi.

The abstract of the dissertation is posted in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) on the Scientific Council website [www.tuit.uz](http://www.tuit.uz) and on the website of “ZiyoNet” Information and Educational portal [www.ziyo.net](http://www.ziyo.net).

<b>Scientific adviser:</b>	<b>Khujamatov Halimjon Ergashevich</b> Doctor of Technical Sciences, Associate Professor
<b>Official opponents:</b>	<b>Davronbekov Dilmurod Abdujalilovich</b> Doctor of Technical Sciences, Professor <b>Djabborova Muattar Anvarjonovna</b> Doctor of Philosophy of Technical Sciences
<b>Leading organization:</b>	<b>Tashkent State Transport University</b>

The defense of the thesis will held on \_\_\_\_\_ “\_\_\_\_”, 2024 year at \_\_\_\_ hours at the meeting of the Scientific Council DSc.13/30.12.2019.T.07.02 at the Tashkent University of Information Technologies (Address: 100084, Tashkent city, Amir Temur street, 108. Tel.: (99871) 238-64-15; e-mail: [tuit@tuit.uz](mailto:tuit@tuit.uz)).

The dissertation could be reviewed in the Information Resource Centre of Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi. (registration number №\_\_\_\_\_). (Address: 100084, Tashkent city, Amir Temur street., 108. Tel.: (99871) 238-64-15).

The abstract of dissertation is distributed on “\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2024.  
(protocol at the register №\_\_, on “\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2024).

**B.Sh.Makhkamov**  
Chairman of the Scientific Council  
awarding scientific degrees, Doctor of  
Economic Sciences, Professor

**M.S.Saitkamolov**  
Scientific secretary of the Scientific  
Council awarding scientific degrees,  
Doctor of Economic Sciences

**D.Y.Irgasheva**  
Chairman of the Academic Seminar at the  
Scientific Council awarding scientific  
degrees, Doctor of Technical Sciences,  
Professor

## INTRODUCTION (abstract of PhD dissertation)

**The aim of the research work** is to develop method and models for effective management of the frequency spectrum in the cognitive radio communication system.

**The object of the research work** is hardware and software for spectrum sensing and decision-making on the use of spectrum in a cognitive radio communication system.

**The scientific novelty of the research work** are as follows:

the model has been developed that makes it possible to research in real time the processes of channel occupation and release, identify unoccupied parts of the spectrum, add and remove noise to signals of radio communication systems, and also carry out multi-channel spectrum sensing for the secondary using of the radio frequency spectrum based on the cognitive cycle;

the model has been developed to improve the efficiency of using radio frequencies, allowing flexible adjustment of the threshold for detecting signals of cognitive radio communication systems based on the probability of a false signal and the inverse Q-function;

the two-stage method has been developed to effectively make decisions about the state of the spectrum and reduce interference from the primary network in cognitive radio communication systems based on double threshold and machine learning;

the hybrid model has been developed to improve the accuracy of determining the radio frequency spectrum and a binary classifier of channel state based on machine learning algorithms.

### **Implementation of research results.**

Based on the results of method and models of effective management of the frequency spectrum in cognitive communication systems:

the hybrid model, that improves the accuracy of determining the radio frequency spectrum and a binary classifier of channel state based on machine learning algorithms has been introduced at enterprises under the Ministry of Digital Technologies of the Republic of Uzbekistan, in particular, the Center of Electromagnetic Compability SUE (Decision of the Ministry of Digital Technologies dated July 20, 2023 No. 34-8/4933 reference number). As a result of scientific research, it was possible to increase the efficiency of detecting unlicensed user devices in the allocated radio frequency bands to 10-15%, to increase the accuracy of detecting the appropriation of radio frequencies in the bands allocated to wireless communication services to 0.9995;

the two-stage method, which allows to effectively make decisions about the state of the spectrum and reduce interference from the primary network in cognitive radio communication systems based on double threshold and machine learning has been introduced to UNICON.UZ SUE (Decision of the Ministry of Digital Technologies dated July 20, 2023 No. 34-8/4933 reference number). As a result of scientific research, the analysis of the use of the radio frequency spectrum in the bands allocated to communication services, the use of the radio spectrum, and the

improvement of the state of data collection about individual networks and radio stations, the accuracy of determining the utilization of radio frequencies in the bands allocated to wireless communication services up to 0.9995 an opportunity to increase has been created;

the model, that makes it possible to research in real time the processes of channel occupation and release, identify unoccupied parts of the spectrum, add and remove noise to signals of radio communication systems, and also carry out multi-channel spectrum sensing for the secondary using of the radio frequency spectrum based on the cognitive cycle and the model, that allows to improve the efficiency of using radio frequencies, allowing flexible adjustment of the threshold for detecting signals of cognitive radio communication systems based on the probability of a false signal and the inverse Q-function have been introduced to ONIX GROUP LLC (Decision of the Ministry of Digital Technologies dated July 20, 2023 No. 34-8/4933 reference number). As a result, it was possible to exchange the data streams produced by video cameras and sensors through a wireless network through the parts of the licensed radio frequency bands that are not occupied by the main users, and by introducing the models at the communication level of the Smart Home system, it was possible to increase the efficiency of using the radio frequency spectrum to 5-8%.

**Structure and volume of the dissertation.** The dissertation consists of three chapters, conclusion, list of references, annexes. The volume of dissertation is 120 pages.

**E'LON QILINGAN ISHLAR RO'YXATI**  
**СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ**  
**LIST OF PUBLISHED WORKS**

**I bo'lim (Часть I; Part I)**

1. Khujamatov H., Khasanov D., Reypnazarov E., Fayzullaev B. WSN-based research the monitoring systems for the solar power stations of telecommunication objects. // IIUM Engineering Journal, Vol. 22, No. 2, 2021. (05.00.00; №6).

2. Tanwar, S., Khujamatov, H., Turumbetov, B., Reypnazarov, E., Allamuratova, Z. Designing and Calculating Bandwidth of the LTE Network for Rural Areas // International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology, 2022, 12(2), p.p. 437–445 (OAK (3) Scopus 1,9).

3. Khalimjon Khujamatov, Nurshod Akhmedov, Ernazar Reypnazarov, Doston Khasanov, Amir Lazarev. Device-to-device and millimeter waves communication for 5G healthcare informatics // Blockchain Applications for Healthcare Informatics Beyond 5G, 2022, Pages 181-211. (OAK (3) Scopus).

4. Khujamatov Khalim, Ernazar Reypnazarov, Nurshod Akhmedov, Doston Khasanov. Existing Technologies and Solutions in 5G-Enabled IoT for Industrial Automation // Blockchain for 5G-Enabled IoT Robotics // Springer Nature Switzerland AG 2021, pp 181-221. (OAK (3) Scopus).

5. Khujamatov H., Reypnazarov E., Khasanov D., Akhmedov N. IoT, IIoT, and Cyber-Physical Systems Integration. // Emergence of Cyber Physical System and IoT in Smart Automation and Robotics, Springer Nature Switzerland AG 2021. (OAK (3) Scopus).

6. Ilkhom Siddikov, Halimjon Khujamatov, Khasanov Doston, Reypnazarov Ernazar. IoT and Intelligent Wireless Sensor Network for Remote Monitoring Systems of Solar Power Stations. // World Conference Intelligent System for Industrial Automation, WCIS 2020. Springer, Cham, 2021. -P. 186–195. (OAK (3) Scopus 0,9).

7. Halim Khujamatov, Doston Khasanov, Ernazar Reypnazarov, Nurshod Akhmedov. Industry Digitalization Concepts with 5G-based IoT // 2020 International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT), Tashkent, Uzbekistan-2020. (3) Scopus (OAK rayosatining qarori 30.10.2020 yil №368).

8. Ilkhom Siddikov, Doston Khasanov, Halim Khujamatov, Ernazar Reypnazarov. Communication Architecture of Solar Energy Monitoring Systems for Telecommunication Objects // International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT), Tashkent, Uzbekistan. (3) Scopus (OAK rayosatining qarori 30.10.2021 yil №525).

9. Halim Khujamatov, Ilkhom Siddikov, Ernazar Reypnazarov, Doston Khasanov. Research of Probability-Time Characteristics of the Wireless Sensor Networks for Remote Monitoring Systems // International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT), Tashkent, Uzbekistan. (3) Scopus (OAK rayosatining qarori 30.10.2021 yil №525).

10. Ilkhom Siddikov, Halim Khujamatov, Ernazar Reypnazarov, Doston Khasanov. CRN and 5G based IoT: Applications, Challenges and Opportunities // International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT), Tashkent, Uzbekistan. (3) Scopus (OAK rayosatining qarori 30.10.2021 yil №525).

11. H Khujamatov, A Lazarev, N Akhmedov, E Reypnazarov, A Bekturdiyev. Methods for Automatic Identification of Vehicles in the ITS System // International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT), Tashkent, Uzbekistan. (3) Scopus (OAK rayosatining qarori 30.10.2021 yil №525).

12. Kh.E.Khujamatov, Khaleel Ahmad, D.T. Khasanov, E.N. Reypnazarov. Markov Chain Based Modeling Bandwith State of the Wireless Sensor Network of Monitoring System // “International Journal of Advanced Science and Technology” Science and Engineering Research Support Society. Australia. 2020, №4 –pp.4889-4903 (OAK (23) Scientific Journal Impact Factor 6,8).

13. E.Reypnazarov. Analysis of the Frequency Allocation Experience in the World and Uzbekistan for 5G-based Systems. International Journal for Innovative Engineering and Management Research, Volume 11, Issue 03, Pages: 79-89. (OAK (23) Scientific Journal Impact Factor 5,1).

14. Khujamatov Kh.E., Reypnazarov E.N., Khasanov D.T., Nurullaev E.E., Sobirov Sh.O. Evaluation of characteristics of wireless sensor networks with analytical modeling // “Bulletin of TUIT: Management and Communication Technologies” International science-technical journal. Tashkent. 2020, vol. 3, Article 2. -pp. 1-9. (05.00.00; №31).

15. Reypnazarov Y.N. Kognitiv radioaloqa tizimida spektrni zondlashning energiyani aniqlashga asoslangan usullarini tadqiq qilish. “Muhammad al-Xorazmiy avlodlari” Ilmiy-amaliy va axborot-tahliliy jurnali. Toshkent. 2023, №2 (24), - B. 237-241. (05.00.00; №10).

16. Reypnazarov Y.N. Kognitiv radioaloqa tizimida spektrni zondlashning ikkita chegaraviy qiymatli va mashinali o‘qitishga asoslangan usuli. “Muhammad al-Xorazmiy avlodlari” Ilmiy-amaliy va axborot-tahliliy jurnali. Toshkent. 2023, №3 (25), - B. 169-175. (05.00.00; №10).

## **II bo‘lim (Часть II; PartII)**

17. Kh.Khujamatov, D. Khasanov, E. Reypnazarov, N. Akhmedov. Networking and Computing in Internet of Things and Cyber-Physical Systems // The 14th IEEE International Conference Application of Information and Communication Technologies, 07-09 October 2020, Tashkent, Uzbekistan. (Scopus).

18. E.Reypnazarov. Kognitiv radio tarmoqlarda spektrni sezish usullari va sezishni amalga oshirishdagi muammolar tahlili. “Raqamli texnologiyalar: sohalarda amaliy joriy etishning yechimlari va muammolari” Xalqaro ilmiy-texnik anjumani ma’ruzalar to‘plami. Toshkent-2022. -B.206-209.

19. I.Siddikov, D.Khasanov, H.Khujamatov, E.Reypnazarov. Research of Basic Characteristics of Wireless Sensor Networks for Energy Monitoring System. 4th International Conference on Futuristic Trends in Networks and Computing Technologies (FTNCT-2021), Nirma University, India-2021. - P. 315-329. (Scopus)

20. E.Reypnazarov, H.Khujamatov, D.Khasanov, Z.Allamuratova. Analysis of Hardware and Software Tools for Implementation of Cognitive Radio Networks. International Conference on Information Science and Communications Technologies ICISCT 2022, Tashkent, Urgench, Uzbekistan - 2022. 6 p. (Scopus)

21. E.Reypnazarov, H.Khujamatov, D.Khasanov, Z.Allamuratova. Research of Energy Detection Method in Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks. International Conference on Information Science and Communications Technologies ICISCT 2022, Tashkent, Urgench, Uzbekistan - 2022. 6 p. (Scopus)

22. I.Siddikov, H.Khujamatov, A.Temirov, E.Reypnazarov, D.Khasanov. Analysis of Energy Efficiency Indicators in IoT-based Systems. International Conference on Information Science and Communications Technologies ICISCT 2022, Tashkent, Urgench, Uzbekistan - 2022. 6 p. (Scopus)

23. I.Siddikov, H.Khujamatov, D.Khasanov, E.Reypnazarov, A.Iminov. Data Transfer Methods and Algorithms in Wireless Sensor Networks for IoT-based Remote Monitoring System of Hybrid Energy Supply Sources. International Conference on Information Science and Communications Technologies ICISCT 2022, Tashkent, Urgench, Uzbekistan - 2022. 6 p. (Scopus)

24. I.Siddikov, H.Khujamatov, D.Khasanov, E.Reypnazarov, A.Iminov. Analyze Wireless Sensor Network Structures for Intellectual Monitoring System. International Conference on Information Science and Communications Technologies ICISCT 2022, Tashkent, Urgench, Uzbekistan - 2022. 6 p. (Scopus)

25. E.Reypnazarov. Kognitiv radio tarmoqlar uchun MAC sathi protokollarini tahlil qilish. "Iqtisodiyot tarmoqlarining innovatsion rivojlanishida axborot-kommunikatsiya texnologiyalarining ahamiyati" Respublika ilmiy-texnik anjumanining ma'ruzalar to'plami. 2-qism. Toshkent-2022. -B.47-49.

26. B.Turumbetov, E.Reypnazarov. Methods for protecting radio signals from active and passive interference. "Ta'lim, fan va ishlab chiqarish integratsiyasida innovatsion texnologiyalarni qo'llash – mamlakat taraqqiyotining muhim omili" mavzusidagi XV respublika ilmiy-amaliy konferensiyasi materiallari. IV qism. Samarqand-2018. -P.168-170.

27. Ye.Reypnazarov. Radiosignallarning ko'p nurli tarqalishli aloqa kanallarida kanallararo xalaqitlar ta'sirini kamaytirish masalasi. "Muhammad al-Xorazmiy izdoshlari" mavzusidagi Respublika ilmiy-texnikaviy anjumani materiallari. Urganch-2018. -B.475-477.

28. T.Rakhimov, E.Reypnazarov. Problematics of using a multi-threshold decoder. "Muhammad al-Xorazmiy izdoshlari" mavzusidagi Respublika ilmiy-texnikaviy anjumani materiallari. Urganch-2018. -P.473-475.

29. Reypnazarov E., Xujamatov X. Radiochastota spektridan dinamik foydalanishda kognitiv radio imkoniyatlarini tahlil qilish. "Matematik modellashtirish va axborot texnologiyalarining dolzarb masalalari" xalqaro ilmiy-amaliy anjuman tezislari to'plami (To'plam №3). Nukus-2023. -P.216-217.

30. Reypnazarov E. Radiochastota spektrini zondlashda ikkita chegaraviy qiymatli energiyani aniqlash usulini tahlil qilish. Akademik T.D. Radjaboning xotirasiga bag'ishlangan "Zamonaviy ilm-fanning dolzarb muammolari, yutuqlari

va innovatsiyalari” mavzusidagi ilmiy va ilmiy-texnik anjumani materiallari. Toshkent-2023. -P.115-117.

31. E.Reypnazarov. A Review of Research on the Application of Machine Learning in Spectrum Sensing. International Conference on “Advance Research in Humanities, Sciences and Education”. Boston, USA – 2023. - P. 296-302

32. E.Reypnazarov. Analysis of Dynamic Spectrum Access Methods. International Conference on “Advance Research in Humanities, Sciences and Education”. Berlin, Germany – 2023. - P. 77-83

33. E.Reypnazarov, H.Khujamatov, D.Das, D.Khasanov, E.Nurullaev, T.Babazhanova. Research of the application of blockchain and smart contract technologies in spectrum management and trading in cognitive radio networks. XV International Online Conference “Improving Farming Productivity and Agroecology – Ecosystem Restoration” (IPFA 2023). Dnipro, Ukraine – 2023. In E3S Web of Conferences, Vol. 452, 03005. - 9 p. (Scopus)

34. E.Reypnazarov, H.Khujamatov, D.Das, A.Shakhobiddinov, D.Khasanov, T.Babazhanova. Modeling and research of the operation of cognitive radio networks. XV International Online Conference “Improving Farming Productivity and Agroecology – Ecosystem Restoration” (IPFA 2023). Dnipro, Ukraine – 2023. In E3S Web of Conferences, Vol. 452, 03006. - 9 p. (Scopus)

35. X.Xujamatov, Y.Reypnazarov, N.Musaboyeva, J.Aripov. Simsiz sensor tarmoqlarining ishonchligini tadqiq qilish dasturi // O‘zbekiston Respublikasi Adliya vazirligi huzuridagi Intellektual mulk agentligi Elektron hisoblash mashinalari uchun yaratilgan dasturning rasmiy ro‘yxatdan o‘tkazilganligi to‘g‘risidagi guvohnoma. №DGU 14860. 05.03.2022.

36. Y.Reypnazarov. Kognitiv radio tarmoqlarda radio chastota spektrini sezish va tahlil qilish dasturi // O‘zbekiston Respublikasi Adliya vazirligi huzuridagi Intellektual mulk agentligi Elektron hisoblash mashinalari uchun yaratilgan dasturning rasmiy ro‘yxatdan o‘tkazilganligi to‘g‘risidagi guvohnoma. №DGU 18783. 18.09.2022.

37. Y.Reypnazarov, X.Xujamatov, D.Hasanov. Kognitiv radio tarmoqda spektrni sezish uchun energiyani aniqlash chegaraviy qiymatini topish dasturi // O‘zbekiston Respublikasi Adliya vazirligi huzuridagi Intellektual mulk agentligi Elektron hisoblash mashinalari uchun yaratilgan dasturning rasmiy ro‘yxatdan o‘tkazilganligi to‘g‘risidagi guvohnoma. №DGU 18784. 18.09.2022.

38. Y.Reypnazarov, X.Xujamatov, D.Hasanov. Kognitiv radio tarmoqning ishlash jarayonini simulyatsiyalash dasturi // O‘zbekiston Respublikasi Adliya vazirligi huzuridagi Intellektual mulk agentligi Elektron hisoblash mashinalari uchun yaratilgan dasturning rasmiy ro‘yxatdan o‘tkazilganligi to‘g‘risidagi guvohnoma. №DGU 18785. 18.09.2022.

Avtoreferat “Muhammad al-Xorazmiy avlodlari” Ilmiy-amaliy va axborot tahliliy jurnali tahriryatida tahrirdan o‘tkazildi va o‘zbek, rus, ingliz tillari matnlarni mosligi tekshirildi.

**Bosmaxona litsenziyasi:**



**9338**

Bichimi: 84x60 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. «Times New Roman» garniturası.  
Raqamli bosma usulda bosildi.  
Shartli bosma tabog‘i: 2,75. Adadi 100 dona. Buyurtma № 25/23.

Guvohnoma № 851684.  
«Tipograff» MCHJ bosmaxonasida chop etilgan.  
Bosmaxona manzili: 100011, Toshkent sh., Beruniy ko‘chasi, 83-uy.