

ՀՀ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ, ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ, ՄՇԱԿՈՒՅԹԻ ԵՎ ՍՊՈՐՏԻ
ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ
ՀՀ ԳԱԱ ՌԱԴԻՈՖԻԶԻԿԱՅԻ ԵՎ ԷԼԵԿՏՐՈՆԻԿԱՅԻ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ

ԱՏԵՓԱՆՅԱՆ ԱՐԱՐԱՏ ՀԵՆՐԻԿԻ

**ՄԱԳՆԻՍ-ԴԻԷԼԵԿՏԻԿ ՆՅՈՒԹԵՐԻ ԵՎ ԿԵՆՏՐՈՆԱՅՎԱԾ
ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐՈՎ ՌԵԶՈՆԱՏՈՐՆԵՐԻ ՀԻՄԱՆ ՎՐԱ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆԱՊԵՍ
ՓՈՔՐ ԱՆՏԵՆԱՆԵՐ**

Ա.04.03 - Ռադիոֆիզիկա մասնագիտությամբ
ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների թեկնածուի
գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության
ՍԵՂՄԱԳԻՐ
ԵՐԵՎԱՆ 2024

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ, КУЛЬТУРЫ И СПОРТА РА
ИНСТИТУТ РАДИОФИЗИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ НАН РА

Степанян Арагат Генрикович

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИ МАЛЫЕ АНТЕННЫ НА ОСНОВЕ МАГНИТО-
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И РЕЗОНАТОРОВ С
СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук по специальности

01.04.03 - „Радиофизика,,

ЕРЕВАН – 2024

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Ռադիոֆիզիկայի և էլեկտրոնիկայի
ինստիտուտում:

Գիտական ղեկավար՝

տ.գ.թ., դոցենտ

Հ.Ս. Հարոյան

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝ տ.գ.դ., պրոֆեսոր

Վ.Հ. Ավետիսյան

Ֆ.մ.գ.դ., պրոֆեսոր

Ա.Ժ. Բաբաջանյան

Առաջատար կազմակերպություն՝ Հայ-Ռուսական Համալսարան

Պաշտպանությունը կայանալու է 2024թ. Հունիսի 15-ին ժամը 12:00-ին

Երևանի պետական համալսարանի 049 ֆիզիկայի մասնագիտական խորհրդի
նիստում: Հասցե՝ 0025, Երևան, Ա. Մանուկյան 1:

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ԵՊՀ գրադարանում:

Սեղմագիրն առաքված է 2024թ. մայիսի 10-ին:

Մասնագիտական խորհրդի

գիտական քարտուղար՝



Ֆ.մ.գ.թ., դոցենտ

Վ.Պ. Քալանթարյան

Тема диссертации утверждена в Институте Радиофизики И Электроники

Научный руководитель:

к.т.н., доцент

Օ.Տ. Արոյան

Официальные оппоненты:

д.т.н., профессор

Վ.Գ. Ավետիսյան

д.ф.м.н., профессор

Ա.Ջ. Բաբադջանյան

Ведущая организация:

Российско-армянский государственный
университет

Защита диссертации состоится 15 Июня 2024г. в 12:00

на заседании специализированного совета 049 по физике Ереванского
государственного университета по адресу: 0025, Ереван, ул. А. Манукяна 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЕГУ.

Автореферат разослан 10 мая 2024г.

Ученый секретарь

специализированного совета:



к.ф.м.н., доцент

Վ.Պ. Կալանթարյան

ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԸՆԴՀԱՆՈՒՐ ԲՆՈՒԹԱԳԻՐԸ

Աշխատանքի արդիականությունը

Շարժական ռադիոկապի սրընթաց զարգացմանը զուգահեռ փոքրաչափ սարքերի կիրառումը մի շարք համակարգերում առաջնային և արդիական խնդիր է համարվում: Չափերին դրվող պահանջներին զուգահեռ, լայնաշերտ շղթաները մեծ հետաքրքրություն են ներկայացնում՝ համակարգին օժտելով մի շարք առավելություններով՝ հզորության փոքր ծախս, տվյալների փոխանցման բարձր արագություն, ցածր արժեք և այլն: Այսպիսով՝ փոքր չափերը և միաժամանակ հաճախությունների լայն տիրույթում աշխատելու հնարավորությունը շահեկանորեն առանձնացնում է այդպիսի հատկություններով սարքերը: Ռադիոտեխնիկական համակարգերի կարևորագույն բաղադրիչի՝ անտենաների նախագծման ընթացքում նույնպես առաջանում է վերը նշված հատկությունների ստացման անհրաժեշտություն: Նման պահանջներ դրվում են հատկապես անլար կապի, կենսաթշկական, ռադարային, էլեկտրոնային պաշտպանության, արբանյակային կապի և այլ համակարգերում: Ներկայումս էլեկտրականապես փոքր անտենաները (ԷՓԱ) ուշագրավ են իրենց փոքր չափերով և ինտեգրալ միկրոսխեմաներում ինտեգրվելու ունակությամբ [1-3]: Այնուամենայնիվ նման անտենաների նախագծումը բարդ խնդիր է համարվում, քանի որ դրանց բնութագրերը (հաճախային շերտ, ճառագայթման էֆեկտիվություն, ուժեղացման գործակից) խիստ կախված են անտենայի չափ-աշխատանքային ալիքի երկարություն հարաբերակցությունից [3-5]: Էլեկտրականապես փոքր անտենայի գաղափարը ձևավորվել է աշխատանքային ալիքի երկարությունից շատ անգամ փոքր չափերով անտենայով էլեկտրամագնիսական ալիքների էֆեկտիվ ճառագայթում/ընդունում իրականացնելու հնարավորությամբ: Բազմաթիվ մեթոդներ են առաջ քաշվել՝ ստանալու էլեկտրականապես փոքր անտենաներ: Այդ մեթոդները ավելի մանրամասն ներկայացվում են Գլուխ 1-ում: Մեծ

հետաքրքրություն են ներկայացնում նյութերի հիման վրա անտենաների չափափոքացումը, որոնք ունեն բարձր ինտեգրելիություն էլեկտրական միկրոսխեմաներում: Անտենայում կիրառվող դիէլեկտրիկ նյութերի դիէլեկտրիկական թափանցելիության մեծացմամբ հնարավոր է ավելի փոքրացնել անտենայի չափերը՝ նյութում ալիքի փուլային արագության նվազման հաշվին: Մարտահրավերային է բարձր հաճախություններում նման նյութերի արտադրությունը, որոնցում կապահովվի փոքր կորուստներ ունենալու անհրաժեշտ պայմանը: Ներկայումս իրագործելի է մինչև $\epsilon_r \leq 25$ դիէլեկտրիկական թափանցելիությամբ նյութերի արտադրությունը գերբարձր հաճախային տիրույթում: Այս մեթոդը, սակայն, ունի մի շարք թերություններ: Վերջիններս պայմանավորված են անտենայի բարորակության մեծացմամբ և էֆեկտիվության նվազմամբ [6]: Այդպիսի նյութերի օգտագործումը լուծում է միայն փոքր անտենայի ստացման խնդիրը՝ վատթարացնելով դրա բնութագրերը: Աշխատանքում իրականացվել է մագնիսադիէլեկտրիկ նյութերի (ՄԴՆ) հիման վրա անտենայի չափափոքացման մեթոդի հետազոտումը: Այսպիսի նյութերը վերջին շրջանում գրավում են արդյունաբերության ուշադրությունը և որոշ քայլեր են ձեռնարկվում դրանց արտադրության համար: Մագնիսադիէլեկտրիկ նյութերը՝ միևնույն ժամանակ օժտված լինելով ինչպես էլեկտրական, այնպես էլ մագնիսական հատկություններով, փոքրացնում են անտենայի չափը նույն սկզբունքով ինչպես դիէլեկտրիկները՝ միևնույն ժամանակ ապահովելով ավելի լայն հաճախային շերտ և ավելի բարձր էֆեկտիվություն [7]: Բացի այդ, տարբեր կառուցվածքի մագնիսադիէլեկտրիկ նյութերը իրենց համարժեք մագնիսական և էլեկտրական դիպոլների համադրության շնորհիվ հնարավորություն են տալիս մեծացնելու անտենայի ուղղորդվածությունը: Այդպիսով՝ հնարավոր է միաժամանակ լուծել էլեկտրականապես փոքր անտենաների նախագծման կարևորագույն երկու խնդիրները՝ բարորակության նվազագույն արժեքի և ուժեղացման գործակցի առավելագույն արժեքի ստացումը:

Աշխատանքի նպատակը

1. Էլեկտրականապես փոքր անտենաների չափափոքրացման առկա եղանակների համեմատական վերլուծություն;
2. Էլեկտրականապես փոքր անտենաների հետազոտական և սիմուլացիոն մոդելների մշակում հիմնված մագնիսադիէլեկտրիկ նյութերի վրա՝ ապահովելով անտենայի նվազագույն բարորակությունը ստանալու պայմանները;
3. մագնիսադիէլեկտրիկ տակդիրի վրա էլեկտրականապես փոքր անտենայի նախագծում, նախատիպի մշակում, բնութագրերի վերլուծություն և դիէլեկտրիկ նյութերի նկատմամբ դրանց կիրառման առանձնահատկությունների վերլուծություն;
4. Վիվալդի տիպի լայնաշերտ անտենայի օրինակով չափափոքրացման հիմնական սահմանափակումների հետազոտում և անտենայի բնութագրերի վերլուծություն բարձր թափանցելիությամբ դիէլեկտրիկական և մագնիսադիէլեկտրիկական նյութերի կիրառմամբ;
5. Հյուսիսի աղբյուր տիպի գերուղղորդված անտենայի տեսական մոդելի և կառուցվածքի մշակում: Մագնիսադիէլեկտրիկ կիսագնդաձև կառուցվածքների միջոցով Հյուսիսի աղբյուրի ստացում և դրանով միկրոշերտավոր անտենայի չափափոքրացում:

Գիտական նորույթը

1. Էլեկտրականապես փոքր լայնաշերտ և արդյունավետ անտենաներ ստանալու համար առաջարկվել է օգտագործել մագնիսադիէլեկտրիկ նյութեր, որպես միկրոշերտավոր անտենաների տակդիր: Ցույց է տրվել մագնիսադիէլեկտրիկ նյութերի կիրառմամբ միկրոշերտավոր անտենայի չափափոքրացումը և միևնույն ժամանակ դրա հաճախային շերտի լայնացումը:
2. Ներկայացվել է ՄԴՆ կիրառման առանձնահատկությունը միկրոշերտավոր փուլավորված անտենային ցանցում: Ապացուցվել է նման

նյութերի միջոցով անտենային ցանցում էլեմենտների միջև մեկուսացման աստիճանի բարձրացումը:

3. Օգտագործելով YIG ֆերոմագնիսի արտաքին մագնիսական դաշտի ազդեցությամբ նյութի մագնիսական թափանցելիության մեծացման հատկությունը բարձր հաճախային տիրույթում, մշակվել և նախագծվել է դրա հիմքով էլեկտրականապես փոքր միկրոշերտավոր անտենայի (ԷՓՄԱ) նախատիպը, որի չափերը փոքրացվել է 4 անգամ իսկ աշխատանքային հաճախային շերտը ընդլայնվել է մինչև 500 ՄՀց՝ 1,5 ԳՀց կենտրոնական հաճախությունում:

4. Նշելով բերված մեթոդի թերությունը՝ այն է փոքր ուժեղացման գործակցի ստացումը, որը պայամանավորված է անտենայի փոքր չափերով, առաջարկվել է գերուղղորդված փոքր անտենայի կառուցվածք՝ հիմնված «Հյուգենսի աղբյուրի» սկզբունքի վրա: Այդ կառուցվածքը ստացվել է մագնիսադիէլեկտիկ ռեզոնատորի միջոցով, որով ծածկված է թիրախայինից բարձր ռեզոնանսային հաճախությամբ միկրոշերտավոր անտենան: Ցույց է տրվել, որ մագնիսադիէլեկտիկ ռեզոնատորի կիրառմամբ ռեզոնանսային հաճախությունը նվազում է ավելին քան հինգ անգամ՝ ապահովելով 190 ՄՀց հաճախային շերտ, իսկ ուժեղացման գործակիցը ավելին է քան ոչ փոքրացված, միևնույն աշխատանքային հաճախությամբ միկրոշերտավոր անտենայինը:

Պաշտպանության ներկայացվող հիմնական դրույթները

1. ՄԴՆ-երի կիրառմամբ հնարավոր է զգալի նվազեցնել անտենայի չափերը և բարելավել (լայնացնել) անտենայի հաճախային շերտը՝ ստանալով լայնաշերտ էլեկտրականապես փոքր անտենա՝ այդպիսով լուծելով փոքր անտենաների նախագծման սահմանափակումը կապված դրանց բնորոշ բարձր բարորակության հետ՝ ի համեմատ ներկայումս կիրառվող չափափոքրացման մեթոդների:

2. Անտենայի մակերևութային հոսանքների և մոտակա դաշտերի բաշխվածությունների վերլուծությունը ցույց է տալիս մագնիսա-դիէլեկտրիկ նյութերի կիրառմամբ փուլավորված անտենային ցանցի բնութագրերի՝ մասնավորապես էլեմենտների միջև մեկուսացման աստիճանի և հաճախային շերտի բարելավումը:

3. Ֆերոմագնետիկ նյութերի՝ մասնավորապես YIG-ը, արտաքին հաստատուն մագնիսական դաշտի ազդեցությամբ մագնիսական հատկությունների փոփոխման շնորհիվ, հնարավորություն է ընձեռվում կառավարել՝ նվազեցնել դրա հիմքով մշակված անտենայի ռեզոնանսային հաճախությունը և միևնույն չափի անտենան նախագծել ավելի ցածր հաճախություններում՝ ապահովելով լայնաշերտություն:

4. Կիսագնդաձև մագնիսա-դիէլեկտրիկ ռեզոնատորների կիրառմամբ անտենան օժտվում է գերուղղորդվածությամբ և հաճախային շերտը զգալի բարելավվում է:

Գործնական արժեքը

ՄԴՆերի կիրառմամբ էՓԱ-ների հետազոտման արդյունքները կարող են օգտագործվել ռադիոտեխնիկական մի շարք համակարգերի չափափոքացման խնդիրներում, մասնավորապես թռչող օբյեկտների կապի ապահովման խնդիրներում, կենսաբժշկական համակարգերում. արբանյակային կապում և այլուր:

Սույն ատենախոսության շրջանակներում կատարված հետազոտությունների արդյունքում ցույց է տրվել մագնիսադիէլեկտրիկ նյութերի կիրառմամբ էՓԱ-ների հաճախային շերտի լայնացումը և ուժեղացման գործակցի աճը: Այս արդյունքները հնարավորություն կտան կիրառել փոքր անտենա՝ միաժամանակ ապահովելով բարելավված բնութագրեր:

Աշխատանքի ներկայացումը

Ատենախոսության հիմնական արդյունքները զեկուցվել են IET International Conference on Microwave and THz Technologies, Wireless Communications and OptoElectronics, IRPhE 2022 և XVI Annual Scientific Conference of RAU միջազգային գիտաժողովներում:

Հրապարակումները

Ատենախոսության հիմնական արդյունքները տպագրվել են 5 գիտական աշխատանքներում, որոնց ցուցակը ներկայացված է սեղմագրի վերջում:

Ատենախոսության կառուցվածքը

Ատենախոսությունը բաղկացած է առաջաբանից, չորս գլխից, եզրակացությունից և 88 անուն պարունակող գրականության ցանկից:

Աշխատանքում կա 54 նկար և 5 աղյուսակ: Աշխատանքի ընդհանուր ծավալը 109 էջ է:

ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆԸ

Առաջաբանի մեջ հիմնավորված է աշխատանքի արդիականությունը, ձևակերպված են նպատակներն ու խնդիրները, ինչպես նաև պաշտպանության ներկայացվող հիմնական դրույթները: Ներկայացված են աշխատանքի գիտական նորույթը և գործնական արժեքը:

Առաջին գլխում ներկայացվում է էլեկտրականապես փոքր անտենաների ընդհանուր տեսությունը:

1.1 - 1.4 պարագրաֆներում տրվում է էլեկտրականապես փոքր անտենաների սահմանումը, ամփոփվում է դրանց ստացման կարևոր աշխատությունները, որոնք ընդգրկում են հնարավոր բոլոր սահմանափակումները: Քննարկվում է անտենայի նվազագույն բարորակությանը և առավելագույն ուժեղացման գործակցին վերաբերող հարցերը:

1.5 պարագրաֆում անդրադարձ է կատարվում էլեկտրականապես փոքր անտենաների նախագծման մեթոդներին և տեսակներին: Բերվում է համեմատական վերլուծություն առկա մեթոդների վերաբերյալ՝ շեշտելով յուրաքանչյուր մեթոդի առավելություններն ու թերությունները: Նշվում է հետազոտվող մեթոդի հիմնական առաձնահատկությունները:

Մագնիսադիէլեկտրիկներն այն նյութերն են, որոնց դիէլեկտրիկական և մագնիսական թափանցելիությունները մեծ են մեկից՝ $\epsilon_r > 1$, $\mu_r > 1$, բարձր հաճախային տիրույթում: Մագնիսադիէլեկտրիկ նյութերի հիման վրա անտենայի չափափոքացումը պայմանավորված է միջավայրում ալիքի տարածման արագության, հետևաբար ալիքի երկարության փոքրացմամբ [3]՝

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \quad (1)$$

Միջավայրի ալիքային դիմադրությունը կախված է այդ միջավայրի դիէլեկտրիկական և մագնիսական թափանցելիությունից և որոշվում է հետևյալ արտահայտությամբ [3]՝

$$Z = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \quad (2)$$

որտեղ Z_0 -ն վակուումում ալիքային դիմադրությունն է:

Ընտրելով $\mu_r = \epsilon_r$ բնութագրերով նյութ, տակդիրի ալիքային դիմադրությունը համաձայնեցված կլինի ազատ տարածության ալիքային դիմադրությանը: Այսպիսի նյութերի օգտագործումը հնարավորություն է տալիս ստանալ փոքր անտենա բարելավված էֆեկտիվությամբ և համաձայնեցված լայն հաճախային շերտում:

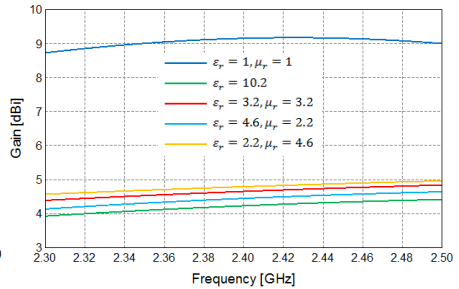
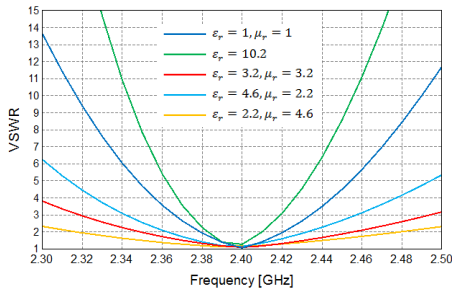
Երկրորդ գլուխը նվիրված է մագնիսադիէլեկտրիկ նյութերի հիման վրա միկրոշերտավոր անտենայի և անտենային ցանցի չափերի փոքրացմանը:

2.1-ում ներկայացվում է միկրոշերտավոր անտենաների կառուցվածքը և հաշվարկման մեթոդները:

2.2-ում քննարկվում է միկրոշերտավոր անտենայի էֆեկտիվության և հաճախային շերտի կախվածությունը անտենայի կառուցվածքից և կիրառվող նյութերից: Ներկայացվում է անտենայի նախագծումը էլեկտրամագնիսական սիմուլացիոն միջավայրում տարբեր տակդիրների դեպքում: Հետազոտվում է անտենայի բնութագրերը միևնույն հաստությամբ և կորուստներով տակդիրի դեպքում՝ դրա տարբեր դիէլեկտրիկական և մագնիսական թափանցելիությունների դեպքում: Ամփոփվում է կիրառվող տակդիրների դիէլեկտրիկական և մագնիսական թափանցելիությունների ազդեցությունը անտենայի հիմնական բնութագրերի վրա:

Միկրոշերտավոր անտենայի մակերեսը գրեթե նույնն է ինչպես բարձր դիէլեկտրիկական թափանցելիությամբ դիէլեկտրիկի, այնպես էլ $\epsilon_r \mu_r = \epsilon_p = 10.2$ բնութագրերով մագնիսադիէլեկտրիկի կիրառման դեպքերում և 7,12 անգամ ավելի փոքր է առանց տակդիրի միկրոշերտավոր անտենայից: Բարձր դիէլեկտրիկական թափանցելիությամբ դիէլեկտրիկի կիրառմամբ անտենայի հաճախային տիրույթը փոքրանում է, որը պայմանավորված է անտենայի մակերևույթում դաշտի կուտակմամբ: Դիտարկված դիէլեկտրիկական թափանցելիության դեպքում՝ $\epsilon_p = 10.2$, անտենայի բացարձակ հաճախային շերտը 1,12 % է: Մագնիսադիէլեկտրիկի կիրառմամբ անտենայի հաճախային տիրույթը աճում է, ընդ որում այն առավելագույն է $\epsilon_r < \mu_r$ բնութագրերով տակդիրի դեպքում: Նկ. 1-ում բերվում է տարբեր բնութագրերով տակդիրների դեպքում միկրոշերտավոր անտենայի կանգուն ալիքի գործակցի (ԿԱԳ) և ուժեղացման գործակցի (ՈւԳ) հաճախային կախվածությունները:

Անտենայի հաճախային շերտի աճը բացատրվում է մակերևույթային հոսանքների բաշխվածության միջոցով (տե՛ս Նկ. 2): Մագնիսադիէլեկտրիկ տակդիրի դեպքում անտենայում կուտակված էներգիան նվազում է մագնիսական թափանցելիության մեծացմանը զուգընթաց:

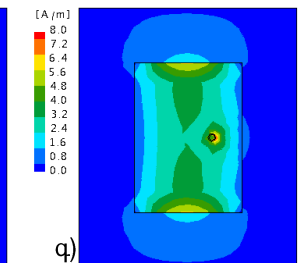
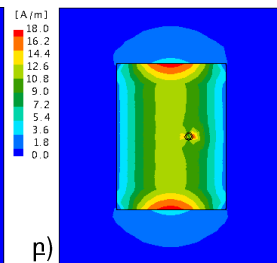
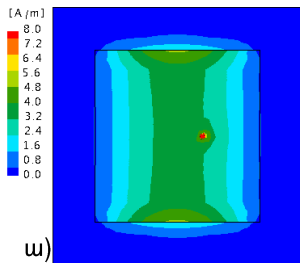


Նկ. 1: Միկրոշերտավոր անտենայի ԿԱԳ-ի և ՈՒԳ-ի հաճախային կախվածությունները տարբեր տակդիրների դեպքում

Աղյուսակ 1-ում ամփոփ ներկայացված է տարբերի տակդիրների հիման վրա միկրոշերտավոր անտենաների մակերեսները և հաճախային շերտերը:

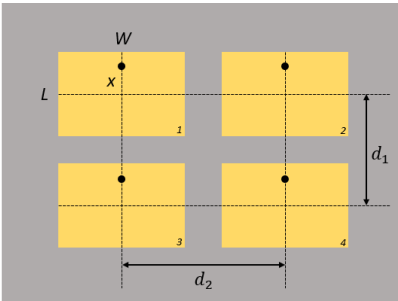
Աղյուսակ 1: Միկրոշերտավոր անտենայի մակերեսը և հաճախային շերտը տարբեր տակդիրների դեպքում

Տակդիրի (ϵ_r) թափանցելիություն	Տակդիրի (μ_r) թափանցելիություն	Անտենայի մակերեսը (մմ ²)	Անտենայի հաճախային շերտը (ձ,%)
1	1	8143,5	1,66
3.58	1	3808,09	2,6
10.2	1	1964,58	1,12
3.2	3.2	1964,58	4,41
4.6	2.2	1964,58	2,91
2.2	4.6	1964,58	6,37



Նկ.2: Միկրոշերտավոր անտենայի մակրոույթային հոսանքների բաշխվածությունը տարբեր տակդիրների դեպքում. ա) $\epsilon_r = \mu_r = 1$; բ) $\epsilon_r = 10.2$, $\mu_r = 1$; գ) $\epsilon_r = \mu_r = 3.2$

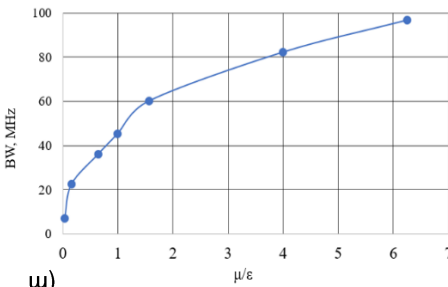
2.2 պարագրաֆում ներկայացվում է անտենային ցանցում մագնիսադիէլեկտրիկ նյութերի օգտագործման հատկությունները: Նախագծվել է 2×2 չափի հարթ փուլավորված անտենային ցանց (նկ. 3) և սիմուլացվել է անտենային ցանցում էլեմենտների միջև փոփազդեցությունը՝ հիմնվելով անտենային ցանցում մակերևութային հոսանքների բաշխվածության վրա: Դուրս է բերվում նյութի բնութագրերի ազդեցությունը անտենային ցանցի հաճախային շերտի (նկ.4) և էլեմենտների միջև մեկուսացման վրա (նկ.5):



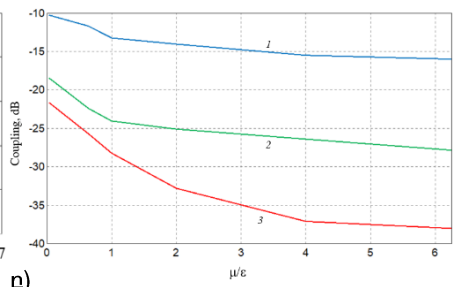
Նկ.3: 2×2 միկրոշերտավոր փուլավորված անտենային ցանցի կառուցվածքը

Հաճախային շերտը նվազագույնն է բարձր թափանցելիությամբ և առանց մագնիսական բաղադրիչ պարունակող տակդիրի դեպքում ($BW = 7$ ՄՀց): Տակդիրի դիէլեկտրիկական թափանցելիությունը մեծացնելիս

անտենային ցանցի հաճախային շերտը նվազում է: Դրա արժեքը մեծանում է մագնիսադիէլեկտրիկական նյութի կիրառման դեպքում: Մեր դիտարկած օրինակում, որտեղ $\mu_r \epsilon_r = 25$ և $\mu_r / \epsilon_r = 6,25$, հաճախային շերտը $BW = 96$ ՄՀց է:



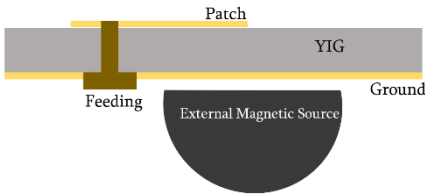
ա)



բ)

Նկ.4: Անտենային ցանցի հաճախային շերտի (ա) և էլեմենտների միջև մեկուսացման (բ) կախվածությունը μ_r/ϵ_r հարաբերակցությունից (1 – S_{21} ; 2 – S_{31} ; 3 – S_{41})

2.3 պարագրաֆում փորձարկվում է YIG տեսակի ֆերիտային տակդիրը, որի վրա իրականացվում է կոաքսիալ սնուցմամբ ուղղանկյունաձև միկրոշերտավոր անտենա: Հիմնվելով YIG նյութի առանձնահատկության վրա, այն է՝ արտաքին մագնիսական դաշտի ազդեցությամբ նյութի բնութագրերի փոփոխում (կառուցվածքը բերվում է նկ.5-ում), ստացվել է լայնաշերտ փոքր միկրոշերտավոր անտենա: Ամփոփվում է կիրառվող մեթոդի առավելությունների և թերությունների քննարկումով:



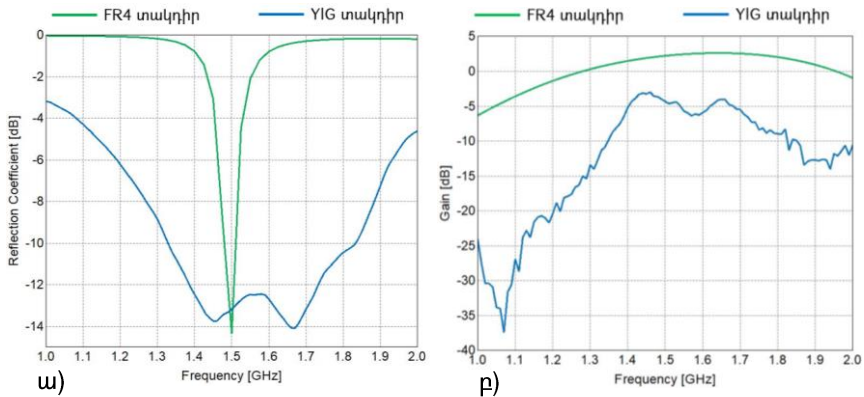
Նկ.5: Արտաքին մագնիսական դաշտի ազդեցությամբ YIG հիմքով միկրոշերտավոր անտենայի կառուցվածքը

YIG ֆերիտային նյութի մագնիսական թափանցելիության հաճախային կախվածությունը ներկայացվում է Շլյմանի հավասարմամբ [8].

$$\mu_r = \frac{2}{3} \sqrt{1 - \left(\frac{\gamma \cdot 4\pi M_s}{\omega} \right)^2} + \frac{1}{3} \quad (3)$$

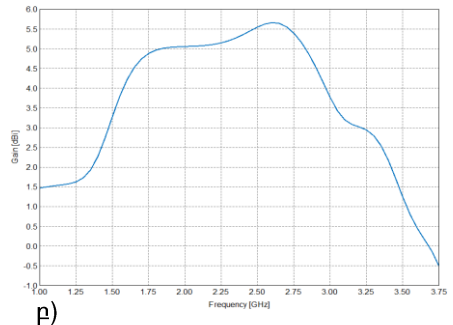
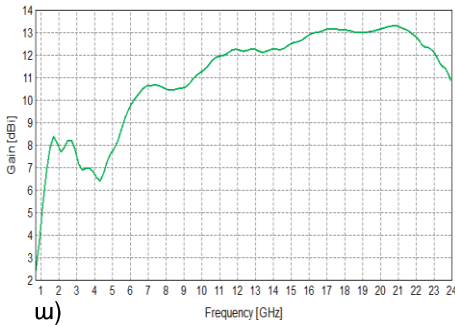
որտեղ γ - ն գիրոմագնիսական գործակիցն է, ω - ն՝ հաճախությունը և $4\pi M_s$ - ը՝ հագեցվածության մագնիսացումը: Ինչպես երևում է 3 հավասարումից, YIG նյութի մագնիսական թափանցելիությունը կարող է ղեկավարվել մագնիսացման փոփոխմամբ:

YIG հիմքով և FR4 հիմքով միկրոշերտավոր անտենաների միջև համեմատական վերլուծությունը ցույց է տալիս, որ YIG հիմքով անտենան ապահովում է 9 անգամ ավելի լայն հաճախային շերտ՝ 3 անգամ փոքր չափերում: Անշուշտ, անտենայի ուժեղացման գործակիցը 6 դԲ-ով ավելի փոքր է իր փոքր չափերի պատճառով (նկ.6):



Նկ.6: Արտաքին մագնիսական դաշտի ազդեցությամբ YIG հիմքով և FR4 հիմքով միկրոշերտավոր անտենաների անդրադարձման (α) և ուժեղացման (β) գործակիցների հաճախային կախվածությունը

Երրորդ գլուխը նվիրված է գերլայնաշերտ անտենաների չափափոքրացմանը: Ցույց է տրվել, որ մագնիսադիէլեկտրիկ կիրառմամբ անտենայի ուժեղացման գործակցի հաճախային շերտն ավելի լայն է, քան բարձր թափանցելիությամբ դիէլեկտրիկի դեպքում, ինչը պայմանավորված է վերջինիս սնուցման տեղամասում էլեկտրական դաշտի կուտակմամբ: Ներկայացվել է գերլայնաշերտ անտենաներում բարձր գործակցով չափափոքրացման առանձնահատկությունները: Ցույց է տրվել, որ բարձր դիէլեկտրիկական և մագնիսական թափանցելիությամբ մագնիսադիէլեկտրիկ նյութի կիրառման դեպքում անտենայի թողարկման շերտը նեղանում է (նկ.7): Առանց տակդիրի անտիպոդալ Վիվալդի անտենայի թողարկման շերտը ավելին քան 9 անգամ գերազանցում է բարձր չափափոքրացման գործակցով ($\epsilon_r = \mu_r = 8$) անտիպոդալ Վիվալդի անտենայի թողարկման շերտից:

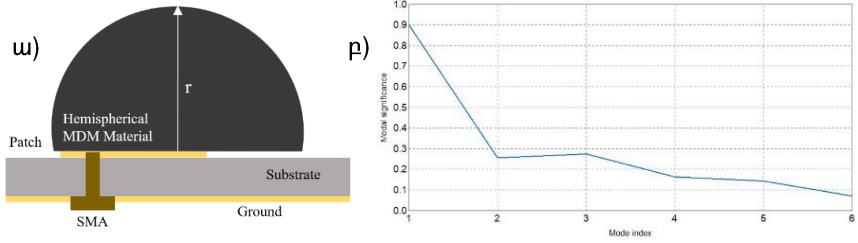


Նկ. 7: Առանց տակդիրի (ա) և բարձր չափափոքրացման գործակցով մագնիսադիէլեկտրիկ նյութի հիման վրա ($\epsilon_r = \mu_r = 8$) (բ) անտիպոդալ Վիվալդի անտենայի ուժեղացման գործակցի հաճախային կախվածությունը

Չորրորդ գլխում ներկայացվում է էլեկտրականապես փոքր անտենաների ուժեղացման գործակցի բարելավման խնդիրը: Իրենց փոքր չափերի պատճառով նախագծված անտենաների ուժեղացման գործակիցը փոքր է և չափերի փոքրացման հետ դրանց ճառագայթման հատկությունները նմանվում են էլեկտրական կամ մագնիսական դիպոլի: Սա նշանակում է, որ ինչպես ուժեղացման գործակիցը, այնպես էլ գլխավոր և կողային թերթիկների մակարդակների հարաբերակցությունները փոքր են: Հարինգտոնը սահմանեց առավելագույն ուղղորդվածության սահմանը տրված (θ_0, φ_0) ուղղությամբ կախված համարժեք սֆերիկ N մոդերից՝ $D = N^2 + 2N$, որտեղ $N = \beta r$: Ուստի առավելագույն ուղղորդվածությունը անտենայի չափերից կախված մեծություն է և դրանց միջև գործում է հետևյալ կապը՝ $D = \beta R^2$: Նման կապը սահմանափակում է ուժեղացման գործակցի բարձր արժեքը էլեկտրականապես փոքր անտենաների համար:

4.1-ում բերվում է գերուղղորդված անտենաների ստացման մեթոդները: Գերուղղորդվածությունը կարևոր ֆիզիկական բնութագիր է, որը կարող է սահմանվել էլեկտրականապես փոքր անտենայի ուղղորդվածության զգալի մեծացում՝ համեմատած Հարինգտոնի սահմանի հետ:

4.2-ում ներկայացվում է «Հյուգենսի աղբյուրի» միջոցով գերուղղորդվածության ստացումը և առաջարկվող կառուցվածքը: Տեղադրելով մագնիսադիէլեկտրիկ ռեզոնատորը միկրոշերտավոր անտենայի վրա (նկ. 8ա), անտենան ցածր հաճախային տիրույթում հեշտությամբ համաձայնեցվում է ազատ տարածության և սնուցման նկատմամբ:

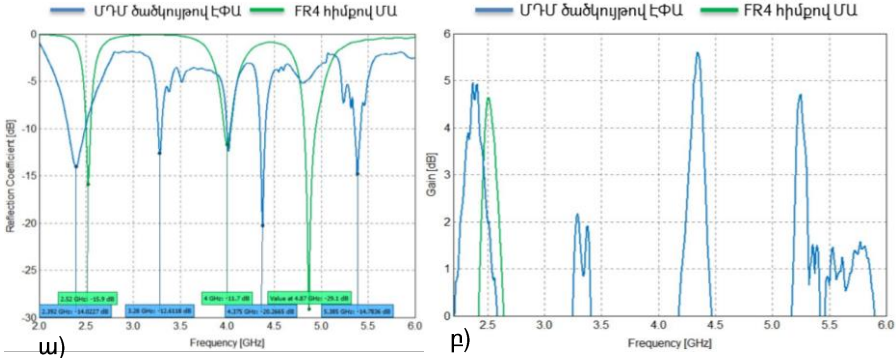


Նկ.8: Մագնիսադիէլեկտրիկ ծածկույթով միկրոշերտավոր անտենայի կառուցվածքը (ա) և մոդերի բաշխվածությունը (բ)

Նախագծված անտենան ապահովում է բարձրամոդ ճառագայթում և երկրորդ ու երրորդ մոդերի հարաբերական ամպլիտուդը կազմում է 0,25 (նկ.8բ): Սա նշանակում է՝ նախագծված անտենայի ուղղորդվածության D գործակիցը մեծ է Հարինգտոնի սահմանից:

4.3-ում ներկայացվում է մշակված նախատիպի չափված բնութագրերը: Տեղադրելով նեոդիմիումային հիմքով, $r = 10$ մմ շառավղով հեմիսֆերիկ մագնիսադիէլեկտրիկ նյութ միկրոշերտավոր անտենայի վրա, անտենայի առաջին հարմոնիկի հաճախությունը 13 ԳՀց-ից նվազում է 2.44 ԳՀց և ապահովում է 190 ՄՀց հաճախային շերտ (2.3 - 2.49 ԳՀց), որում անտենայի անդրադարձման գործակիցը՝ $S_{11} < -10$ դԲ: Ռեզոնատորի և միկրոշերտավոր անտենայի երկրաչափական կենտրոնի հեռավորությունը հաշվարկվել է սիմուլյացիոն օպտիմիզացիայի արդյունքում և վերցվել է $x = 6$ մմ: Անտենայի հարաբերական հաճախային շերտը $\delta = 7.91$ % է: Մագնիսադիէլեկտրիկ կառուցվածքի ռեզոնանսային հատկության շնորհիվ, անտենան դրսևորում է բազմաշերտային հատկություն 3.28, 4.37, 5.38 ԳՀց և ավելի բարձր հաճախություններում: Նախագծված էլեկտրականապես փոքր անտենայի

հաճախային շերտը 3,5 անգամ գերազանցում է FR4 հիմքով միկրոշերտավոր անտենայի շերտից, չափը 4,3 անգամ ավելի փոքր է, իսկ ուժեղացման գործակիցը գերազանցում է 0,4 դԲ-ով, որը վկայում է գերուղղորդվածության հատկությունը (նկ.9):



Նկ.9: Մագնիսադիէլեկտրիկ ռեզոնատորով ծածկված և FR4 հիմքով միկրոշերտավոր անտենաների անդրադարձման (ա) և ուժեղացման գործակիցների (բ) հաճախային կախվածությունները

ՀԻՄՆԱԿԱՆ ԵԶՐԱԿԱՑՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐ

Ատենախոսության շրջանակներում իրականացված հետազոտությունները ապացուցում են մագնիսադիէլեկտրիկական նյութերի կիրառմամբ էլեկտրականապես փոքր անտենաների ստացման հնարավորությունը և դրանց բնութագրերի բարելավումը:

Դիտարկելով որպես միկրոշերտավոր անտենայի տակդիր՝ մագնիսադիէլեկտրիկ նյութերի կիրառմամբ անտենայի չափը նվազում է նյութի բեկման ցուցիչին ուղիղ համեմատական: Տակդիրում մտցնելով մագնիսական բաղադրիչ՝ անտենայի չափը կարելի է նվազեցնել նույն կերպ, ինչ բարձր թափանցելիությամբ դիէլեկտրիկ կիրառմամբ՝ միևնույն ժամանակ նվազեցնելով անտենայի մակերևութային հոսանքների խտությունը, որի արդյունքում նվազում է բարորակությունը և հետևաբար հաճախային շերտն աճում է, ընդ որում այն ավելի մեծ է $\epsilon_r < \mu_r$ բնութագրերով տակդիրների

դեպքում: Մակերևույթային հոսանքների խտության նվազումը միկրոշերտավոր անտենային ցանցում նպաստում է նաև էլեմենտների միջև մեկուսացման մեծացմանը: Թեպետ գտնվելով մոտ հեռավորության վրա՝ էլեմենտների վրա միմյանց ազդեցությունը փոքր է: Այդպիսով՝ այն հնարավորություն է տալիս էլեմենտների միջև հեռավարության փոքրացման հաշվին լրացուցիչ փոքրացնել անտենային ցանցի չափը:

Նման հատկությունները դիտվել են ինչպես թվային հաշվարկների և սիմուլացիաների միջոցով, այնպես էլ ցույց են տրվել նախատիպի պատրաստմամբ, որի համար ընտրվել է մատչելի YIG տեսակի նյութ: Այս նյութի առանձնահատկությունն արտաքին մագնիսական դաշտի միջոցով մագնիսական հատկությունների փոփոխումն է: Արտաքին մագնիսական դաշտի ազդեցությամբ մագնիսական թափանցելիությունը մեծացումը հանգեցնում է միևնույն չափի անտենայի աշխատանքային հաճախային տիրույթը նվազմանը, իսկ շերտի՝ լայնացմանը:

Անտենայի ուժեղացման գործակցի կախվածությունը դրա չափից խոչընդոտում է բարձր ուժեղացման գործակցով էլեկտրականապես փոքր անտենաների ստացմանը: Մագնիսադիէլեկտրիկ կառուցվածքի միջոցով «Հյուգենսի աղբյուր» տեսակի անտենայի ստացումը միաժամանակ ապահովում է լայն հաճախային շերտ, բազմաշերտություն և գերուղղորդվածություն: Մագնիսադիէլեկտրիկական ռեզոնատորի տեղադրումը փոքր միկրոշերտավոր անտենայի վրա հանգեցնում է ալիքային դիմադրության համաձայնեցմանը ցածր հաճախային տիրույթում: Նման կառուցվածքը պարունակում է համարժեք էլեկտրական և մագնիսական դիպոլներ, որը համակարգին օժտում է գերուղղորդվածությամբ, այն է՝ փոքր անտենայի ուժեղացման գործակիցն ավելին է միևնույն հաճախությամբ սովորական չափի անտենայի համեմատությամբ: Մագնիսական դիպոլի ուղղությունը հեշտությամբ կարելի է փոխել կառուցվածքի մեխանիկական պտտմամբ և գնդաձև կամ կիսագնդաձև

կառուցվածքների կիրառմամբ կարելի է անգամ հասնել ուղղվածության դիագրամի մեխանիկական տեսածրման:

Հետազոտության արդյունքները և նախագծված նախատիպերը կարող են օգտագործվել ռադիոհաճախային արդյունաբերական ընկերությունների կողմից՝ ռադիոտեխնիկական մի շարք խնդիրների լուծման համար, որտեղ առաջնային է փոքր և արդյունավետ անտենաների կիրառումը:

Հղված գրականություն

- [1] **J.L. Volakis, C.C. Chen, K. Fujimoto** Small Antennas, Miniaturization Techniques & Applications, McGraw-Hill, 2010
- [2] **J.L. Volakis** Antenna Engineering Handbook, McGraw Hill, 5th edition, 2018
- [3] **R.C. Hansen, R.E. Collin** Small Antenna Handbook, A John Wiley & Sons, Inc., 2011
- [4] **R.C. Hansen** Electrically Small, Superdirective and Superconducting Antennas, A John Wiley & Sons, Inc., 2006
- [5] **H.A. Wheeler** Fundamental limitations of small antennas, Proc IRE 35, 1947
- [6] **J.S. Colburn, Y. Rahmat-Samii** Patch Antennas on Externally Perforated High Dielectric Constant Substrates, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 47, no. 12, 1999
- [7] **R.C. Hansen, M. Burke** Antennas with magneto-dielectrics, Microwave and Optical Tech. Lett., vol. 26, no. 2, pp 75-78, 2000
- [8] **T. Zervos, F. Lazarakis, A. A. Alexandridis, et al** Patch Antenna on YIG Substrate with Enhanced Bandwidth and Polarization Characteristics, 2012 Loughborough Antennas & Propagation Conference (LAPC), 2012

Հրատարակված աշխատանքների ցուցակը

1. **A. Stepanyan**, H. Haroyan, A. Hakhoumian Electrically Small Microstrip Antenna Based on Magnetodielectric Materials, Journal of Telecommunications and Information Technology, vol.2, pp 98-102, 2022
2. **A. Stepanyan, H. Haroyan**, Miniaturized Antipodal Vivaldi Antenna Based on Magnetodielectric Materials, Proceedings of the Yerevan State University, Physical and Mathematical Sciences, 56(2), pp 74–84, 2022
3. **A. Stepanyan**, H. Haroyan, A. Hakhoumian Electrically Small Microstrip Antenna Based on Magnetodielectric Resonator, International Conference on Microwave and THz Technologies, Wireless Communications and OptoElectronics, IRPhE 2022, IET Conference Proceeding, Volume 2022, Issue 15, Pages 11 – 14, 2022
4. **A. Stepanyan** Bandwidth Increase and Isolation Improvement of Elements in Miniaturized Phased Antenna Array, Journal of Contemporary Physics (Armenian Academy of Sciences), 2023, Vol. 58, No. 3, pp. 314–319, 2023
5. **A. Stepanyan**, H. Haroyan, A. Hakhoumian Miniaturized Microstrip Patch Antenna on YIG Material Under External Magnetic Field, Armenian Journal of Physics, 2023, vol. 16, no. 4, pp. 126-131, 2023

ЭЛЕКТРИЧЕСКИ МАЛЫЕ АНТЕННЫ НА ОСНОВЕ МАГНИТО- ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И РЕЗОНАТОРОВ С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

АННОТАЦИЯ

Наряду с постоянным развитием мобильной радиосвязи, использование малых антенн в ряде систем считается первостепенным и актуальным вопросом. Помимо требований к размерам, большой интерес представляют широкополосные антенны, обеспечивающие ратийотехнической системе ряд преимуществ: низкое энергопотребление, высокая скорость передачи данных, низкая стоимость и т. д. Таким образом, в процессе проектирования

необходимо учитывать две основные характеристики: электрически малые размеры и широкополосность. Такие требования особенно предъявляются к системам беспроводной связи, биомедицине, радиолокации, радиоэлектронной защиты, спутниковой связи и другим системам. Однако, проектирование малых антенн считается конкурентной задачей, поскольку их характеристики (диапазон частот, эффективность излучения, коэффициент усиления) сильно зависят от соотношения размеров антенны и рабочей длины волны. В диссертации проведено исследование метода уменьшения размеров антенны на основе магнитоэлектрических материалов. Такие материалы в последнее время привлекли внимание промышленности, и предпринимаются некоторые шаги по их производству. Магнитоэлектрические материалы, обладающие одновременно электрическими и магнитными свойствами, уменьшают размеры антенны так же, как и диэлектрики, обеспечивая более широкий диапазон частот и более высокую эффективность.

В работе выполнено проектирование микрополосковой антенны и фазированной антенной решетки с магнитоэлектрическими подложками с различными характеристиками и показано влияние характеристик материала подложки на характеристики антенны и антенной решетки.

Прототип электрически малой антенны был спроектирован на основе ферромагнетика YIG, для которого был улучшен диапазон частот антенны за счет применения внешнего магнитного поля.

В диссертации продемонстрирована возможность получения сверхнаправленных антенн с помощью магнитоэлектрических материалов различной структуры, что определяется сочетанием эквивалентных магнитных и электрических диполей. Таким образом были решены две важнейшие проблемы проектирования электрически малых антенн: достижение минимальной добротности и максимального значения коэффициента усиления.

Основные результаты работы:

1. Демонстрирована возможность использования магнитоэлектрических материалов для уменьшения размеров микрополосковой антенны при одновременном обеспечении широкого диапазона частот.
2. Показано повышение изоляции между излучающими элементами антенной решетки с помощью магнитоэлектрических материалов.
3. Под воздействием внешнего магнитного поля размеры электрически малой микрополосковой антенны на основе ферромагнетика YIG уменьшились в 4 раза, в то же время обеспечив диапазон частот 500 МГц на центральной частоте 1,5 ГГц.
4. Показано, что резонансная частота микрополосковой антенны с магнитоэлектрическим резонаторным покрытием снизилась более чем в 5 раз, обеспечивая диапазон частот в 190 МГц, а коэффициент усиления

больше, чем у нередуцированной микрополосковой антенны того же типа.

ELECTRICALLY SMALL ANTENNAS BASED ON MAGNETO-DIELECTRIC MATERIALS AND LUMPED ELEMENTS RESONATORS

ABSTRACT

With the continuous development of radio communication, using small antennas across various systems is considered a primary and topical issue. In addition to meeting size requirements, broadband antennas garner significant interest by offering multiple advantages to the system, such as low power consumption, high data rates, and cost-effectiveness. Therefore, two primary characteristics must be considered during the design process. These requirements are particularly crucial in wireless communication, biomedical applications, radar systems, electronic defense, satellite communication, and other related fields. However, designing small antennas poses a competitive challenge due to their characteristics (bandwidth, radiation efficiency, gain), which strongly depend on the antenna size-to-operating wavelength ratio.

The dissertation focused on researching methods for reducing antenna size using magneto-dielectric materials. These materials have recently attracted industry attention and some steps are being taken for their production. Magneto-dielectric materials, possessing both electric and magnetic properties, reduce the size of the antenna in the same way as dielectrics, providing a wider frequency band and higher efficiency.

In this work, the design of a microstrip antenna and a phased antenna array utilizing a magneto-dielectric substrate with various characteristics is undertaken. The effects of substrate characteristics on both antenna and antenna array performance are presented.

A prototype of an electrically small antenna is designed using a YIG-based ferromagnet, and the bandwidth of the antenna is enhanced by applying an external magnetic field.

In this way, the two most important problems in the design of electrically small antennas are solved: achieving the minimum value of Q-factor and the maximum value of gain.

The main findings of the study are as follows:

1. The work demonstrates the miniaturization of microstrip antennas through the utilization of magneto-dielectric materials, achieving a wide frequency band.

2. Utilizing magneto-dielectric materials has been proven to increase isolation between elements in phased antenna array.
3. Applying an external magnetic field resulted in a fourfold reduction in the size of electrically small microstrip antennas based on YIG ferromagnets, enabling a 500 MHz frequency band around a central frequency of 1.5 GHz.
4. The study reveals that coating microstrip antennas with magneto-dielectric resonators reduces their resonant frequency by over five times, enabling a 190 MHz frequency band and higher gain compared to non-miniaturized microstrip antennas at the same operating frequency.

