

ТОШКЕНТ АХБОРОТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ УНИВЕРСИТЕТИ
ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.13/30.12.2019.Т.07.02 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ

ТОШКЕНТ АХБОРОТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ УНИВЕРСИТЕТИ
САМАРҚАНД ФИЛИАЛИ

МИРЗОҚУЛОВ ҲОТАМ БАХТИЁР ЎҒЛИ

МЕТАМАТЕРИАЛЛАР АСОСИДА АНТЕННА-ФИДЕР
ҚУРИЛМАЛАРИНИНГ САМАРАДОРЛИГИНИ ОШИРИШ
УСУЛЛАРИ ВА МОДЕЛЛАРИ

05.04.02 – Радиотехника, радионавигация, радиолокация ва телевидение тизимлари ва қурилмалари. Мобиль, толали оптик алоқа тизимлари

ТЕХНИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ

**Техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси
автореферати мундарижаси**

**Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD) по
техническим наукам**

**Contents of dissertation abstract of the doctor of philosophy (PhD)
on technical sciences**

Мирзокулов Хотам Бахтиёр ўғли

Метаматериаллар асосида антенна-фидер қурилмаларининг самарадорлигини
ошириш усуллари ва моделлари.....3

Мирзокулов Хотам Бахтиёр угли

Методы и модели повышения эффективности работы антенно-фидерных
устройств на основе метаматериалов.....21

Mirzokulov Khotam Bakhtiyor ugli

Methods and models for improving the efficiency of antenna-feeder devices based
on metamaterials.....39

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ

List of published works.....43

ТОШКЕНТ АХБОРОТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ УНИВЕРСИТЕТИ
ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.13/30.12.2019.Т.07.02 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ

ТОШКЕНТ АХБОРОТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ УНИВЕРСИТЕТИ
САМАРҚАНД ФИЛИАЛИ

МИРЗОҚУЛОВ ҲОТАМ БАХТИЁР УГЛИ

МЕТАМАТЕРИАЛЛАР АСОСИДА АНТЕННА-ФИДЕР
ҚУРИЛМАЛАРИНИНГ САМАРАДОРЛИГИНИ ОШИРИШ
УСУЛЛАРИ ВА МОДЕЛЛАРИ

05.04.02 – Радиотехника, радионавигация, радиолокация ва телевидение тизимлари ва қурилмалари. Мобиль, толали оптик алоқа тизимлари

ТЕХНИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ

Тошкент – 2020

Техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертациясининг мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2020.2.PhD/Т1617 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Тошкент ахборот технологиялари университети Самарқанд филиалида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгаш веб-саҳифасида (www.tuit.uz) ва «ZiyoNet» ахборот-таълим порталида (www.ziynet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар:

Салахитдинов Амритдин Нуриtdинович
физика-математика фанлари номзоди, доцент

Расмий оппонентлар:

Писецкий Юрий Валеревич
техника фанлари доктори, доцент

Шахобиддинов Алишер Шопатхиддинович
техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD)

Етакчи ташкилот:

И.Каримов номидаги Тошкент давлат техника университети

Диссертация ҳимояси Тошкент ахборот технологиялари университети ҳузуридаги DSc.13/30.12.2019.Т.07.02 рақамли Илмий кенгашнинг 2020 йил «25» ноябр соат 14⁰⁰ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100202, Тошкент шаҳри, Амир Тему́р кўчаси, 108-уй.Тел.: (99871) 238-65-44; факс: (99871) 238-65-52; e-mail: tuit@tuit.uz).

Диссертация билан Тошкент ахборот технологиялари университети Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (2626 рақам билан рўйхатга олинган). (Манзил: 100202, Тошкент, Амир Тему́р кўчаси, 108-уй.Тел.:(+99871) 238-65-44).

Диссертация автореферати 2020 йил «14» ноябр да тарқатилди.
(2020 йил «13» ноябр даги 5 рақамли реестр баённомаси)



И.Х.Сиддиков
Илмий даражалар берувчи
илмий кенгаш раиси,
т.ф.д., профессор

Х.Э. Хужаматов
Илмий даражалар берувчи илмий
кенгаш илмий котиби, PhD, доцент

А.А.Абдуқаюмов
Илмий даражалар берувчи илмий
кенгаш қўшидаги илмий семинар
раиси, т.ф.д., профессор

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳонда антенна-фидер қурилмаларини ишлаб чиқиш ва амалиётга қўллашда уларнинг ўлчамларини кичрайтириш, узатиш масофасини сезиларли даражада ошириш ҳамда белгиланган ўлчамларда йўналиш диаграммасини назорат қилишга катта эътибор қаратилмоқда. Ушбу йўналишда, жумладан, антенна-фидер қурилмаларининг самарадорлигини оширишда, метаматериаллар, композит материаллар ва наноматериаллар асосида антенна моделларини ишлаб чиқиш, мавжуд антенналарнинг параметрларини яхшилаш ҳамда наноантенналарни яратишга алоҳида эътибор қаратилмоқда. Бу борада ривожланган мамлакатларда, жумладан, АҚШ, Буюк Британия, Хитой, Франция, Япония, Ҳиндистон, Жанубий Корея ва Россия Федерациясида турли хил композицион материаллардан фойдаланиб антенна қурилмалари самарадорлигини ошириш муҳим вазифалардан бири ҳисобланмоқда.

Жаҳонда радиоалоқа тизимларини такомиллаштириш, жумладан, антенна-фидер қурилмаларининг йўналиш диаграммаларини бошқариш, ўлчамларини кичрайтириш ва узатиш масофасини оширишга қаратилган қатор илмий тадқиқот ишлари олиб борилмоқда. Ушбу соҳада, жумладан, антенна-фидер қурилмалари самарадорлигини ошириш учун янги турдаги материалларни излаш, нанокompозит материалларни наноантенналарда қўллашнинг назарий асосларини яратиш, амалий ечимларини ишлаб чиқиш, метаматериаллар ва юпқа қатламли плёнкалар асосида патч антенналарни такомиллаштириш, ҳажмини кичрайтириш усуллари ва моделларини ишлаб чиқишга алоҳида эътибор қаратилмоқда. Шу билан бирга метаматериаллар асосида антенна-фидер қурилмалари ишлаш самарадорлигини ошириш усуллари ва моделларини ишлаб чиқиш долзарб ҳисобланмоқда.

Республикамизда радиоалоқа ва ахборот технологиялари соҳасини янада такомиллаштиришга, мобил алоқа тизимларининг қамров ҳудудини оширишга, маълумот узатиш тезлиги ва сифатини таъминлаш тизимларини ишлаб чиқишга қаратилган кенг қамровли чора-тадбирлар амалга оширилмоқда. 2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида, жумладан «... иқтисодиёт, ижтимоий соҳа, бошқарув тизимига ахборот-коммуникация технологияларини жорий этиш, ...мобиль алоқа операторларининг тармоқлари қамрови ҳудудларини кенгайтириш»¹ вазифалари белгиланган. Мазкур вазифаларни амалга ошириш, жумладан, симсиз алоқа тизимларининг қамров ҳудудини кенгайтиришда антенна-фидер қурилмаларининг электромагнит тўлқинларни узатиш қобилиятини ошириш усуллари ва моделларини яратиш, мавжуд антенна-фидер қурилмаларининг

¹ Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида» ги Фармони

самарадорлигини ошириш учун метаматериаллар ва нанокompозитларни ишлаб чиқиш муҳим вазифалардан бири ҳисобланади.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон “Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида”ги Фармони, 2019 йил 22 майдаги ПҚ-4329-сон “Ўзбекистон Республикаси аҳоли пунктларида телекоммуникация инфратузилмасини жадал ривожлантириш чора-тадбирлари тўғрисида”ги Қарорлари ҳамда мазкур фаолиятга тегишли норматив-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишда ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги. Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялар ривожланишининг IV «Ахборотлаштириш ва ахборот-коммуникация технологияларини ривожлантириш» устувор йўналиши доирасида бажарилган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Антенна-фидер қурилмалари самарадорлигини ошириш усуллари ва моделлари, метаматериалларни яратишнинг назарий ва амалий асослари, юпқа плёнкали ва нанокompозит материалларнинг хусусиятлари ҳамда уларнинг радиоалоқа соҳасида қўлланилиши бўйича кенг қамровли тадқиқотлар олиб борилмоқда. Бундай усуллар ва моделларни яратишга йўналтирилган масалалар Springer, IEEE Xplore, eLibrary, Web of Science, Elsevier нашриётларининг маълумотлар базасига киритилган, асосан IEEE Xplore, Scopus ва Web of Science рўйхатидаги илмий журналларда охириги йилларда чоп этилган мақолалар ўрганилган.

Метаматериалларни яратиш, уларнинг ўзига хос хусусиятларини ўрганиш ва турли соҳаларга тадбиқ қилиш муаммоларига жаҳонда кўплаб олимларнинг ишлари бағишланган. Ушбу тадқиқот йўналишига В.Г.Веселаго, J.B.Pendry, D.R.Smith, H.N.Engghetta, R.W.Ziolkowski, А.Н.Лагарьков, В.Слюсарь, А.К. Сарычев, А.Д. Селезнев, С.Caloz, X. Zhang, П.А. Белов, В.М. Шалаев, Ю.С.Кившар, А.Грановский, Е.А.Ганьшина, А.Н.Юрасов ва бошқа таниқли хорижий олимларнинг илмий ишлари бағишланган. Шунингдек, белгиланган муаммони тадқиқ қилиш масалаларига республикамиз олимлари Х.К. Арипов, А.М. Абдуллаев, А.А. Абдуазизов, А.М. Назаров, Т.Г. Рахимов, Д.Н. Ликонцев, В.А. Губенко, А.Ш. Шахобиддинов ва бошқаларнинг илмий ишлари бағишланган.

Олиб борилган таҳлил натижалари шуни кўрсатдики, юпқа плёнкали ва нанокompозит материаллар ёрдамида кичик ҳажмли метаматериалларни яратиш, метаматериаллар асосида антенна-фидер қурилмаларининг самарадорлигини ошириш усуллари ва моделларини ишлаб чиқиш ҳамда амалиётга жорий этиш масалалари етарли даражада ўрганилмаган.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган олий таълим муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Муҳаммад ал-Хоразмий номидаги Тошкент ахборот

технологиялари университети илмий тадқиқот ишлари режасининг НИР-2019-6 “Электромагнит нурланиш энергиясидан симсиз датчикларни электр қувватланиш тизимини ишлаб чиқиш” (2019-2020), №БВ-А3-027 “Мустақил энергия манбали бинонинг электр таъминотини бошқариш тизимини ишлаб чиқиш ва жорий этиш” (2017-2018) лойиҳалари доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади антенна-фидер қурилмаларининг самарадорлигини нанокөмпозит ва метаматериалларда кузатиладиган физик ҳодиса ҳамда жараёнларни қўллаш орқали оширишдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

радиотехника соҳасидаги ускуна ва қурилмаларда ишлатиладиган юпка пленкалар, композицион материаллар ҳамда метаматериаллардаги физик ҳодисаларни таҳлил қилиш;

антенна-фидер техникаси ва наноэлектроника соҳасида қўлланиладиган нанокөмпозитлардаги физик ҳодисалар ҳамда жараёнларни тадқиқ қилиш;

көнг частота диапазонида антенна-фидер қурилмалари характеристика ва параметрларини яхшилаш хусусиятига эга бўлган икки марта манфий параметрли ($\epsilon(\omega) < 0$, $\mu(\omega) < 0$) метаматериалнинг математик моделини ишлаб чиқиш;

антенна-фидер қурилмаларининг ишлаш самарадорлигини метаматериаллар асосида ошириш усулини ишлаб чиқиш;

көнг частота диапазонида метаматериалларни қидириш усулини ишлаб чиқиш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида нанокөмпозит ва метаматериаллар асосида ишлаш самарадорлиги оширилган антенна-фидер қурилмалари олинган.

Тадқиқотнинг предмети антенна-фидер қурилмаларининг физикавий-техник параметрларини ўрганиш ҳамда самарадорлигини нанокөмпозит ва метаматериаллар асосида ошириш жараёни ташкил этади.

Тадқиқотнинг усуллари. Тадқиқот жараёнида математик моделлаштириш, электр занжирларнинг тақсимланган параметрларини ҳисоблаш, имитацион моделлаштириш ва очик тизимларнинг операцион усулларидадан фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

антенна-фидер қурилмаларининг параметр ва характеристикаларини такомиллаштирувчи тақсимланган параметрли метаматериалнинг математик модели ишлаб чиқилган;

алоқа линияси элементлари асосида тақсимланган параметрли метаматериалнинг наъмуналари яратилган;

антенна-фидер қурилмаларининг ишлаш самарадорлигини тақсимланган параметрли метаматериал ёрдамида ошириш усули ишлаб чиқилган;

радио ва оптик частота диапазонларида ишловчи тақсимланган параметрли метаматериалларни қидириш усули ишлаб чиқилган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

экваториал Керр эффекти асосида металл-диэлектрик нанокомпозитларнинг магнитооптик спектрлари ҳосил қилинган ва амалий тадқиқ этилган;

антенна-фидер қурилмалари ишлаш самарадорлигини оширишда қўлланиладиган метаматериал параметрларини ҳисоблаш учун дастурий воситаси ишлаб чиқилган;

турли ўлчамли метаматериал намуналари яратилган ва улар асосида антенна-фидер қурилмаларининг самарадорлиги оширилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги назарий ва амалий натижаларнинг бир бирига мослиги, тизимли таҳлил воситалари, математик статистика ва электромагнит нурланиш назарияси, олинган натижаларни умумқабул қилинган мезонлар асосида қиёсий солиштириш орқали изоҳланган.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти нанокомпозитларнинг хусусиятларини кенг спектрда ўрганишга асосланган усул, антенна-фидер қурилмалари характеристика ва параметрларини яхшилаш хусусиятига эга бўлган метаматериалнинг математик модели, антенна-фидер қурилмалари ишлаш самарадорлигини метаматериаллар асосида ошириш усули, турли частота диапазонида метаматериалларни қидириш учун фойдаланиладиган усул билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти метаматериал параметрларини аниқлашда ишлатиладиган дастурий воситанинг ишлаб чиқилганлиги, турли ҳажмдаги метаматериалларни яратилганлиги ҳамда улар асосида кенг частота диапазонида антенна-фидер қурилмаларининг электромагнит тўлқинларни узатиш қобилиятининг оширилганлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Метаматериаллар асосида антенна-фидер қурилмаларининг ишлаш самарадорлигини ошириш усуллари ва моделлари бўйича олинган натижалари асосида:

антенна-фидер қурилмаларининг параметр ва характеристикаларини такомиллаштирувчи тақсимланган параметрли метаматериалнинг математик модели ҳамда алоқа линиясининг элементлари асосида тақсимланган параметрларга эга метаматериалларнинг наъмуналари Ахборот технологиялари ва коммуникацияларини ривожлантириш вазирлиги тасарруфидаги корхоналарда, хусусан “Ўзбектелеком” АК “Ўзмобиайл” филиали Самарқанд ҳудудий боғламасида жорий этилган (Ахборот технологиялари ва коммуникацияларини ривожлантириш вазирлигининг 2020 йил 17 июлдаги 33-8/4096-сон маълумотномаси). Илмий тадқиқот натижасида мобил алоқа тизимларининг 1,7-2,1 ГГц частоталарда ишловчи базавий станциялари антенна-фидер қурилмалари ишлаш самарадорлигини 20-25 % гача ошириш имкони яратилган;

радио ва оптик частота диапазонларида ишловчи тақсимланган параметрли метаматериалларни қидириш ҳамда антенна-фидер

қурилмаларининг ишлаш самарадорлигини тақсимланган параметрли метаматериал ёрдамида ошириш усуллари Ахборот технологиялари ва коммуникацияларини ривожлантириш вазирлиги тасарруфидаги корхоналарда, хусусан “UMS” МЧЖ Самарқанд шаҳар хизмат кўрсатиш марказида жорий этилган (Ахборот технологиялари ва коммуникацияларини ривожлантириш вазирлигининг 2020 йил 17 июлдаги 33-8/4096-сон маълумотномаси). Илмий тадқиқот натижасида мобил алоқа тизимларининг 1,7-2,1 ГГц частоталарда ишловчи базавий станциялари антенна-фидер қурилмалари ишлаш самарадорлигини 25 % гача ошириш имкони яратилган;

антенна-фидер қурилмаларининг ишлаш самарадорлигини тақсимланган параметрли метаматериал ёрдамида ошириш ҳамда радио ва оптик частота диапазонларида ишловчи тақсимланган параметрли метаматериалларни қидириш усуллари Ахборот технологиялари ва коммуникацияларини ривожлантириш вазирлиги тасарруфидаги корхоналарда, хусусан “Turon telecom” савдо белгиси остида “Dildora-F” хусусий корхонасида жорий этилган (Ахборот технологиялари ва коммуникацияларини ривожлантириш вазирлигининг 2020 йил 17 июлдаги 33-8/4096-сон маълумотномаси). Илмий тадқиқот натижасида телерадиоэшиттириш хизматларини тақдим этишда ишлатиладиган 2,3-2,5 ГГц частота диапазонида ишловчи GT-5527100D узатгичининг MMDS антенна қурилмалари ишлаш самарадорлигини 15-20 % гача ошириш имкони яратилган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Тадқиқот натижалари адабиётлар рўйхатига киритилган 6 та халқаро ва 3 та республика илмий-амалий конференцияларида муҳокама қилинган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Тадқиқот мавзуси бўйича жами 18 та илмий ишлар, улардан 7 та мақола Ўзбекистон Республикаси ОАК тавсия этган журналларда, шу жумладан 5 та хорижий, 2 та республика миқёсидаги журналларда чоп этилган ва 1 та ЭҲМ учун яратилган дастурий воситани қайд қилиш гувоҳномаси олинган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация иши кириш, тўртта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертациянинг ҳажми 106 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати асослаб берилган, тадқиқотнинг Ўзбекистон Республикаси фан ва технологиялари тараққиётининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, тадқиқотнинг мақсад ва вазифалари белгилаб олинган, тадқиқот объекти ва предмети аниқланган, натижаларнинг ишончлилиги асослаб берилган, уларнинг назарий ва амалий аҳамияти очиб берилган, тадқиқот натижаларини амалда жорий қилиш ҳолати, нашр этилган ишлар ва диссертациянинг тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг «**Магнето-оптик асбоблар ва қурилмаларда юпқа плёнкалар. Метаматериаллар - антенна техникаси учун янги сунъий**

материаллар» деб номланган биринчи боби радиотехника ва ахборот коммуникация технологиялари соҳаларида талаб катта бўлган замонавий юпқа қатламли, композит материаллар ва метаматериаллардаги физик ҳодиса ва жараёнларни тадқиқ қилишга бағишланган. Бугунги кунда телекоммуникация соҳасида, метаматериаллар деб номланган янги сунъий материалларга катта эътибор қаратилмоқда. Ушбу материаллар ноёб электрофизик ва электродинамик хусусиятларга эга бўлиб, уларни антенна техникасида қўллаш мумкинлиги кўрсатиб ўтилган.

Юпқа плёнкали, композит ва магнето-оптик материаллар ҳамда метаматериаллардан радиотехника қурилмалари ва ускуналарини яратишда фойдаланишнинг ўзига хос хусусиятлари келтирилган. Ўтказилган адабиётлар таҳлили, антенна-фидер қурилмаларининг асосий муаммоси бу уларнинг миниатюризацияси ва ишлаш самарадорлигини оширишда эканлигини, электромагнит тўлқин оптимал тарқалиши учун антенна-фидер қурилмаларини ишлаб чиқишда турли материаллардан фойдаланиш самарали эканлигини кўрсатди. Антенна ва антенна решеткалари миниатюризациясида айримчекловлар юқори частота (30-300 МГц) ва ультра юқори частоталарда (0,3-3 ГГц) муаммога сабаб бўлиши мумкин. Шу сабабли кичик антенналарни яшашнинг янги концепция ва механизмларини ўрганиш, мавжуд антенналарнинг самарадорлигини ошириш усуллари ва моделларини ишлаб чиқиш истиқболли йўналиш ҳисобланади.

Тадқиқот давомида антенна-фидер қурилмаларининг ишлаш самарадорлигини метаматериаллар асосида оширишга алоҳида эътибор қаратилган. Ушбу бобда метаматериалларнинг ўзига хос хусусиятлари Максвелл тенгламаси ёрдамида тушунтириб берилган. Метаматериал хусусиятларининг ўзига хослиги диэлектрик ва магнит сингдирувчанлик параметрининг қийматлари нолга ёки манфий қийматга тенг бўлишидадир, бундай ҳолат табиий материалларда кузатилмайди. Шу билан бирга, метаматериал ва бошқа муҳит ўртасидаги чегарага тушаётган электромагнит тўлқинларнинг қайтиш ва ютилиш тартиби Л.И. Манделштам схемаси ёрдамида тушунтирилган.

Телекоммуникация технологиялари ва алоқа тизимлари учун қурилмалар яшашнинг асосларини ўрганиш мақсадида магнето-оптик ва электрооптик эффектлар таҳлил қилинган, хусусан экваториал магнитланиш пайтида бўйлама ва кўндаланг Фарадай ва Фохт эффектлари батафсил кўриб чиқилган. Металл-диэлектрик нанокомпозитларда экваториал Керр эффектнинг аҳамияти кўриб чиқилган. Шу билан бирга ушбу бобда наноэлектроникада яратилаётган янги интеграл нанооптика деб номланган йўналиш ҳақида, унинг асосида нанотехнология ва антенна-фидер қурилмаларида қўлланиладиган замонавий технологиялар кўриб чиқилган.

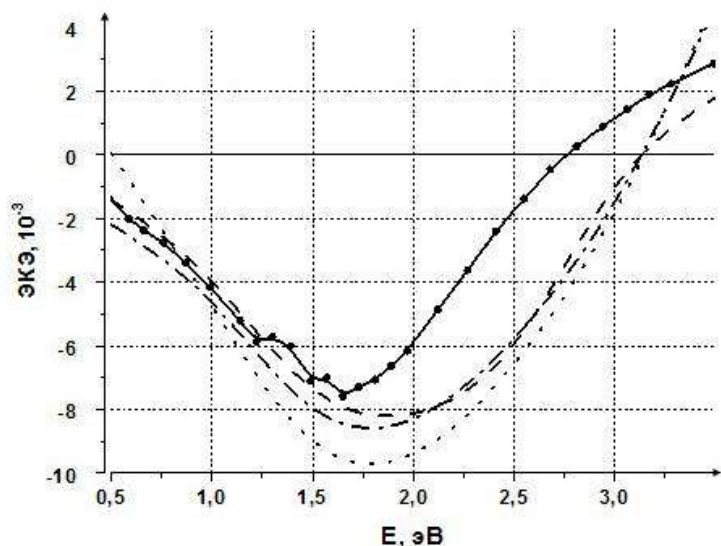
Радиоалоқада хусусан, антенна-фидер қурилмаларининг ўлчамларини метаматериаллар асосида кичрайтириш, яқин масофада сигнални кучайтириш ва уларнинг йўналиш диаграммасини бошқариш бўйича энг янги ва муҳим ишлар кўриб чиқилган.

Диссертациянинг «Нанокомпозитларда экваториал Керр эффектини моделлаштириш ва улар асосида радиотехника қурилмалари хусусиятларини яхшилаш усуллари» деб номланган иккинчи бобида, $(\text{CoFeZr})\text{-Al}_2\text{O}_3$ нанокомпозитларнинг инфрақизил ва оптик диапазонлардаги магнит-оптик спектрлари моделлаштирилган, ушбу турдаги нанокомпозитлардан метаматериалларни яратишнинг назарий асослари ҳамда улар асосида радиотехника қурилмалари хусусиятларини яхшилаш усуллари кўриб чиқилган.

Ушбу бобда $(\text{CoFeZr})_x\text{-(Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$ нанокомпозитларнинг оптик ва яқин инфрақизил диапазонидаги магнит-оптик спектрларини моделлаштириш ўрганилган, сўнгра бу натижалар экспериментал натижалар билан солиштирилган.

Ишда самарали мухит назарияси таклиф этилган, бунда металл заррачалар ва матрица ϵ_{eff} диэлектрик сингдирувчанликка эга бўлган самарали мухит сифатида қаралади, бу мухитни умумий ҳолда характерлайди. Нанокомпозитнинг иккита турдаги заррачалари (CoFeZr - нанокомпозитнинг магнит таркибий қисми, Al_2O – нанокомпозитнинг диэлектрик таркибий қисми) учун, диэлектрик сингдирувчанлик тензорининг таркибий қисмларини ҳисоблашда симметрик Максвелл - Гарнетт яқинлашувидан (СМГ) фойдаланилган.

Магнит компонентнинг перколяция оstonасидан паст бўлган концентрациясида экваториал Керр эффектнинг модель спектрлари 1-расмда келтирилган. Бунда ҳисоблашлар давомида қуйидаги параметрларнинг турлича қийматлари олинган: магнит модда концентрация X , форм фактор L_A ва L_B , заррачалар ўлчами r_0 ва R_s/R_{bulk} коэффициент.

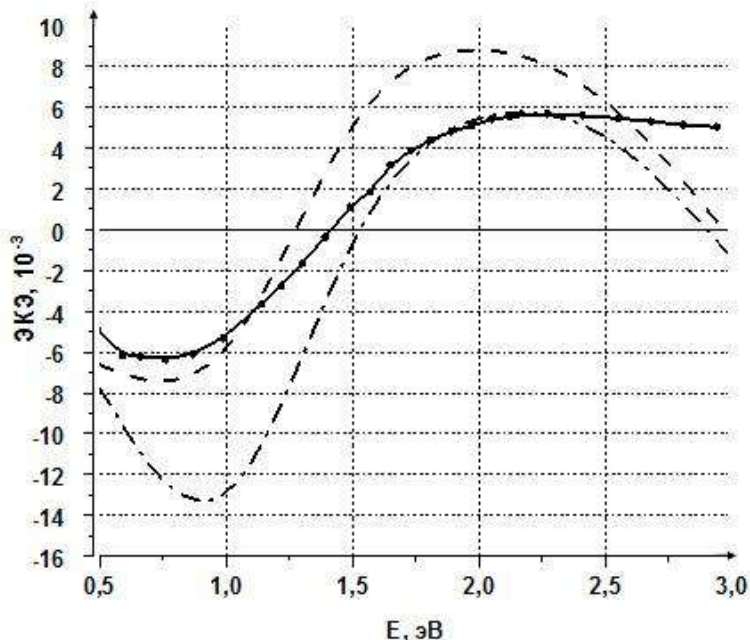


1-расм. Термо ишлов берилмаган $(\text{CoFeZr})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{(1-x)}$ нанокомпозит ($X=13\%$) учун экваториал Керр эффекти (ЭКЭ) қиймати спектрлари.

Ушбу расмда пунктир чизиқ ($X=13\%$, $L_A=0,42$, $L_B=0,8$, $r_0=1,5$ нм, $R_s/R_{\text{bulk}}=2 \cdot 10^5$); штрих-пунктир чизиқ ($X=13\%$, $L_A=0,38$, $L_B=0,8$, $r_0=1,5$ нм,

$R_s/R_{bulk}=2 \cdot 10^5$); нукталар ($X=13\%$, $L_A=0,42$, $L_B=0,8$, $r_0=1,5$ нм, $R_s/R_{bulk}=2,3 \cdot 10^5$) математик модель асосида узлуксиз чизик- эксперимент натижасида олинган спектрлар.

Магнит компонентнинг перколяция оstonасидан юқори бўлган концентрациясида экваториал Керр эффектнинг модель спектрлари 2-расмда келтирилган.



2-расм. Термоишлов берилган $(CoFeZr)_x(Al_2O_3)_{(1-x)}$ нанокомпозит ($X=72\%$) учун экваториал Керр эффекти қиймати спектрлари.

Ушбу расмда пунктир чизик ($X=72\%$, $L_A=0,795$, $L_B=0,575$, $r_0=1,7$ нм, $R_s/R_{bulk}=9 \cdot 10^3$); штрих-пунктир чизик ($X=72\%$, $L_A=0,795$, $L_B=0,578$, $r_0=1,6$ нм, $R_s/R_{bulk}=9 \cdot 10^3$) математик модель асосида, узлуксиз чизик ($X=72\%$) эксперимент натижасида олинган спектрлар.

Магнит компонентнинг концентрацияси юқори бўлганда кластерлар ўлчамлари катталашади, бу ўз навбатида r_0 қийматининг катталашувиға олиб келади. Ўлчамли эффектни тўлиқ инobatга олиш эксперимент натижасида олинган маълумотларни ифодалашға ёрдам беради.

Экваториал Керр эффекти нанокомпозит материаллар структурасини бузмаган ҳолда уларнинг хусусиятларини кенг спектрда ўрганиш имконини беради. Нанокомпозитларнинг параметрларини ўлчашнинг ушбу усулини наноэлектроника ва наноантенна элементларини ишлаб чиқаришда кенг қўллаш мумкин.

Ушбу бобда, нанокомпозит асосида метаматериалларни яратиш мумкинлиги назарий жиҳатдан асосланган ҳамда маълум шартлар бажарилганда $\epsilon_{CoFeZr,mod}(\omega)$ параметрнинг қиймати манфий бўлиши аниқланган. Яъни ўрганилаётган нанокомпозит намуналари метаматериал хусусиятларига эга бўлиши мумкин.

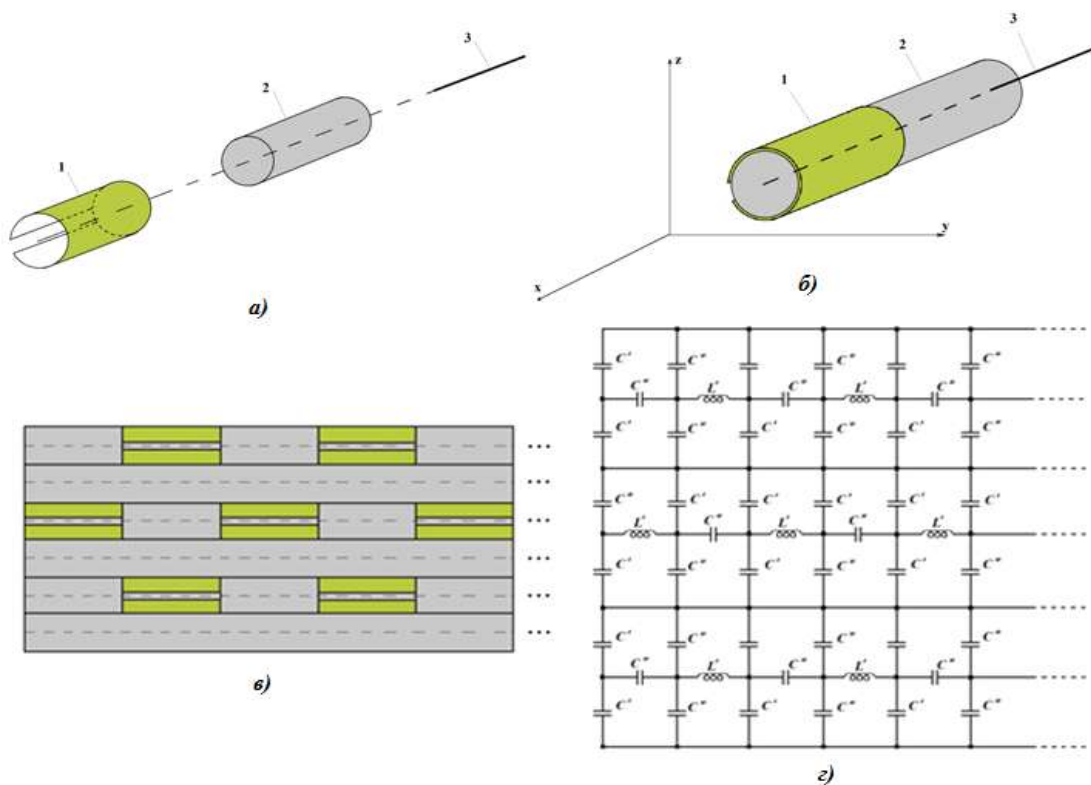
Бундан ташқари, радиотехника қурилмаларини яратишда нанокомпозитлардан фойдаланиш усуллари ва технологиялари бўйича

ёзилган адабиётлар таҳлили ўтказилган. Ўтказилган таҳлил асосида нанокомпозитлар турли радиотехника қурилмаларининг, хусусан антенна-фидер қурилмаларининг ўлчамларини кичрайтириш, ишлаш самарадорлигини ошириш имконини бериши аниқланган.

Диссертациянинг «Радиоалоқа ва радарли технологияда қўлланиладиган, антенна-фидер қурилмаларида метаматериаллар» номли учинчи бобида, тақсимланган параметрларга эга алоқа линияси элементларидан ташкил топган метаматериалнинг назарий ва амалий асослари яратилган. Эҳтимолий ва математик модель ишлаб чиқилган ҳамда ҳисобланган параметрлар асосида алоқа линияси элементларидан метаматериал намуналари яратилган. Ушбу метаматериалларни антенна-фидер қурилмасига қўллаш усули яратилган ва самарадорлиги аниқланган.

Метаматериалларни яратиш методологияси умумлаштирилган ва тақсимланган параметрларга эга бўлган метаматериални яратиш методологияси ишлаб чиқилган. Метаматериалларни яратиш шартларини ҳисобга олган ҳолда дискрет узатиш линиясининг тенгламаси ечилган.

Метаматериалнинг тузилиши, эквивалент схемаси ва асосий элементлари 3-расмда келтирилган. Метаматериалнинг тузилиши бир неча қатламдан иборат, 3.в-расмда битта қатлам келтирилган.



1–металл стержен, 2–диэлектрик тўлдирувчи, 3–бирканалли алоқа линияси

3-расм. Метаматериалнинг тузилиши, метаструктура ячейкаси элементлари(а); метаструктуранинг элементар ячейкаси(б); метаматериалнинг принципиал схемаси(в); метаматериалнинг эквивалент схемаси(г).

Метаматериалнинг яратилиши нозичлиқли динамик ҳодиса ҳисобланади, чунки метаматериал «муҳит» дисперсия хусусиятларига эга ($\epsilon(\omega)$, $\mu(\omega)$). Бунда метаматериалнинг нурланиш частотаси қанчалик юқори бўлса, уни яратиш нисбатан осонроқ бўлади. Метаматериалнинг яна бир ўзига хос хусусияти бу унинг фақат очиқ тизимда пайдо бўлишидир, яъни тизимнинг кириши ва чиқиши ўртасида алоқа мавжуд бўлиши учун метаматериалнинг барча элементлари бир бири билан боғланган яхлит тизим бўлиши керак (3.г-расм).

Алоқа линияси элементларидан ташкил топган метаматериалнинг математик модели яратилган. Бунда метаматериал бўйлаб электромагнит тўлқин сўнишсиз тарқалади. Метамуҳит диэлектрик сингдирувчанлик $\epsilon(\omega)$ параметри маълум бир самарали муҳит диэлектрик сингдирувчанлиги $\epsilon_{eff}(\omega)$ сифатида кўриб чиқилади,

$$|\epsilon_{eff}| = \left| \frac{\left(1 + \frac{1}{2Z(\omega)} \frac{\omega^2}{\omega_p^2}\right)^2}{\sqrt{\left(0,25 \frac{\omega^2}{\omega_p^2} - 1\right)}} \right| \quad (1)$$

бу ерда ω – генератор томонидан бериладиган частота, ω_p – метаматериалнинг хусусий частотаси, $Z(\omega)$ – метаматериалнинг тўлиқ қаршилиги.

Бизнинг ҳолатда метаматериалнинг тўлиқ қаршилиги $Z(\omega)$ метаматериалнинг эффектив тўлиқ комплекс қаршилигига тенглаштириб олинади. Метаматериалнинг (3.в-расм) хуз ўқи бўйича тўлиқ эффектив қаршилиги қуйидагига тенг:

$$Z(\omega) = |Z_{eff}^{xyz}(\omega)| = \sqrt{(Z_1^{xyz}(\omega))^2 + (Z_2^{xyz}(\omega))^2 + (Z_3^{xyz}(\omega))^2} = 6,1Z_C \quad (2)$$

Метаматериалнинг диэлектрик сингдирувчанлиги ϵ_{MTM} ва магнит сингдирувчанлиги μ_{MTM} қуйидаги формулалар бўйича ҳисобланади

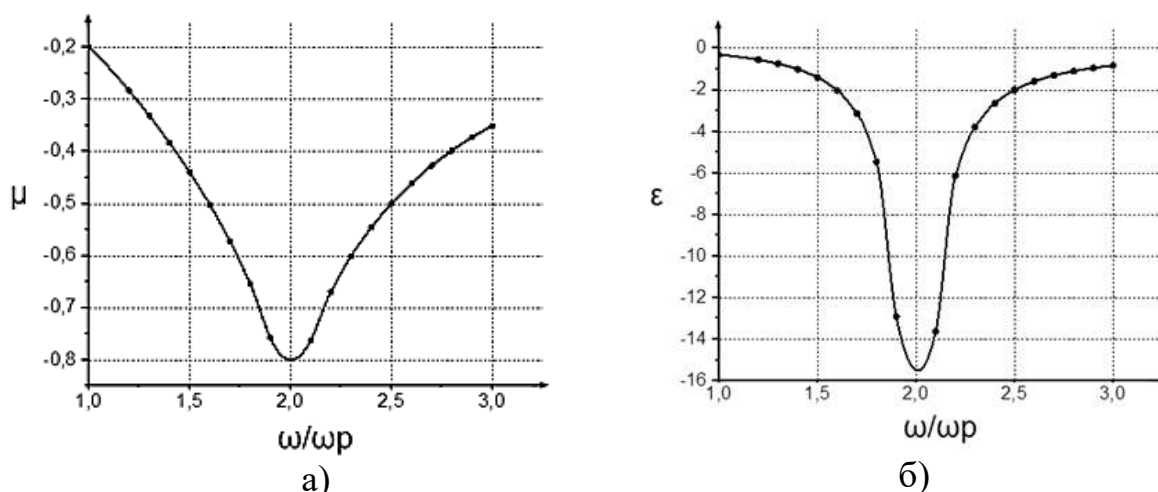
$$\begin{cases} \mu_{MTM}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{|\epsilon_{eff}(\omega)|}} - 1 \\ \epsilon_{MTM}(\omega) = |\epsilon_{eff}(\omega)| \mu_{MTM}(\omega) \end{cases} \quad (3)$$

Битта хусусий ҳолат учун биз чизикли бўлмаган тенгламалар тизимини (3) ечамиз. Бунда (1) ва (2) формулалардан $|\epsilon_{eff}(\omega)| = 9,16$ га тенг эканлиги аниқланди, μ_{MTM} ва ϵ_{MTM} қийматлари эса (3) формулага асосан қуйидаги қийматларга тенглиги аниқланди:

$$\begin{cases} \mu_{MTM}(\omega) = -0,67 \\ \epsilon_{MTM}(\omega) = -6,1 \end{cases}$$

Ишлаб чиқилган математик модель асосида турли частоталарда ҳисоб-китоблар амалга оширилган, натижалар магнит ва диэлектрик

сингдирувчанликнинг частотага боғлиқ графиклари сифатида 4-расмда келтирилган.

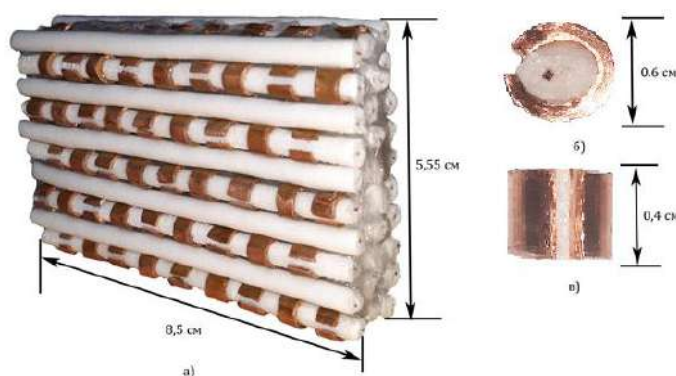


4-расм. Метаматериалнинг эквивалент схемаси бўйича магнит (а) ва диэлектрик (б) сингдирувчанликнинг частотага боғлиқ графиклари.

Ушбу расмдан магнит ва диэлектрик сингдирувчанлик параметрларининг иккаласи ҳам манфий қийматга эга эканлигини кўриш мумкин ($\mu < 0$, $\epsilon < 0$), бу ўрганилаётган частота спектрида эҳтимолий модель асосида метаматериални яратиш мумкинлигини англатади.

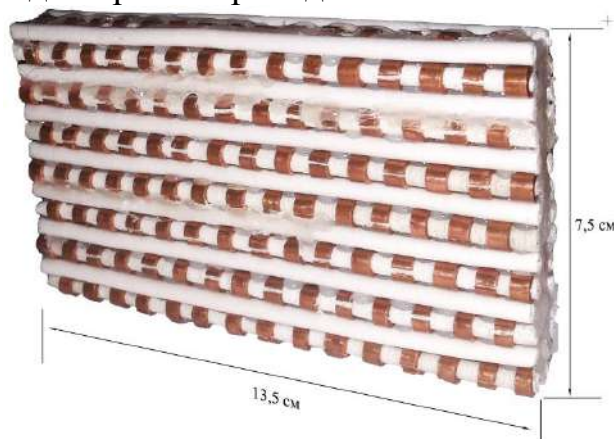
Метаматериалларни тақсимланган параметрларга эга элементлардан (3-расм) ишлаб чиқиш уларни қидириш ва яшанинг нисбатан универсал усули ҳисобланади. Метаматериал ўзининг хусусиятларини намоён қилиши учун яқин масофада электромагнит тўлқин билан нурлантирилади, бунда электромагнит тўлқин метаматериалдан ўтганда унинг параметрлари ва хусусиятлари ўзгаради.

Ўрганилган эҳтимолий модель самарали эканлиги назарий жиҳатдан исботлангандан сўнг, тақсимланган параметрларга эга алоқа линиялари элементларидан турли ҳажмдаги метаматериал намуналари яратилган (5-6-расм).



5-расм. Тақсимланган параметрларга эга, алоқа линияси элементларидан ташкил топган метаматериал (а), метаматериал элементининг юқоридан кўриниши (б), метаматериал элементининг ён томондан кўриниши (в).

Метаматериалларнинг элементлари бир-бирига нисбатан симметрик жойлашиши ва узилишлар жойлари орасида 180° фарқ бўлиши зарур. Сўнгра метаматериал метаэлементли ва метаэлементсиз алоқа линиясидан иборат бўлган кетма-кетлик асосида навбатма-навбат йиғилади. Метаматериал тузилиши уч қатламдан иборат бўлиб, ҳар бир қатламда элементлар тўпламининг тартиби ўзгаради, бу фаза ўзгарувчанлигига эришиш учун амалга оширилади. Метаматериалнинг барча элементлари бир-бирига силикон елим ёрдамида бирлаштирилади.



6-расм. Тақсимланган параметрга эга, адоқа линияси элементларидан иборат метаматериалнинг ҳажм бўйича катталаштирилган намунаси.

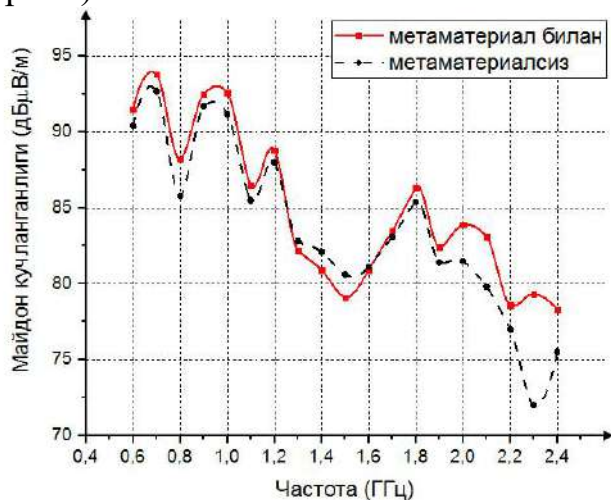
Яратилган метаматериал антенна-фидер қурилмаси ишлаш самарадорлигини ошириш имконига эга эканлигини аниқлаш учун тажриба қурилма мажмуаси қуйидаги элементлардан иборат: 3 КГцдан 3 ГГцгача частота диапазонида ишлайдиган Rohde & Schwarz SM 300 сигнал генератори; 450 МГц дан 8 ГГц частота диапазонида ишлайдиган узатувчи антенна-фидер қурилмаси; узатувчи антенна-фидер қурилмаси билан бир хил параметрларга эга бўлган қабул қилувчи антенна; 9 КГцдан 7,5 ГГцгача частота диапазонида ишлайдиган Rohde & Schwarz PR100 портатив қабул қилиш, ўлчаш мосламаси (7-расм). Бунда метаматериал узатувчи антеннанинг яқин ҳудудига ўрнатилади.



7 - расм. Метаматериалнинг антенна-фидер қурилмасига нисбатан самаралилигини аниқлаш учун йиғилган тажриба қурилма мажмуаси.

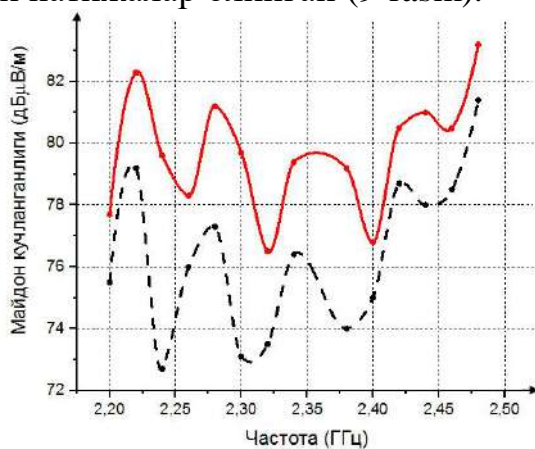
Бунда 0,6 дан 2,4 ГГцгача бўлган частота диапазонида метаматериал бўлган ва бўлмаган муҳит учун майдон кучланганлигининг частотага боғлиқ графиклари олинган (8-11-расм).

Биринчи намунадаги метаматериал (5-расм) бўйича ўтказилган ўлчов натижалари 8-9-расмларда кўрсатилган, бунда ўлчаш қадами 100 МГц (8-расм) ва 20 МГц (9-расм).



8-расм. Частота ва майдон кучлилиги ўртасидаги график: узлуксиз чизиқ – метаматериалли муҳит, узук чизиқ - метаматериалсиз муҳит.

Метаматериал мавжуд бўлган муҳитда 0,6÷1,2 ГГц ва 1,7÷2,4 ГГц частота диапазонларида майдон кучланганлиги параметрининг кучайганлигини кўриш мумкин, максимал кучайиш 2,2÷2,4 ГГц частота диапазонида кузатилган. Ушбу частота диапазонида ўлчаш ишлари қайта ўтказилган ва қуйидаги натижалар олинган (9-расм).



9-расм. Частота ва майдон кучлилиги ўртасидаги график: узлуксиз чизиқ – метаматериалли муҳит, узук чизиқ - метаматериалсиз муҳит.

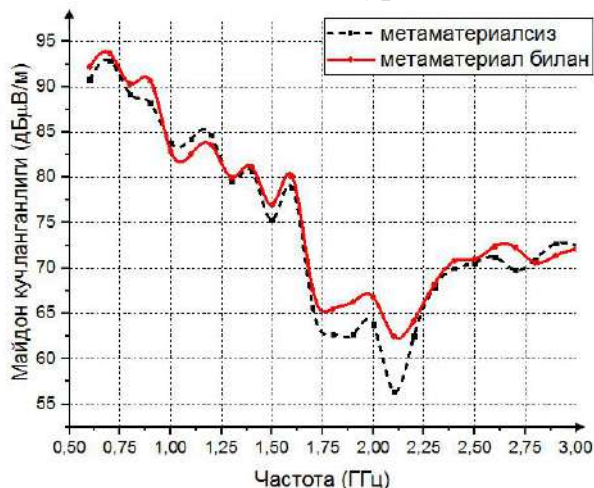
Антенна-фидер қурилмаси узатаётган электромагнит тўлқин, метаматериалдан ўтгандан сўнг майдон кучланганлик параметри ўртача 4 дБμВ/м (метрга десибел микроволт) кучайтирилган ва 2,24 ГГц частотада максимал қиймати 7 дБμВ/мга тенг. Яъни кенг частота диапазонида антенна-фидер қурилмасидан узатилаётган электромагнит тўлқин параметрининг яхшиланиши кузатилган.

Метаматериалда размерли эффектни ўрганиш учун, x, y ва z ўқлари бўйича унинг ўлчамлари ўзгартирилган. Биринчи намунадаги метаматериал (5-расм) қуйидаги ўлчамларга эга (x, y, z)=(85;55,5;18) ўлчамлар миллиметрда берилган. Иккинчи намунадаги метаматериал (6-расм)

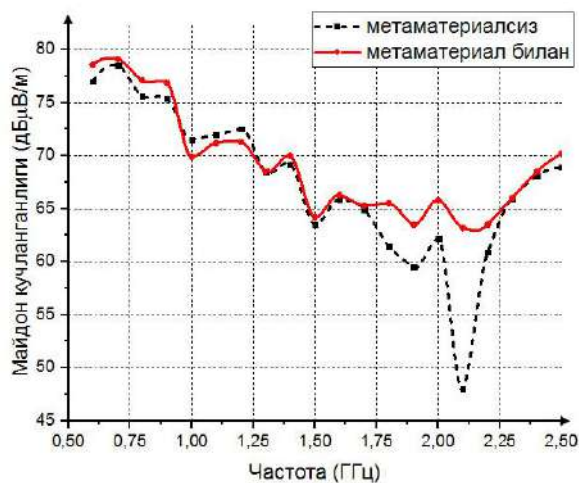
ўлчамлари қуйидагича $(x', y', z')=(135; 85; 20)$, уларнинг ўзаро нисбати қуйидагига тенг

$$\frac{(x', y', z')}{(x, y, z)} = (1,59; 1,35; 1,1).$$

Ўтказилган тажриба ишлари давомида иккинчи намунадаги метаматериал билан ва метаматериалсиз (6-расм) муҳитда антенна қурилмасидан узатилаётган электромагнит тўлқин майдон кучланганлиги параметрининг частотадан боғлиқлигини ўрганамиз.



10-расм. Икки қатламли метаматериал: узлуксиз чизик– метаматериалли муҳит, узлукли чизик– метаматериалсиз муҳит.



11-расм. Уч қатламли метаматериал: узлуксиз чизик– метаматериалли муҳит, узлукли чизик– метаматериалсиз муҳит.

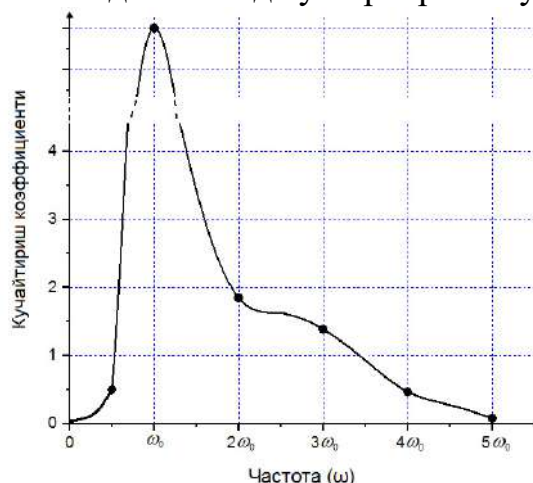
Иккинчи намунадаги икки ва уч қатламли метаматериалларда майдон кучланганлигининг максимал кучайиши 2 дан 2,25 ГГцгача бўлган диапазонда кузатилган, 2,1 ГГцда 15 дБμВ/м гача кучайтирилган.

Таққослаш асосида шу кўринадик, биринчи ҳолатда максимал кучайтиришга 2.24 ГГц частотада (9-расм), иккинчи ҳолатда эса максимал кучайтириш 2.1 ГГц частотада кузатилган (11-расм). Буни метаматериалнинг ўзига хос хусусиятлари асосида тушунтириш мумкин, метаматериал ўлчамларининг катталаниши унинг самарали частоталарининг пасайишига олиб келади.

Биринчи намунадаги метаматериал асосида 10%га иккинчи намунадаги метаматериал асосида 30%га антенна-фидер қурилмаси ишлаш самарадорлигини оширишга эришилган.

Диссертациянинг «**Инфрақизил ва оптик частота диапазонида метаматериални қидириш усули**» номли тўртинчи бобида, оптик ва радиочастота диапазонида метаматериални қидириш аналогияси ўрганилган. Ушбу аналогия, чуқур физик маънога эга, чунки оптик диапазонда метаматериалнинг хусусиятлари радиочастота диапазонидаги хусусиятларига мос келади.

Ушбу бобда оддий материаллар ва метаматериаллар учун тўлқинли аналогдаги сигнал узатиш тизимининг ҳисоб-китоб натижалари келтирилган. Частотанинг турли қийматларида метаматериалли муҳитнинг кучайтириш коэффициентини сон қийматлари аниқланган (12-расм). Олинган натижалар шуни кўрсатадики, метаматериаллар асосида сигналларни ҳам радиодиапазонда ҳам оптик диапазонда ўзгартириш мумкин.



12-расм. Кучайтириш коэффициентининг частотага боғлиқлик графиги.

Бундай аналогия инфрақизил ва оптик диапазонларда метаматериалларни қидиришнинг янги услубини таклиф қилишимизга имкон беради. Аналогия Fe_2O_3 қўшимчали калийалюмоборатли шишаларда термарадияцион таъсирда ранг марказларининг манфий дифференциал ютилишининг, метаматериалнинг радиочастота ютилиши билан таққослаш орқали асосланган.

ХУЛОСА

“Метаматериаллар асосида антенна-фидер қурилмаларининг самарадорлигини ошириш усуллари ва моделлари” мавзусидаги фалсафа доктори (PhD) диссертацияси бўйича олиб борилган тадқиқотлар натижасида қуйидаги хулосалар тақдим этилади:

1. Нанокөмпозитнинг перколяция чегарасидан юқорида ва пастда симметрик Максвелл-Гарнет яқинлашуви асосида самарали муҳит доирасида Экваториал Керр эффекти спектрал боғлиқликлари моделлаштирилди. Ушбу

магнето-оптик услуб нанокөмпозитларнинг тузилишини бузмасдан уларнинг хусусиятларини кенг доирада ўрганишга имкөн берган.

2. Экваториал Керр эффекти асосидаги ҳисоб китоблар шуни кўрсатадики, нанокөмпозитнинг домен гранулалари радиуслари $1,5 \div 1,7$ нмга тенг. Экспериментал маълумотларда ҳам гранулаларнинг максимал ўлчами $2 \div 4$ нмга тенг бўлиши кўрсатилган. Нанокөмпозит материалларда $\epsilon(\omega)$ параметр манфий бўлиши асосида уларни инфрақизил ва оптик частота диапазонларида метаматериал сифатида қўллаш учун тавсия этилган.

3. Тақсимланган параметрларга эга алоқа линияси элементларидан иборат метаматериалнинг эҳтимолий ва математик модели ишлаб чиқилган. Математик модель бўйича ўтказилган ҳисоб-китоблар ва олинган натижалар асосида маълум бир частота диапазонида магнит ҳамда диэлектрик сингдирувчанлик параметрларининг манфий қийматга тенг эканлиги аниқланди, бу яратилаётган материал модели ҳақиқатдан ҳам иккала параметри ҳам манфий метаматериал эканлигини билдиради. Метаматериал параметрларини ҳисоблаш учун дастурий восита яратилган.

4. Замонавий патч-антенна панжараларини таҳлил қилиш шуни кўрсатадики, метаматериалларни кичик антенналарда ва радар техникасида қўллаш асосида сезиларли афзалликларга эришиш мумкин, хусусан антенна-фидер қурилмасининг йўналиш диаграммасидаги ён баргларини йўқотиш ҳисобига узатилаётган сигнал қуввати оширилган.

5. Танланган эксперимент ўтказиш усули бўйича генераторнинг $0,6 \div 3$ ГГц частота диапазонида тажриба натижалари келтирилган. Тажриба жараёнида метаматериал ҳеч қандай электр занжирларига уланмайди, сигналнинг максимал кучайишига эришиш учун метаматериал ҳамда узатувчи антенна ўртасида оптимал масофа танланиши керак. Тажриба давомида майдон кучланганлиги параметрининг қийматини $10-15$ дБмВ/м гача кучайтирилишига эришилган.

6. Тадқиқот иши давомида биринчи намунадаги метаматериал асосида $2,2 \div 2,4$ ГГц частота диапазонида 10 % гача, иккинчи намуна асосида $2,0 \div 2,2$ ГГц частота диапазонида 30 % гача узатувчи антенна қурилмаси майдон кучланганлиги параметрини кучайтиришга эришилган, яъни антенна-фидер қурилмаси самарадорлигини ошириш хусусиятига эга бўлган метаматериалнинг намуналари яратилган.

7. Калий алюмоборатли Fe_2O_3 қўшимчали шишаларда терморadiацион таъсирда ранг марказларининг манфий дифференциал ютилишининг, ММ радиоютилиш маркази билан ўзаро боғлиқлиги аниқланган. Ушбу ишда аналогия тушунчаси келтирилган бўлиб, у радиодиапазон, инфрақизил ва оптик диапазонда метаматериалларни излашнинг янги усулларини аниқлаш имконини беради.

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

**САМАРКАНДСКИЙ ФИЛИАЛ ТАШКЕНТСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

МИРЗОКУЛОВ ХОТАМ БАХТИЁР УГЛИ

**МЕТОДЫ И МОДЕЛИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ
АНТЕННО-ФИДЕРНЫХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ
МЕТАМАТЕРИАЛОВ**

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 – 2020

Тема диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № В2020.2.PhD/T1617.

Диссертация выполнена в Самаркандском филиале Ташкентского университета информационных технологий.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский и английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (www.tuit.uz) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziynet.uz)

Научный руководитель: **Салахитдинов Амритдин Нуритдинович**
кандидат физико-математических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Писецкий Юрий Валеревич**
доктор технических наук, доцент

Шахобиддинов Алишер Шопатхиддинович
доктор философии (PhD) по техническим наукам

Ведущая организация: **Ташкентский государственный технический университет имени И.Каримова**

Защита диссертации состоится «25» ноября 2020 г. в 14⁰⁰ часов на заседании Научного совета DSc.13/30.12.2019.T.07.02 при Ташкентском университете информационных технологий. (Адрес: 100202, г.Ташкент, ул. Амира Темура, 108.Тел.:(99871) 238-64-43; факс:(99871) 238-65-52; e-mail:tuit@tuit.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Ташкентского университета информационных технологий (регистрационный номер № 2626). Адрес:100202, г. Ташкент, ул. Амира Темура, 108. Тел.: (99871) 238-65-44.

Автореферат диссертации разослан «14» ноября 2020года.

(протокол рассылки № 5 от «13» ноября 2020 г.).



И.Х. Сиддигов

Председатель Научного совета по присуждению ученых степеней, д.т.н., профессор

Х.Э. Хужаматов

Ученый секретарь Научного совета по присуждению ученых степеней доктор философии (PhD), доцент

А.А. Абдукаюмов

Председатель научного семинара при Научном совете по присуждению учёных степеней, д.т.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В мире в производстве и в применении антенно-фидерных устройств большое внимание уделяется уменьшению размеров антенн, значительному увеличению их дальности передачи и контролю диаграммы направленности при заданных параметрах передатчиков. В этой области, включая повышения эффективности антенно-фидерных устройств, особое внимание уделяется разработке моделей антенн на основе метаматериалов, методам использования свойств композитного материала для улучшения параметров существующих антенн и созданию наноантенн на основе метаматериалов. В развитых странах, таких как США, Великобритания, Китай, Франция, Япония, Индия, Южная Корея и Российская Федерация, исследования по разработке методов и моделей для повышения эффективности антенных устройств на основе различных композиционных материалов является одним из важнейших задач.

Во всем мире проводится ряд научных исследований по совершенствованию систем радиосвязи, включая управления диаграммой направленности антенно-фидерных устройств, уменьшению их размеров и увеличению дальности передачи. В этой области особое внимание уделяется поиску новых типов материалов для повышения эффективности антенных устройств, разработке теоретической основы для использования нанокompозитных материалов в наноантеннах, разработке практических решений, совершенствованию патч-антенн на основе метаматериалов и тонких пленок, методам и моделям масштабирования. В то же время актуальна разработка методов и моделей повышения эффективности антенно-фидерных устройств на основе метаматериалов.

В Республике предпринимаются меры по дальнейшему совершенствованию области радиосвязи и информационных технологий, расширению охвата системами мобильной связи, разработке систем, обеспечивающих скорость и качество передачи данных. В Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017-2021 годы поставлены задачи, в том числе "... внедрение информационно-коммуникационных технологий в экономику, социальную сферу, системы управления, ... расширение зон покрытия сетей мобильной связи по всей республике"¹. Одной из важных задач является разработка теоретической и практической основы для создания и совершенствования методов и моделей антенных устройств для увеличения дальности передачи систем беспроводной связи, разработка теоретической основы для создания современных малогабаритных антенн на основе тонкопленочных и нанокompозитных материалов.

Исследования в рамках данной диссертации в определенной степени

¹Указ Президента Республики Узбекистан №УП-4947 от 7 февраля 2017 года "О стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан"

служат реализации решений и задач, изложенных в Указе Президента Республики Узбекистан № УП-4947 от 7 февраля 2017 года «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан», Постановлении № ПП-4329 от 22 мая 2019 года «О мерах по ускорению развития телекоммуникационной инфраструктуры в населенных пунктах Республики Узбекистан» и нормативных правовых актах, связанных с этой деятельностью.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Настоящая работа выполнена в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий Республики Узбекистан IV «Информатизация и развитие информационно коммуникационных технологий».

Степень изученности проблемы. В настоящее время проводится широкий спектр исследований по разработке методов и моделей повышения эффективности антенно-фидерных устройств, теоретическим и практическим основам создания метаматериалов, изучению свойств тонкопленочных и нанокompозитных материалов и их применению в области радиосвязи. Задачи, направленные на создание таких методов и моделей были включены в базы данных Springer, IEEE Xplore, eLibrary, Web of Science, Elsevier, в основном изучены статьи опубликованные в последние годы в научных журналах, перечисленных в списке IEEE Xplore, Scopus и Web of Science.

Проблемы создания метаматериалов, изучения их специфических свойств и их применения в различных областях широко освещаются в мировой научной литературе. Научные труды В.Г.Веселаго, J.B.Pendry, D.R.Smith, H.N.Enghetta, R.W.Ziolkowski, А.Н.Лагарькова, В.Слюсара, А.К. Сарычева, А.Д. Селезнева, С. Caloz, X. Zhang, П.А. Белова, В.М. Шалаева, Ю.С.Кившара, А.Грановского, Е.А. Ганьшиной, А.Н. Юрасова и других известных зарубежных ученых посвящены данному направлению. Кроме того, изучению исследуемой проблемы посвящены научные труды отечественных ученых, таких как Х.К. Арипов, А.М. Абдуллаев, А.А. Абдуазизов, А.М. Назаров, Т.Г. Рахимов, Д.Н. Ликонцев, В.А. Губенко, А.Ш. Шахобиддинов и другие.

Результаты анализа показали, что разработка и внедрение теоретических и практических основ, методов и моделей для создания малогабаритных антенн из тонкопленочных и нанокompозитных материалов, создания метаматериалов и их применения в антенных устройствах недостаточно изучены.

Связь диссертационного исследования с планами научно исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационная работа выполнена в рамках научных работ Ташкентского университета информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразмий по проектам НИР-2019-6 «Разработка системы электропитания беспроводных датчиков от энергии

электромагнитного излучения” (2019-2020 гг.) и №БВ-А3-027 «Разработка и внедрение системы управления электроснабжением энергонезависимых зданий» (2017-2018).

Целью исследования является повышение эффективности работы антенно-фидерных устройств на основе физических явлений и процессов наблюдаемых в нанокompозитах и метаматериалах.

Задачи исследования:

анализ физических явлений в тонких пленках, композиционных материалах и метаматериалах, используемых в оборудовании и приборах в области радиотехники;

исследование физических явлений и процессов в нанокompозитах используемых в антенно-фидерной технике и наноэлектронике;

разработка математической модели метаматериала с двойными отрицательными параметрами ($\epsilon(\omega) < 0$, $\mu(\omega) < 0$), обладающего способностью улучшать характеристики и параметры антенно-фидерных устройств в широком диапазоне частот;

разработка метода повышения эффективности антенно-фидерных устройств на основе метаматериалов;

разработка метода поиска метаматериалов в широком частотном диапазоне.

Объектом исследования является антенно-фидерное устройство с повышенной эффективностью работы на основе нанокompозита и метаматериала.

Предметом исследования является изучение физико-технических параметров антенно-фидерных устройств и процесс повышения их эффективности с помощью нанокompозитов и метаматериалов.

Методы исследования. В процессе исследования использовались математическое моделирование, расчет распределенных параметров электрических цепей, имитационное моделирование и операционный метод открытых систем.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

разработана математическая модель метаматериала с распределенными параметрами улучшающая параметры и характеристики антенно-фидерных устройств;

получены образцы метаматериала с распределенными параметрами на основе элементов линии связи;

разработан метод повышения эффективности антенно-фидерных устройств с помощью метаматериалов с распределенными параметрами;

разработан метод поиска метаматериалов с распределенными параметрами, работающих в радио и оптическом диапазонах частот.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

практически исследованы и получены магнитооптические спектры металлодиэлектрических нанокompозитов на основе экваториального эффекта Керра;

разработано программное средство для расчета параметров метаматериала, используемого для повышения эффективности антенно-фидерных устройств;

созданы образцы метаматериалов разных размеров и на их основе повышена эффективность антенно-фидерных устройств.

Достоверность результатов исследования обосновано соответствием теоретических и практических результатов друг с другом, средствами системного анализа, математической статистикой и теорией электромагнитного излучения, сравнительным сопоставлением результатов полученных на основе общепринятых критериев.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость результатов исследования объясняется методом, основанным на широком спектре изучения свойств нанокмозитов, математической модели метаматериалов, улучшающих характеристики и параметры антенно-фидерных устройств, методом используемым для поиска метаматериалов в разных полосах частот.

Практическая значимость результатов исследования объясняется разработкой программного обеспечения для определения параметров метаматериалов, созданием метаматериалов разных размеров и увеличением дальности передачи электромагнитных волн антенно-фидерных устройств в широком диапазоне частот на их основе.

Внедрение результатов исследования. На основании результатов полученных по методам и моделям повышения эффективности антенно-фидерных устройств на основе метаматериалов:

математическая модель метаматериала с распределенными параметрами улучшающая параметры и характеристики антенно-фидерных устройств и образцы метаматериала с распределенными параметрами на основе элементов линии связи, внедрены на предприятиях Министерства по развитию информационных технологий и коммуникаций, в частности, в Самаркандском региональном узле “Узмобиайл” филиала АК “Узбектелеком” (Справка Министерства по развитию информационных технологий и коммуникаций № 33-8/4096 от 17 июля 2020 года). В результате научных исследований можно повысить эффективность антенно-фидерных устройств базовых станций систем мобильной связи, работающих на частотах 1,7-2,1 ГГц, до 20-25%;

метод поиска метаматериалов с распределенными параметрами, работающих в радио и оптическом диапазонах частот, метод повышения эффективности антенно-фидерных устройств с помощью метаматериалов с распределенными параметрами внедрены на предприятиях Министерства по развитию информационных технологий и коммуникаций, в частности, в Центре обслуживания города Самарканд ООО “UMS” (Справка Министерства по развитию информационных технологий и коммуникаций № 33-8/4096 от 17 июля 2020 года). В результате научных исследований можно повысить эффективность антенно-фидерных устройств базовых станций

систем мобильной связи, работающих на частотах 1,7-2,1 ГГц, до 25%;

метод повышения эффективности антенно-фидерных устройств с помощью метаматериалов с распределенными параметрами, метод поиска метаматериалов с распределенными параметрами, работающих в радио и оптическом диапазонах частот внедрены на предприятиях Министерства по развитию информационных технологий и коммуникаций, в частности, в ЧП "Dildora-F" под торговой маркой "Turon telecom" (Справка Министерства по развитию информационных технологий и коммуникаций № 33-8/4096 от 17 июля 2020 года). В результате научных исследований можно повысить эффективность антенных устройств MMDS передатчика GT-5527100D, работающих в диапазоне частот 2,3-2,5 ГГц, используемых при предоставлении услуг телевидения и радиовещания, на 15-20%.

Апробация результатов исследования. Результаты исследований обсуждались на 6 международных и 3 республиканских научных конференциях и семинарах.

Публикация результатов исследования. По теме диссертации опубликованы 18 научных работ, 7 журнальных статей, в том числе 5 в зарубежных, 2 в республиканских журналах, рекомендованных ВАК для публикации основных научных результатов докторской диссертации, а также получено 1 свидетельство о регистрации программных продуктов для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация содержит 106 страниц и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность и востребованность темы диссертации, сформулированы цель и задачи, выявлены объект и предмет исследования, определено соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан, изложены научная новизна и практические результаты исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыты теоретическая и практическая значимость полученных результатов, приведено внедрение в практику результатов исследования, сведения по опубликованным работам и структуре диссертации.

Первая глава диссертации под названием **«Тонкие пленки в магнитооптических приборах и устройствах. Метаматериалы – как новые искусственные материалы для антенной техники»** посвящена исследованию физических свойств и процессов современных тонкопленочных, композиционных и магнитооптических материалов и метаматериалов, которые востребованы в электронике, радиотехнике и в других отраслях. В телекоммуникационной отрасли большое внимание уделяется новым искусственным материалам, которые принято называть метаматериалами. Эти материалы обладают уникальными электрофизическими и электродинамическими свойствами, которые можно

применить в антенной технике.

Подчеркивается перспективность использования тонкоплёночных, композиционных, магнитооптических материалов и метаматериалов в радиотехнических приборах и устройствах. Анализ литературных данных показал, что ключевой проблемой обычных антенн является их миниатюризация, и повышение эффективности работы, при разработке антенно-фидерных устройств нужно использовать различные материалы, которые способствуют оптимальному распространению электромагнитных волн. Некоторые ограничения вызывает трудности при миниатюризации антенн и антенных решеток в диапазоне высоких частот (ВЧ, 30-300 МГц) и ультравысоких частот (УВЧ, 0,3-3 ГГц). Таким образом, исследования новых концепций и механизмов создания миниатюрных антенн, разработка методов и моделей повышения эффективности, существующих антенн является перспективным направлением.

В ходе исследования отдельное внимание уделяется повышению эффективности работы антенно-фидерных устройств на основе метаматериалов. В этой главе с помощью уравнения Максвелла объясняются специфические свойства метаматериалов. Особенность свойств метаматериалов заключается в том, что значения параметров диэлектрической и магнитной проницаемости равны нулю или отрицательны, что не наблюдается в природных материалах. Кроме этого, с помощью схемы Л.И. Мандельштама объясняется порядок отражения и поглощения электромагнитных волн, падающих на границу между метаматериалом и другой средой.

Проанализированы электрооптические и магнитооптические эффекты с целью изучения основ проектирования устройств телекоммуникационных технологий и систем связи, в частности подробно рассматривается продольный и поперечный эффект Фарадея и Фохта при экваториальном намагничивании. Рассмотрено значение экваториального эффекта Керра в нанокompозитах металл-диэлектрик. Кроме этого в этой главе обсуждается новое направление в наноэлектронике, называемое интегральной нанооптикой, на его основе рассмотрены современные технологии, которые используются в нанотехнологиях и антенно-фидерных устройствах.

Рассмотрены наиболее значимые и новые работы по применению метаматериалов в радиосвязи, в частности для миниатюризации размеров антенн, усиление сигнала ближнего действия для управления их диаграммой направленности.

Во второй главе диссертации под названием **«Моделирование экваториального эффекта Керра в нанокompозитах и способы улучшения свойств радиотехнических устройств на их основе»** смоделированы магнитооптические спектры нанокompозитов (CoFeZr)-Al₂O₃ в инфракрасном и оптическом диапазоне, рассмотрены теоретические основы создания метаматериалов из данного типа нанокompозитов и методы улучшения свойств радиотехнических устройств на их основе.

В этой главе смоделированы магнитно-оптические спектры нанокompозитов $(\text{CoFeZr})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$ в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне, а затем полученные результаты сравнены с экспериментальными.

В работе предлагается теория эффективной среды, где металлическая частица и матрица заменяется эффективной средой с диэлектрической проницаемостью ϵ_{eff} , которая характеризует среду в целом. В нашей работе использовалось симметризованное приближение Максвелл–Гарнетта (СМГ) для расчета компоненты тензора диэлектрической проницаемости для двух типов частиц (CoFeZr - магнитная составляющая нанокompозита, Al_2O_3 – диэлектрическая составляющая нанокompозита).

Модельные спектры экваториального эффекта Керра при концентрациях магнитной составляющей ниже порога перколяции показаны на рисунке 1. В ходе расчетов варьировались значения следующих параметров: концентрация магнитной составляющей X , форм-фактора L_A и L_B , размера частиц r_0 и коэффициента R_s/R_{bulk} .

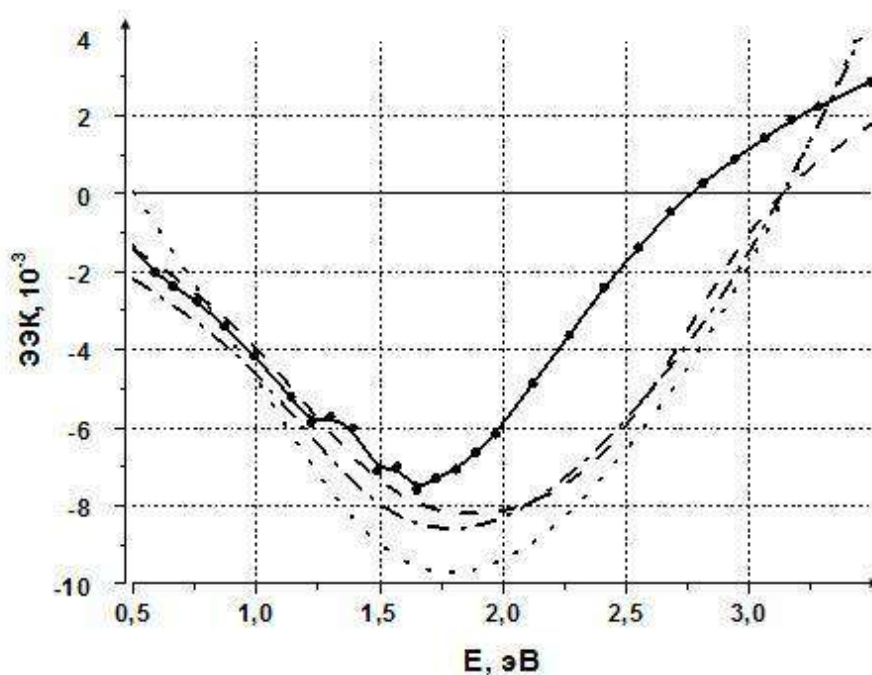


Рис. 1. Спектральные зависимости экваториального эффекта Керра неотожженного нанокompозита $(\text{CoFeZr})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{(1-x)}$ с 13% магнитной составляющей.

На данном графике представлены результаты экспериментов – сплошная линия и модельные спектры со следующими параметрами: пунктирная линия ($X = 13\%$, $L_A = 0,42$, $L_B = 0,8$, $r_0 = 1,5$ нм, $R_s/R_{\text{bulk}} = 2 \cdot 10^5$); штрих-пунктир ($X = 13\%$, $L_A = 0,38$, $L_B = 0,8$, $r_0 = 1,5$ нм, $R_s/R_{\text{bulk}} = 2 \cdot 10^5$); – точки ($X = 13\%$, $L_A = 0,42$, $L_B = 0,8$, $r_0 = 1,5$ нм, $R_s/R_{\text{bulk}} = 2,3 \cdot 10^5$).

На рис.2 представлены модельные спектры экваториального эффекта Керра при больших концентрациях магнитной компоненты – выше порога перколяции.

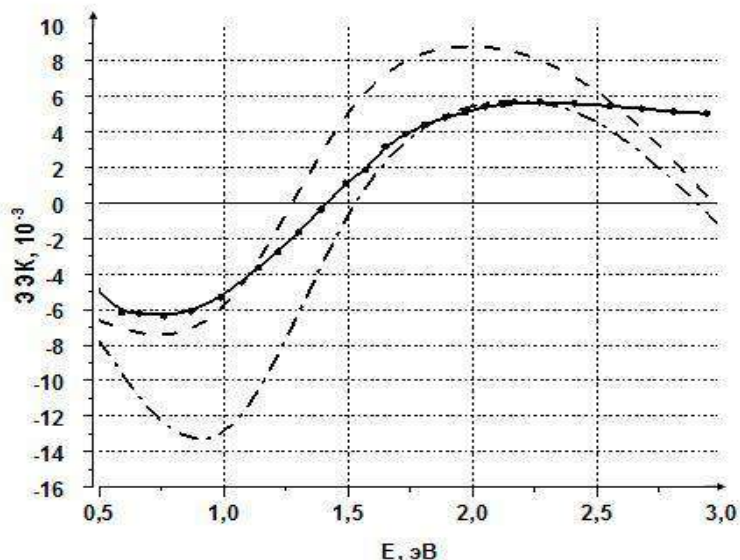


Рис. 2.Спектральные зависимости экваториального эффекта Керра отожженного нанокompозита $(\text{CoFeZr})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{(1-x)}$ с 72 % магнитной составляющей.

На данном графике представлены результаты экспериментов – сплошная линия и модельные спектры со следующими параметрами (рис. 2.3.) – пунктирная линия ($x = 72\%$, $L_A = 0,795$, $L_B = 0,575$, $r_0 = 1,7$ нм, $R_s/R_{bulk} = 9 \cdot 10^3$); штрих-пунктир ($x = 72\%$, $L_A = 0,795$, $L_B = 0,578$, $r_0 = 1,6$ нм, $R_s/R_{bulk} = 9 \cdot 10^3$); эксперимент – сплошная линия (72%).

При больших концентрациях магнитной компоненты в нанокompозите размеры кластеров увеличиваются, что объясняет увеличение значения r_0 . Видно, что учет полного размерного эффекта позволяет хорошо описать экспериментальные данные.

Экваториальный эффект Керра, позволяет, не разрушая структуру нанокompозитов, изучать их свойства в широком диапазоне спектра. Этот метод измерения параметров нанокompозитов может найти широкое применение при производстве элементов наноэлектроники и наноантенны.

В этой главе теоретически обоснована возможность создания метаматериалов на основе нанокompозитов и определено, что при соблюдении определенных условий значение параметра $\varepsilon_{\text{CoFeZr}, \text{mod}}(\omega)$ может быть отрицательным. То есть исследуемые образцы нанокompозитов могут обладать свойствами метаматериалов.

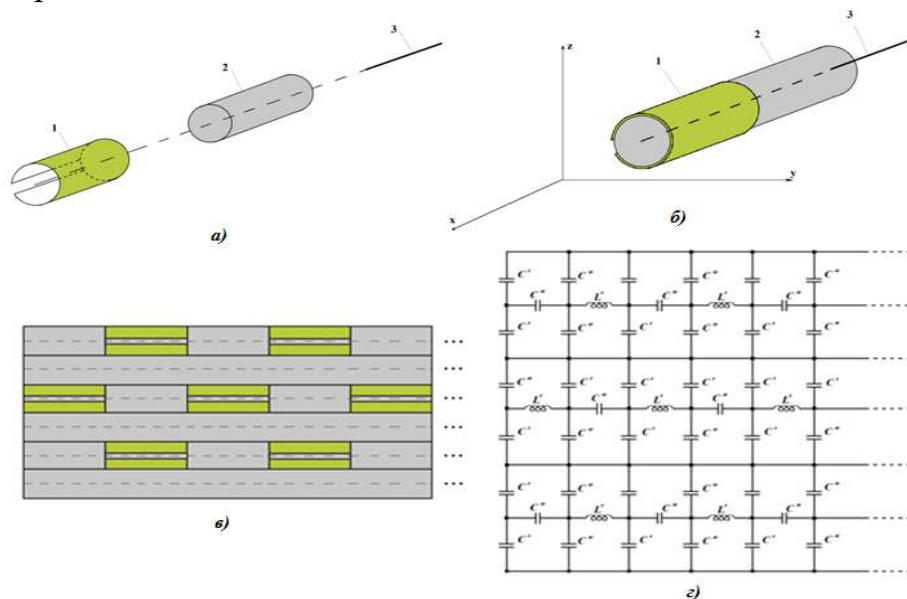
Кроме того, был проведен анализ литературы по методам и технологиям использования нанокompозитов при создании устройств радиотехники. На основе анализа было установлено, что нанокompозиты позволяют уменьшать габариты и повысить производительность различных устройств радиотехники, в частности антенно-фидерных устройств.

В третьей главе под названием **«Метаматериалы в антенно-фидерных устройствах, применяемые в радиосвязи и радарной технологии»** разработана теоретическая и практическая основа метаматериала с

распределенными параметрами состоящая из элементов линии связи. Разработана вероятностная и математическая модель, также созданы образцы метаматериалов из элементов линии связи на основе рассчитанных параметров. Разработан метод применения данных метаматериалов на антенно-фидерных устройствах и определена его эффективность.

Обобщена методология создания метаматериалов и разработана методология создания метаматериалов с распределенными параметрами. С учетом условий создания метаматериалов решено уравнение дискретной линии передачи.

Структура, эквивалентная схема и основные элементы метаматериала показаны на рис. 3. Структура метаматериала состоит из нескольких слоев, на рис. 3.в представлен вид одного слоя.



1- металлический стержень, 2- диэлектрический наполнитель, 3- однопроводной канала связи

Рис.3. Структура метаматериала, элементы ячейки метаструктуры (а), элементарная ячейка метаструктуры (б), принципиальная схема метаматериала (в), эквивалентная схема метаматериала (г).

Создание метаматериала относится к нелинейным динамическим явлениям поскольку «среда» метаматериала обладает дисперсионными свойствами ($\epsilon(\omega)$, $\mu(\omega)$). При этом, чем выше частота облучения метаматериала тем легче он создается. Другой отличительной особенностью метаматериала является то, что он встречается только в открытой системе, т.е. все элементы метаматериала должны быть соединены друг с другом в одну систему, чтобы была связь между входом и выходом системы (рис. 3.г).

Создана математическая модель метаматериала состоящего из элементов линии связи. В метаматериале электромагнитная волна распространяется без затухания. Диэлектрическая проницаемость $\epsilon(\omega)$ метасреды рассматривается как диэлектрическая проницаемость некой эффективной среды $\epsilon_{\text{eff}}(\omega)$.

$$|\varepsilon_{eff}| = \left| \frac{\left(1 + \frac{1}{2Z(\omega)} \frac{\omega^2}{\omega_p^2}\right)^2}{\sqrt{\left(0,25 \frac{\omega^2}{\omega_p^2} - 1\right)}} \right| \quad (1)$$

где ω – частота задаваемая генератором, ω_p – характерная частота метаматериала, $Z(\omega)$ – полное сопротивление метаматериала.

В нашем случае полное сопротивление метаматериала $Z(\omega)$ заменяется полным эффективным комплексным сопротивлением метаматериала. Полное эффективное комплексное сопротивление метаматериала (Рис. 3.в) по осям x, y, z равен следующему:

$$Z(\omega) = |Z_{eff}^{xyz}(\omega)| = \sqrt{(Z_1^{xyz}(\omega))^2 + (Z_2^{xyz}(\omega))^2 + (Z_3^{xyz}(\omega))^2} = 6.1Z_C \quad (2)$$

Диэлектрическая проницаемость ε_{MTM} и магнитная проницаемость μ_{MTM} метаматериала вычисляются по следующим формулам

$$\begin{cases} \mu_{MTM}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{|\varepsilon_{eff}(\omega)|}} - 1 \\ \varepsilon_{MTM}(\omega) = |\varepsilon_{eff}(\omega)| \mu_{MTM}(\omega) \end{cases} \quad (3)$$

Для одного частного случая решаем систему нелинейных уравнений (3). По формулам (1) и (2) найдены значения $|\varepsilon_{eff}(\omega)| = 9,16$ и по формуле (3) вычислили значения μ_{MTM} и ε_{MTM} которые равны следующим

$$\begin{cases} \mu_{MTM}(\omega) = -0.67 \\ \varepsilon_{MTM}(\omega) = -6.1 \end{cases}$$

На основе разработанной математической модели были выполнены расчеты для разных частот, результаты которых представлены в виде графиков зависимостей магнитной и диэлектрической проницаемости от частоты на рисунке 4.

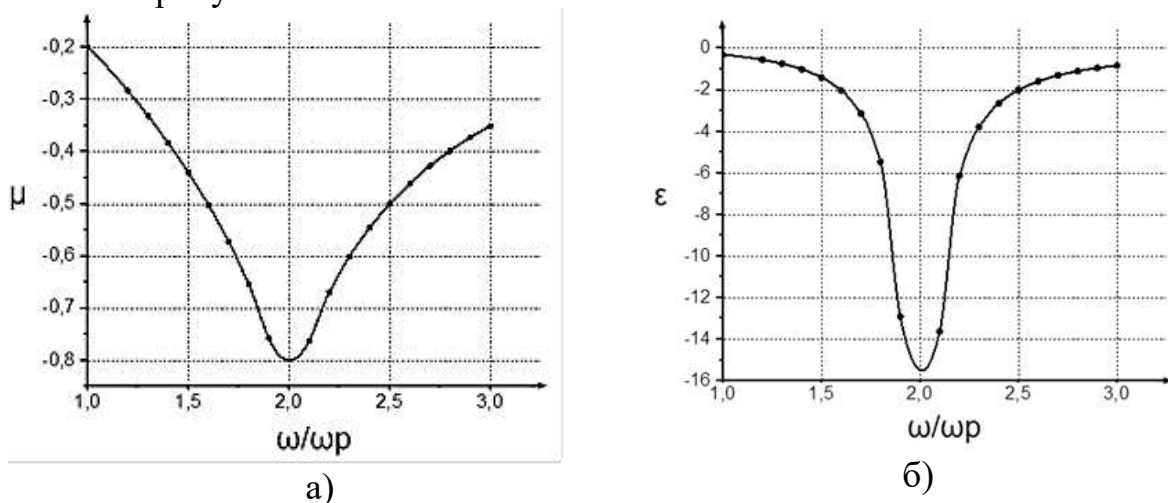


Рис.4. Графики зависимостей магнитной (а) и диэлектрической (б) проницаемости от частоты для эквивалентной схемы метаматериала.

Из этого рисунка видно, что параметры магнитной и диэлектрической проницаемости имеют отрицательное значение ($\mu < 0$, $\epsilon < 0$), это означает возможность создания метаматериала на основе вероятностной модели в исследуемом частотном спектре.

Разработка метаматериала в виде элементов с распределенными параметрами (рис.3) является более универсальным способом поиска и создания метаматериалов. Чтобы метаматериал проявил свои свойства, его нужно облучить электромагнитной волной в ближней зоне, по мере прохождения через метаматериал параметры и свойства электромагнитной волны изменяются.

После того, как теоретически доказано, что изучаемая вероятностная модель эффективна, были созданы образцы метаматериалов разных размеров из элементов линий связи с распределенными параметрами (рис. 5-6).

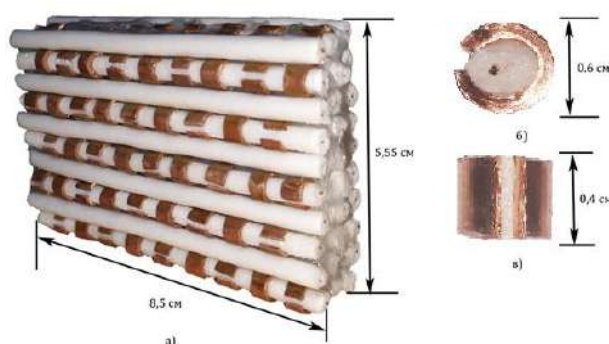


Рис.5. Метаматериал с распределенными параметрами (а), элементарная ячейка метаматериала вид сверху б), элементарная ячейка метаматериала вид сбоку (в).

Элементы метаматериала должны быть расположены симметрично и места разрывов располагаются между собой с оборотом на 180° . Далее поочередно собирается в один ряд обычной линии связи (без метаэлемента) и линия с метаэлементами. Метаматериал выполнен в три слоя, в каждом слое порядок набора элементов меняется это делается для того чтобы достичь переменности фазы. Все элементы метаматериала соединены между собой с помощью клея на основе силикона.

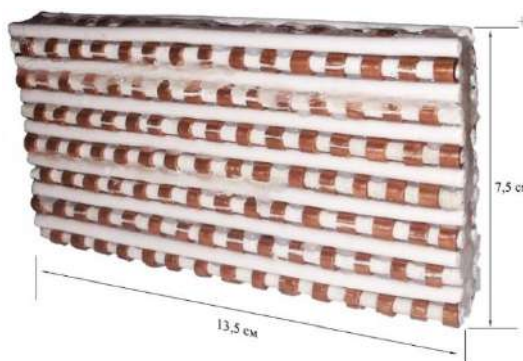


Рис.6. Увеличенный в объеме образец метаматериала, состоящий из элементов линии связи с распределенным параметром.

Чтобы определить возможность повышения производительности антенно-фидерное устройств с помощью разработанного образца метаматериала, собрана экспериментальная установка состоящая из следующих элементов: генератор сигналов Rohde & Schwarz SM 300 работающий в диапазоне частот от 3 кГц до 3 ГГц; передающая антенно-фидерное устройство, работающее в диапазоне частот от 450 МГц до 8 ГГц; приемная антенна с теми же параметрами, что и передающая; портативный приемник и измерительный прибор Rohde & Schwarz PR100, работающий в диапазоне частот от 9 кГц до 7,5 ГГц (рис. 7). В этом случае метаматериал устанавливается в непосредственной близости от передающей антенны.

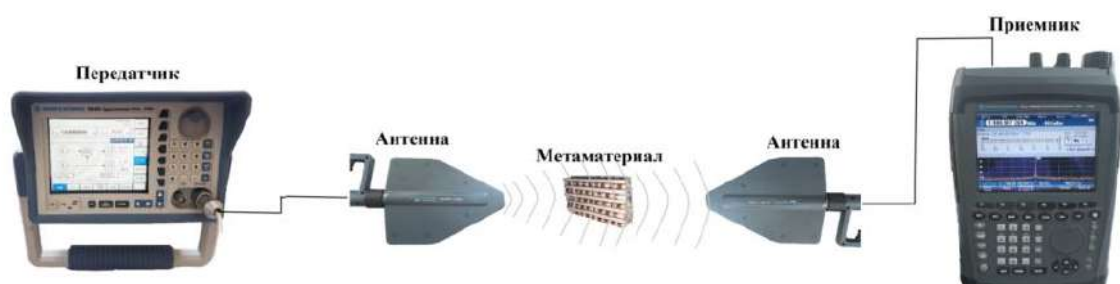


Рис.7. Установка, собранная для изучения эффективности метаматериала относительно антенно-фидерных устройств.

Получены графики зависимостей параметра напряженности поля от частоты при присутствии и отсутствии в среде метаматериала в диапазоне волн передатчика от 0,6 до 2,4 ГГц (Рис.8-11).

Результаты измерений по первому образцу метаматериала (рис. 5) показаны на рисунках 8-9, с шагом измерения 100 МГц (рисунок 8) и 20 МГц (рисунок 9).

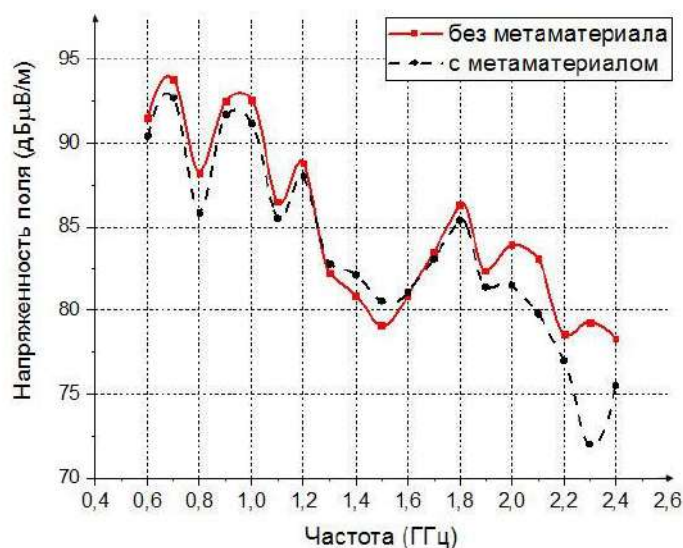


Рис.8. График между частотой и напряженностью поля: сплошная линия – среда с метаматериалом, пунктирная линия – среда без метаматериала.

Видно, что при наличии метаматериала в диапазонах частот $0,6 \div 1,2$ ГГц и $1,7 \div 2,4$ ГГц параметр напряженности поля усиливается, максимальное усиление наблюдается в диапазоне частот $2,2 \div 2,4$ ГГц. В этом частотном диапазоне измерения были произведены повторно, и были получены следующие результаты, показанные на Рис.9.

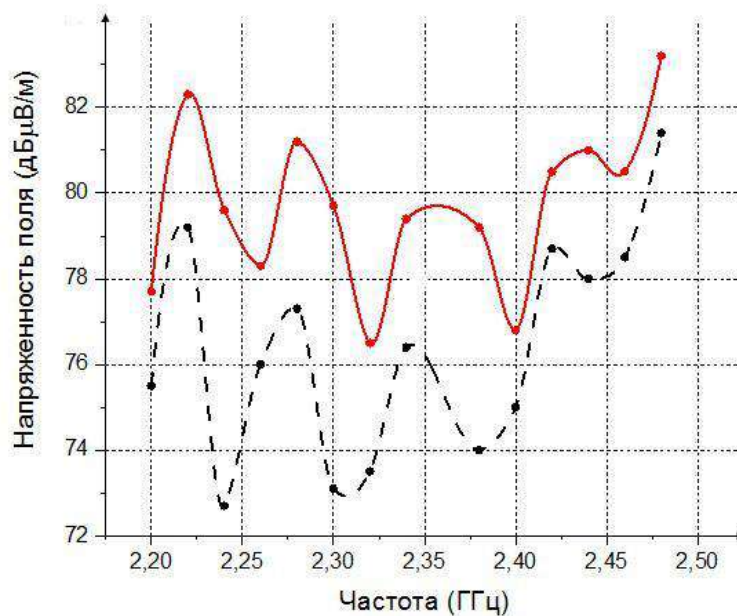


Рис.9. График между частотой и напряженностью поля: сплошная линия – среда с метаматериалом, пунктирная линия – среда без метаматериала.

После прохождения через метаматериал, параметр напряженности поля электромагнитной волны передаваемой антенно-фидерным устройством, усиливается в среднем на 4 дБмВ/м (децибел микровольт на метр) и достигает максимального значения 7 дБмВ/м на частоте 2,24 ГГц. То есть наблюдается улучшение параметра электромагнитной волны, передаваемой антенно-фидерным устройством в широком диапазоне частот.

Для того чтобы изучить размерный эффект изменены размеры метаматериала по осям x , y и z . Первый образец метаматериала (рис.8) имеет размеры $(x,y,z)=(85;55,5;18)$ размеры даны в миллиметрах. Второй образец метаматериала (рис.9) имеет следующие размеры $(x',y',z')=(135; 85; 20)$, соотношение между ними равен следующему

$$\frac{(x', y', z')}{(x, y, z)} = (1,59; 1,35; 1,1).$$

В ходе экспериментов изучается частотная зависимость параметра напряженности поля электромагнитной волны, передаваемой от антенного устройства, в среде с и без метаматериала второго образца (рис. 6).

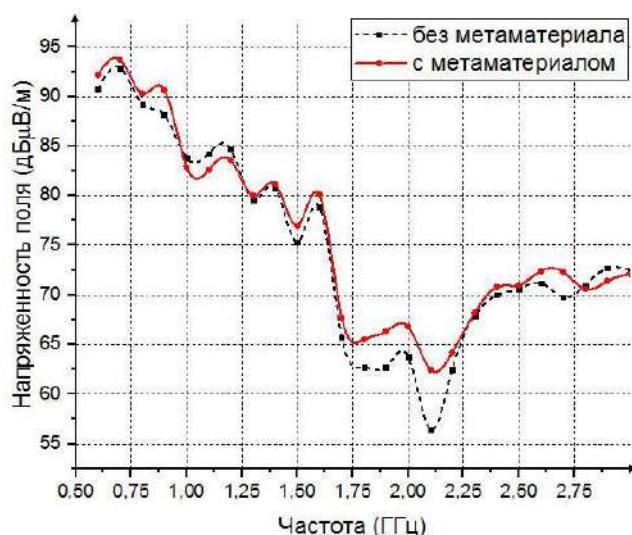


Рис.10. График между частотой и напряженностью поля метаматериала из двух слоев: сплошная линия – среда с метаматериалом, пунктирная линия – среда без метаматериала.

В двух- и трехслойных метаматериалах второго образца максимальное увеличение напряженности поля наблюдалось в диапазоне от 2 до 2,25 ГГц, с увеличением на 15 дБмВ/м на частоте 2,1 ГГц.

На основе сравнений видно, что при первом образце метаматериала максимальное усиление наблюдалось на частоте 2,24 ГГц (рисунок 9), а при втором образце максимальное усиление наблюдалось на частоте 2,1 ГГц (рисунок 11). Это можно объяснить свойствами самого метаматериала, увеличение размера метаматериала приводит к уменьшению частот при которых он эффективен.

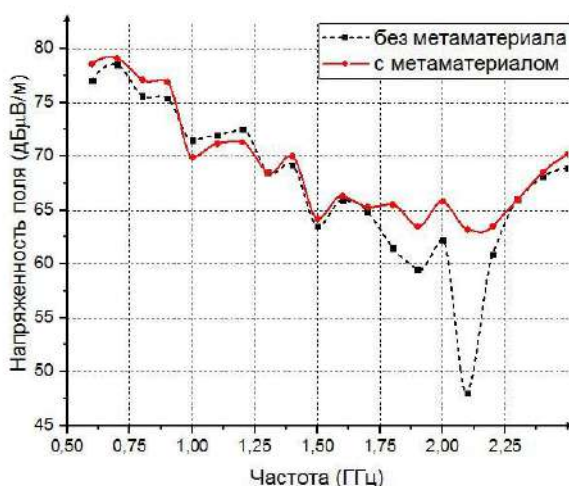


Рис.11. График между частотой и напряженностью поля метаматериала из трех слоев: сплошная линия – среда с метаматериалом, пунктирная линия – среда без метаматериала.

Производительность антенно-фидерных устройств увеличена на основе метаматериала первого образца на 10%, на основе метаматериала второго образца на 30%.

В четвертой главе диссертации под названием «Способ поиска метаматериала в инфракрасном и оптическом диапазоне частот» исследуется аналогия поиска метаматериала в оптическом и радиочастотном диапазонах. Эта аналогия имеет довольно глубокий физический смысл заключающееся в том, что свойства метаматериала в оптическом диапазоне согласуется с его свойствами в радиочастотном диапазоне.

В этой главе представлены результаты расчета волновой системы передачи аналогового сигнала для простых материалов и метаматериалов. Определены численные значения коэффициента усиления среды с метаматериалом при различных значениях частоты (рис. 12). Полученные результаты показывают, что на основе метаматериалов можно изменять сигналы как в радиодиапазоне, так и в оптическом диапазоне.

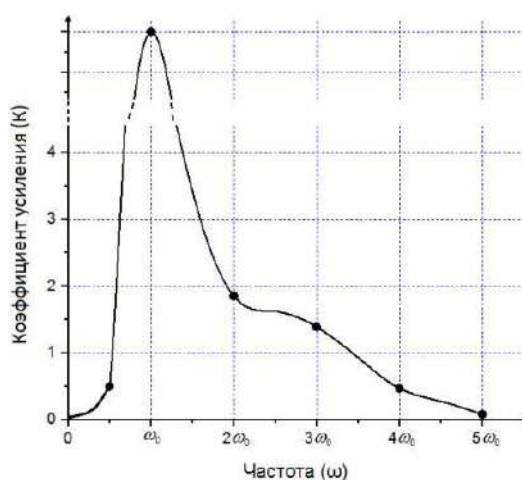


Рис.12. Зависимость коэффициента усиления от частоты.

Подобная аналогия позволяет предложить новый метод поиска метаматериалов в инфракрасном и оптическом диапазонах. Аналогия основана на сравнении отрицательного дифференциального поглощения центров окраски под терморadiационным воздействием в калиевоалюмооборотных стеклах добавками Fe_2O_3 и радиочастотным поглощением метаматериала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе выполненных научно-исследовательских работ по теме диссертации доктора философии (PhD) «Методы и модели повышения эффективности работы антенно-фидерных устройств на основе метаматериалов» представлены следующие выводы:

1. Смоделированы спектральные зависимости экваториального эффекта Керра нанокompозита выше и ниже перколяционного предела, на основе симметризованного приближения Максвелл-Гарнета и теории эффективной среды. Этот магнитооптический метод позволил не нарушая структуру нанокompозита изучить их свойства в широком спектре.

2. Расчеты, основанные на экваториальном эффекте Керра, показывают, что радиус r_0 нанокompозитных доменных гранул равен $1,5 \div 1,7$ нм. Экспериментальные данные также указывают на максимальный размер гранул $2 \div 4$ нм. Исходя из отрицательного параметра $\epsilon(\omega)$ в нанокompозитных материалах, их рекомендуется использовать в качестве метаматериалов в инфракрасном и оптическом диапазонах частот.

3. Разработана вероятностная и математическая модель метаматериала из элементов линии связи с распределенными параметрами. Расчеты по математической модели, основанные на решении полученной системы уравнений, позволили выявить материал с отрицательными параметрами магнитной и диэлектрической проницаемостью, это означает, что создаваемая модель материала действительно является дважды отрицательным метаматериалом. Разработана программа для расчета параметров метаматериала.

4. Анализ современных патч-антенных решеток показал, что использование метаматериалов в электрически малых антеннах и радиолокационных устройствах может привести к значительным преимуществам, в частности, к увеличению мощности передаваемого сигнала за счёт уменьшения боковых лепестков диаграммы направленности антенно-фидерных устройств.

5. Представлены экспериментальные результаты в частотном диапазоне генератора $0,6 \div 3$ ГГц по выбранному экспериментальному методу. В ходе экспериментов метаматериал не подключался к электрическим цепям, чтобы достичь максимального усиления сигнала выбрано оптимальное расстояние между метаматериалом и передающей антенной. В ходе экспериментов параметр напряженности поля был усилен до 10-15 дБмВ/м.

6. В ходе исследований на основе метаматериала первого образца в частотном диапазоне $2,2 \div 2,4$ ГГц до 10 %, на основе второго образца в частотном диапазоне $2,0 \div 2,2$ ГГц до 30 % улучшен параметр напряженности поля передающей антенны, т.е. созданы образцы метаматериала обладающие свойствами улучшения эффективности работы антенно-фидерных устройств.

7. Установлена взаимосвязь между отрицательным дифференциальным поглощением центров окраски при термическом воздействии в калийалюмооборотных стеклах с добавками Fe_2O_3 и радиопоглощением в метаматериалах. В данной работе вводится понятие аналогии, которое позволяет выявить новые способы поиска метаматериалов как в радиодиапазоне, так и в инфракрасном и оптическом диапазоне волн.

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

**SAMARKAND BRANCH OF TASHKENT UNIVERSITY OF
INFORMATION TECHNOLOGIES**

MIRZOKULOV KHOTAM BAKHTIYOR UGLI

**METHODS AND MODELS FOR IMPROVING THE EFFICIENCY OF
ANTENNA-FEEDER DEVICES BASED ON METAMATERIALS**

05.04.02 – Systems and Devices of Radio Engineering, Radio Navigation, a Radar-Location and
Television. Systems of Mobile, Fiber-Optical Communication

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

Tashkent – 2020

The theme of dissertation of doctor of philosophy (PhD) was registered at the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2020.2.PhD/T1617.

The dissertation has been prepared at Samarkand branch of Tashkent University of Information Technologies.

The abstract of the dissertation is posted in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) on the Scientific Council website of www.tuit.uz and on the website of «ZiyoNet» Information and Educational portal www.ziynet.uz.

Scientific adviser: **Salakhitdinov Amritdin Nuritdinovich**
Candidate of Sciences, Docent

Official opponents: **Pisetskiy Yuriy Valerevich**
Doctor of Technical Sciences, Docent

Shakhobiddinov Alisher Shopatkiddinovich
Doctor of Philosophy (Phd) of Technical Sciences

Leading organization: **Tashkent State Technical University named after I.Karimov**

The defense of dissertation will take place on the «25» November 2020 at 14⁰⁰ at the meeting of Scientific Council number DSc.13/30.12.2019.T.07.02 at Tashkent University of Information Technologies (address: 100202, Tashkent, Amir Temur str., 108. Tel.: (99871) 238-64-43; fax: (99871) 238-65-52; e-mail: tuit@tuit.uz).

The dissertation could be reviewed in the Information Resource Centre at Tashkent University of Information Technologies (registrated number No 2696). Address: 100202, Tashkent, Amir Temur str., 108. Tel.: (99871) 238-65-44.

The abstract of dissertation is distributed on: «14» November 2020 y.
(protocol at the register No. 5 on «13» November 2020 y.).



I.X. Siddikov
Chairman of the Scientific Council
awarding scientific degrees,
Doctor of Technical Sciences, Professor

Kh.E.Khujamatov
Scientific Secretary of the Scientific Council
awarding scientific degrees, doctor of philosophy
(PhD) of technical sciences, Associate Professor

A.A.Abdukayumov
Chairman of the Academic Seminar at the Scientific
Council awarding scientific degrees,
Doctor of Technical Sciences, Professor

INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

The aim of the research work is to increase the efficiency of antenna-feeder devices based on physical phenomena and processes observed in nanocomposites and metamaterials.

The object of the research work is an antenna-feeder device with increased efficiency based on a nanocomposite and a metamaterial.

The scientific novelty of the research work:

a mathematical model of a metamaterial with distributed parameters, which improves the parameters and characteristics of antenna-feeder devices was developed;

samples of metamaterial with distributed parameters based on communication line elements were obtained;

a method for increasing the efficiency of antenna-feeder devices using metamaterials with distributed parameters was developed;

a method of searching metamaterials with distributed parameters operating in radio and optical frequency ranges has been developed.

Implementation of research results: on the basis of the scientific results obtained using methods and models for increasing the efficiency of antenna-feeder devices based on metamaterials:

a mathematical model of the metamaterial with distributed parameters, which improves the parameters and characteristics of antenna-feeder devices and samples of metamaterial with distributed parameters based on communication line elements, introduced at the subordinate enterprises of the Ministry for Development of Information Technologies and Communications of the Republic of Uzbekistan, particularly, in the Samarkand regional junction «Uzmobile» of the branch of JSC «Uzbektelecom» (certificate No.33-8/4096 as of July 17, 2020 the Ministry for Development of Information Technologies and Communications of the Republic of Uzbekistan). As a result of scientific research, it is possible to increase the efficiency of antenna-feeder devices of base stations of mobile communication systems operating at frequencies of 1.7-2.1 GHz by 20-25%.;

the method of searching metamaterials with distributed parameters operating in radio and optical frequency ranges and the method of increasing the efficiency of antenna-feeder devices using metamaterials with distributed parameters were introduced at the subordinate enterprises of the Ministry for Development of Information Technologies and Communications of the Republic of Uzbekistan, particularly, in the Service Center of Samarkand, LLC «UMS» (certificate No.33-8/4096 as of July 17, 2020 the Ministry for Development of Information Technologies and Communications of the Republic of Uzbekistan). As a result of scientific research, it is possible to increase the efficiency of antenna-feeder devices of base stations of mobile communication systems operating at frequencies of 1.7-2.1 GHz up to 25%

the method of increasing the efficiency of antenna-feeder devices using metamaterials with distributed parameters and the method of searching metamaterials with distributed parameters operating in the radio and optical

frequency ranges introduced at the subordinate enterprises of the Ministry for Development of Information Technologies and Communications of the Republic of Uzbekistan, particularly, in the PE «Dildora-F» under the trademark «Turon telecom» (certificate No.33-8/4096 as of July 17, 2020 the Ministry for Development of Information Technologies and Communications of the Republic of Uzbekistan). As a result of scientific research, it is possible to increase the efficiency of MMDS antenna devices of the GT-5527100D transmitter operating in the 2.3-2.5 GHz frequency range used in the provision of television and radio broadcasting services by 15-20%.

The outline of the dissertation.The dissertation consists of an Introduction, four Chapters, Conclusion, Bibliography and Applications. The volume of the dissertation is 106 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (Часть I; Part I)

1. Yurasov A.N., Yashin M.M., Mirzokulov Kh.B., Ganshina E.A., Semenova D.B. The transverse Kerr effect, modeled in $(\text{CoFeZr})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{(1-x)}$ nanocomposites // Bulletin of the Russian academy of Sciences Physics, -2019, Vol. 83, No. 7, -p. 884-887 Scopus, Cite Score=0.7

2. Yashin M.M., Yurasov A.N., Ganshina E.A., Garshin V.V., Semenova D.V., Mirzokulov Kh.B., Danilov G.E. Simulation of the spectra of the transverse Kerr Effect of magnetic nanocomposites FeCoZr-Al₂O₃// Herald Of the Bauman Moscow state technical university, Series Natural Sciences, -2019 Vol. 83, Issue 5 pp.63-72 (05.00.00, №16)

3. Urinov X.O., Salakhitdinov A.N., Mirzokulov Kh.B. Determining the magnetization of thin films by measuring torque // Bulletin of the Russian academy of Sciences Physics, -2019, Vol. 83, No. 7, -p. 872-874 Scopus, Cite Score=0.7

4. Salakhitdinova M.K., Salakhitdinov A.N., Mirzokulov Kh.B. Nonlinear effects of gamma irradiation on EPR spectra in Magneto-optical potassium-aluminum-borate glasses // Bulletin of the Russian academy of Sciences Physics, -2019, Vol. 83, No. 7, -p. 832-834 Scopus, Cite Score=0.7

5. Salakhitdinov A.N., Mirzokulov Kh.B. Metamaterials an electrically small antennas and radar technology //“Muhammadal-Xorazmiyavlodlari” ilmiy-amaliy va axborot-tahliliy jurnal, -2019 4(10), -p. 72-76 (05.00.00, №10)

6. Yurasov A., Yashin M., Ganshina E., Granovsky A., Garshin V., Semenova D., Mirzokulov Kh. Simulation of magneto-optical properties of nanocomposites $(\text{CoFeZr})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{(1-x)}$ // Journal of Physics: Conference series, -2019, Vol. 1389, Issue 1, 012113 Scopus, Cite Score=0.7

7. Уринов Х.О., Жуманов Х.А., Салахитдинов А.Н., Насимов Х., Мирзокулов Х.Б., Хидиров А.М. Основное состояние тонких магнитных пленок и фазовые диаграммы // Самарқанд давлат университети илмий тадқиқотлар ахборотномаси, 2019 т. 113, № 1, с. 90-93. ISSN 2091-5446 (01.00.00, №2)

II бўлим (Часть II; Part II)

8. Яшин М.М., Мирзокулов Х.Б. Симметризованное приближение Максвелла–Гарнетта как эффективный метод исследования нанокомполитов // Российский технический журнал, том 7, № 4, 2019, стр. 92-99

9. Салахитдинов А.Н., Мирзокулов Х.Б. Создание метаматериалов по динамико-эволюционному способу расчета передающей линии связи с распределенными параметрами // Динамика систем, механизмов и машин, том 7, № 2, 2019, стр. 254-261

10. Мирзокулов Х.Б. Метаматериалы в электросвязи //XXI Молодежная международная научно-техническая конференция «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы – 2019», Москва, 2019, стр. 126-129

11. Yurasov A.N., Yashin M.M., Mirzokulov Kh.B. and etc. Simulation of optical and magneto-optical properties of nanocomposites $(\text{CoFeZr})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{(1-x)}$ // VII Euro-Asian Symposium “Trends in magnetism”. 2019, Ekaterinburg, стр.446-447, ISBN 978-5-9500855-7-4

12. Мирзокулов Х.Б., Салахитдинов А.Н., Салахитдинова М.К. Нелинейные эффекты гамма-облучения по спектрам ЭПР в магнитооптических калиевоалюмооборотных стеклах // Актуальные проблемы физики. Сборник республиканской научно-практической конференции. Ташкент, 2017, стр. 197-198

13. Салахитдинов А.Н., Мирзокулов Х.Б., Салахитдинова М.К. Спектры поглощения калиевоалюмооборотных стёкол с добавками оксида железа при радиационных и терморadiационных воздействиях // Всероссийская конференция-школы с международным участием, электронные, спиновые и квантовые процессы в молекулярных и кристаллических системах, Уфа, Россия, 2019, стр.19. ISBN 978-5-907176-12-6

14. Мирзокулов Х.Б., Салахитдинова М.К. Перспективы развития метаматериалов и их применение в отраслях радиосвязи, телевидении и компьютерной технологии. Материалы второй международной молодёжной конференции «Информационные технологии и технологии коммуникации», Астрахань, Россия, 2018, стр.64

15. Мирзокулов Х.Б., Салахитдинов А.Н. Аналогия между дифференциальным поглощением центров окраски и мощностью передачи сигнала в метаматериалах, Инновационные идеи в разработке информационно-коммуникационных технологий и программных обеспечений. Сборник докладов республиканской научно-технической конференции, 2020, стр. 205-208

16. Мирзокулов Х.Б., Салахитдинов А.Н. Теория создания метаматериалов по динамико-эволюционному способу. Инновационные идеи в разработке информационно-коммуникационных технологий и программных обеспечений. Сборник докладов республиканской научно-технической конференции, 2020, стр. 208-211

17. Салахитдинов А.Н., Мирзокулов Х.Б. Метаматериалы в электросвязи. Сборник докладов республиканской научно-технической конференции //Иновационные идеи в области ИКТ и программного обеспечения. Самарканд, 2019, стр 38-40

18. Мирзокулов Х.Б., Салахитдинов А.Н. Метаматериал параметрларини ҳисоблаш учун дастурий восита // Ўзбекистон Республикаси интеллектуал мулк агентлиги. Электрон ҳисоблаш машиналари учун яратилган расмий рўйхатдан ўтказилганлиги тўғрисидаги гувоҳнома № DGU 06910, 13.09.2019

Автореферат «Муҳаммад ал-Хоразмий авлодлари» илмий журнали таҳририятида ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги матнларининг мослиги текширилди (12.11.2020).

Бичими: 84x60 ¹/₁₆. «Times New Roman» гарнитураси.
Рақамли босма усулда босилди.
Шартли босма табағи: 3. Адади 100. Буюртма № 203.

Гувоҳнома № 10-3719
“Тошкент кимё технология институти” босмаҳонасида чоп этилган.
Босмаҳона манзили: 100011, Тошкент ш., Навоий кўчаси, 32-уй.