

ՀՀ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ, ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ, ՄՇԱԿՈՒՅԹԻ ԵՎ ՍՊՈՐՏԻ
ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ

ԵՐԵՎԱՆԻ ՊԵՏԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

Հովհաննիսյան Տիգրան Նաիրիի

ՆԵՅՐՈՆԱՅԻՆ ՑԱՆՑԵՐԻ ԷԼԵԿՏՐԱՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ԱԿՏԻՎՈՒԹՅԱՆ
ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ

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

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

Երևան 2025

THE MINISTRY OF EDUCATION, SCIENCE, CULTURE AND SPORTS OF THE RA

YEREVAN STATE UNIVERSITY

Tigran Hovhannisyan

INVESTIGATION OF ELECTROMAGNETIC ACTIVITY OF NEURAL NETWORKS

ABSTRACT

of the thesis for the degree of candidate of physical and mathematical sciences
Speciality 01.04.03 "Radiophysics"

Yerevan 2025

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Երևանի պետական համալսարանում:

Գիտական ղեկավար՝ ֆ.մ.գ.թ., դոցենտ Ա.Հ. Մակարյան

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝ ֆ.մ.գ.դ., պրոֆեսոր Ա.Ա. Հախումյան
ֆ.մ.գ.թ., պրոֆեսոր Հ.Վ. Բաղդասարյան

Առաջատար կազմակերպություն՝ ՀՀ ԳԱԱ Ռադիոֆիզիկայի և էլեկտրոնիկայի
ինստիտուտ

Պաշտպանությունը կայանալու է 2025թ. մայիսի 7-ին, ժամը 14:30

Երևանի պետական համալսարանի 049 ֆիզիկայի մասնագիտական խորհրդի
նիստում:

Հասցե՝ Ա. Մանուկյան 1, Երևան, 0025:

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ԵՊՀ գրադարանում:

Սեղմագիրն առաքված է 2025թ. ապրիլի 5-ին:

Մասնագիտական խորհրդի
գիտական քարտուղար՝



ֆ.մ.գ.թ., դոցենտ
Վ.Պ. Քալանթարյան

The dissertation theme is approved at Yerevan State University.

Scientific supervisor: Candidate of Phys. Math. sciences,
Assoc. Prof. A. H. Makaryan

Official opponents: Doctor of Phys. Math. sciences,
Prof. A. A. Hakhumyan
Candidate of Phys. Math. sciences,
Prof. H. V. Baghdasaryan

Leading organization: Institute of Radiophysics and electronics, NAS RA

The defense of the dissertation will take place at 14:30 on May 7, 2025 on the session
of the Specialized Council 049 of Physics of the Yerevan State University

Address: 1 Alek Manukyan st., 0025 Yerevan

The dissertation is available at the library of Yerevan State University

The abstract is distributed on April 5, 2025

Scientific secretary of
the Specialized Council:



Candidate of phys. math. sciences,
Assoc. Prof. V. P. Kalantaryan

ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԸՆԴՀԱՆՈՒՐ ԲՆՈՒԹԱԳԻՐԸ

Աշխատանքի արդիականությունը

Կենդանի օրգանիզմի կենսագործունեությունն ապահովվում է կենտրոնական նյարդային համակարգի միջոցով: Օրգանիզմը զգայարանների միջոցով շրջակա միջավայրից ստանում է ազդակներ, որոնք, վերածվելով էլեկտրական իմպուլսների, նյարդաթելերով փոխանցվում են գլխուղեղին: Գլխուղեղը, մշակելով զգայարաններից ստացված ինֆորմացիան, ղեկավարում է օրգանիզմի գործունեությունը՝ նյարդաթելերով համապատասխան ազդանշաններ ուղարկելով օրգաններին:

Այսպիսով՝ մարդու (կենդանու) կենտրոնական նյարդային համակարգը պարունակում է օրգանիզմի կենսագործունեությանն առնչվող ողջ ինֆորմացիան:

Հետևաբար՝ հնարավոր է օրգանիզմի վիճակի մասին մանրամասն ինֆորմացիա ստանալ՝ գրանցելով և վերլուծելով կենտրոնական նյարդային համակարգի էլեկտրական ազդանշանները: Սակայն նյարդաթելերին անմիջական հասանելիությունը կապված է լուրջ դժվարությունների հետ, և հետևաբար՝ այդ ազդանշանները գրանցելը չափազանց բարդ խնդիր է: Բացի այդ՝ կենսաազդանշանները, որպես կանոն, ուղեկցվում են աղմուկներով, որոնք լուրջ խնդիրներ են առաջացնում նյարդային համակարգի էլեկտրական ազդանշանները ոչ ինվազիվ եղանակով գրանցելու համար: Հետևաբար՝ գրանցված կենսաազդանշան-աղմուկ խառնուրդից օգտակար ինֆորմացիան կորզելու համար անհրաժեշտ է կատարել գրանցված ազդանշանի բազմակողմանի վիճակագրական վերլուծություն: Պետք է հաշվի առնել նաև այն, որ օգտակար ինֆորմացիան գրանցված ազդանշանի մեջ կարող է պարունակվել ոչ թե բացահայտ, այլ՝ «կողավորված» և/կամ «ծածկագրված», ինչը ավելի է բարդացնում օգտակար ինֆորմացիայի վերծանումը:

Այսպիսով՝ տարբեր կենսաազդանշանների գրանցումը և դրանց վերլուծության միջոցով օրգանիզմի վիճակի մասին ինֆորմացիայի ստացումը չափազանց կարևոր է հատկապես որոշ հիվանդությունների արագ և ճիշտ ախտորոշման համար, ինչը կարող է փրկել հիվանդին կամ, առնվազն, ազատել անհարմարություններ պատճառող բարդ և երկարատև հետազոտություններից:

Պատահական պրոցեսների վիճակագրական վերլուծության ամենակարևոր և ամենաարդյունավետ եղանակներից մեկը սպեկտրալ վերլուծությունն է: Սակայն հզորության սպեկտրալ խտությունը չի պարունակում ինֆորմացիա ազդանշանի սպեկտրալ բաղադրիչների փուլերի մասին, հետևաբար՝ շատ

դեպքերում այն չի կարող լիարժեք նկարագրել պատահական պրոցեսը: Այս բացը որոշ չափով կարող է լրացվել պատահական պրոցեսի բարձր կարգի սպեկտրալ վերլուծության, մասնավորապես՝ բիսպեկտրի միջոցով [1, 2]:

Շնորհիվ սպեկտրալ վերլուծության նկատմամբ ունեցած որոշակի առավելությունների՝ բիսպեկտրալ վերլուծությունը լայնորեն կիրառվում է ամենատարբեր ոլորտներում, մասնավորապես՝ կենսաազդանշանների հետազոտման մեջ: Կենսաազդանշաններին ուղեկցող աղմուկները սովորաբար գաուսյան բնույթի են, և դրանց բարձր կարգի ($n \geq 3$) սպեկտրները զրոյական են: Հետևաբար օրգանիզմում տեղի ունեցող այն պրոցեսները, որոնք կարող են շեղել կենսաազդանշան-աղմուկ խառնուրդի բաշխումը գաուսյանից, կարող են տարբերակվել ազդանշան-աղմուկ խառնուրդի բարձր կարգի սպեկտրալ վերլուծության միջոցով:

Կենսաազդանշանների մեջ առանձնահատուկ տեղ են գրավում էլեկտրասրտագրությունը (ԷՍԳ) և էլեկտրաուղեղագրությունը (ԷՈւԳ): Քանի որ էլեկտրասրտագիրը կազմում է օրգանիզմում տեղի ունեցող էլեկտրական պրոցեսների մի մասը, ապա նրա համակողմանի վերլուծությունը մեքենայական ուսուցման մեթոդների կիրառմամբ կարող է լրացուցիչ օբյեկտիվ ինֆորմացիա տալ օրգանիզմի վիճակի մասին, ինչը ներկայումս խիստ արդիական է:

Ատենախոսական աշխատանքում իրականացվել են ԷՍԳ-ի սպեկտրալ և բիսպեկտրալ վերլուծություններ՝ սահող պատուհանի մեթոդի կիրառմամբ, ինչը հնարավորություն է տալիս վերծանել սրտի աշխատանքի դինամիկ փոփոխությունները, որոնք կարող էին չնկատվել ԷՍԳ-ի ժամանակային պատկերը դիտարկելիս:

Մարդու օրգանիզմի վիճակի մասին առավել մեծ ինֆորմացիա կարող է ստացվել ԷՈւԳ միջոցով, սակայն ԷՈւԳ-ն չի կարող լիարժեք ինֆորմացիա տալ գլխուղեղում կատարվող բոլոր գործընթացների մասին, քանի որ այն գրանցում է միայն ուղեղի ցածր հաճախային ազդանշանները: Սակայն նյարդային համակարգում տեղի ունեցող մի շարք պրոցեսներ (օրինակ՝ մեծածավալ ինֆորմացիայի արագ փոխանակումը, մշակումը և վերլուծումը, գրանցումը և վերարտադրումը, տրամաբանական մտածողությունը, հիշողությունը և այլն), ենթադրում են ինֆորմացիայի փոխանակման շատ ավելի մեծ արագություններ: Հետևաբար՝ գլխուղեղի աշխատանքի վերաբերյալ ամբողջական պատկերացում կազմելու համար անհրաժեշտ է ինֆորմացիա ունենալ նաև նրանում տեղի ունեցող բարձր հաճախային պրոցեսների մասին:

Սույն աշխատանքում մշակվել է հատուկ համակարգ մարդու վրա տարբեր ազդեցությունների դեպքում գլխուղեղի ակտիվությունը ռադիոհաճախային (5-

100 ՄՀg) տիրույթում ոչ ինվազիվ եղանակով գրանցելու համար: Մարդու գլխուղեղից ստացված ազդանշան-աղմուկ խառնուրդի վիճակագրական (բիսպեկտրալ) վերլուծությամբ հայտնաբերվել է գլխուղեղի արձագանքը արտաքին թույլ ռադիոազդանշանին:

Նյարդային համակարգում գործող էլեկտրական իմպուլսների պարամետրերը մանրամասն հետազոտվել են, որոնց հիման վրա ստեղծվել են մի շարք մոդելներ այդ իմպուլսների փոխանցման մեխանիզմը բացատրելու համար [3]: Համաձայն առավել հաճախ կիրառվող մոդելների՝ նյարդային համակարգերում առկա էլեկտրական տատանումների հաճախությունները չեն գերազանցում մեկ կամ մի քանի կիլոհերցը, իսկ փոխանցման արագությունները՝ 120 մ/վ-ը [4]: Սակայն, վերջին տասնամյակներում, հիմնվելով նյարդաթելերի կառուցվածքային առանձնահատկությունների, չափերի և էլեկտրական պարամետրերի վրա, ըստ մի շարք հետազոտողների, ինֆորմացիայի փոխանակումը նյարդաթելերով կարող է իրականացվել անհամեմատ ավելի մեծ արագություններով՝ տերահերցային (ՏՀg) և ինֆրակարմիր (ԻԿ) տիրույթների էլեկտրամագնիսական ալիքների միջոցով, որտեղ նյարդաթելերը կարող են ծառայել որպես ալիքատարներ [5, 6]: Չնայած նրան, որ առաջարկվել են նյարդային համակարգերում ինֆորմացիայի տարածման նոր մոդելներ և մեխանիզմներ, սակայն մեզ հայտնի չեն ՏՀg տիրույթում նյարդաթելերի էլեկտրադինամիկական հատկությունների ուսումնասիրմանն ուղղված փորձարարական հետազոտություններ:

ՏՀg ալիքների միջոցով օրգանիզմում ինֆորմացիայի փոխանակման հնարավորությունը փորձնականորեն հետազոտելու համար առավել հարմար է որպես նմուշ օգտագործել կենդանու ողնուղեղից վերցված այնպիսի հատված, որը բաղկացած է միմյանց զուգահեռ դասավորված միանման նյարդաթելերից:

Սույն ատենախոսական աշխատանքում փորձարարական ճանապարհով հետազոտվել է կենդանու ողնուղեղի նյարդաթելային համակարգի վարքը տերահերցային հաճախությունների տիրույթում: Հետազոտությունները կատարվել են ժամանակային տիրույթի ՏՀg սպեկտրոմետրի միջոցով՝ 0,1-3 ՏՀg հաճախային տիրույթում:

Աշխատանքի նպատակը

1. Տարբեր տիպի վիճակագրական վերլուծությունների միջոցով հետազոտել էլեկտրասրտագիրը՝ մարդու սրտի աշխատանքի վերաբերյալ լրացուցիչ օգտակար տեղեկություններ ստանալու համար,

2. Գրանցել և հետազոտել մարդու նյարդային համակարգի, մասնավորապես՝ գլխուղեղի էլեկտրական ակտիվությունը ռադիոհաճախային տիրույթում,

3. Հետազոտել մարդու հոգեկան վիճակի գնահատման հնարավորությունը մեքենայական ուսուցման միջոցով՝ հիմնվելով գլխուղեղից ստացված ազդանշանների վիճակագրական վերլուծությունների արդյունքների վրա,

4. Հետազոտել կենդանու ողնուղեղի նյարդաթելային համակարգի էլեկտրադինամիկական հատկությունները հաճախությունների SՀց տիրույթում,

5. Հետազոտել կենդանու ողնուղեղի նյարդաթելային համակարգի ոչ գծային հատկությունները:

Այդ նպատակին հասնելու համար դրվել են հետևյալ խնդիրները.

1. Մշակել էլեկտրասրտագրի գրանցման, նախնական գտման, թվայնացման և վիճակագրական վերլուծությունների իրականացման համակարգ,

2. Մշակել գլխուղեղի էլեկտրական ակտիվությունը և թույլ ռադիոհաճախային ազդանշանին գլխուղեղի արձագանքը գրանցելու և վերլուծելու համակարգ,

3. Գնահատել մեքենայական ուսուցման տարբեր ալգորիթմների կիրառման արդյունավետությունը գլխուղեղից ստացված ազդանշանների վիճակագրական վերլուծությունների արդյունքների հիման վրա մարդու հոգեկան վիճակի գնահատման համար,

4. Ստեղծել համակարգ կենդանու ողնուղեղից նմուշառման համար, մշակել SՀց ժամանակային տիրույթի սպեկտրոմետրով հետազոտման համար համապատասխան կյուվետ՝ նմուշին լարում կիրառելու հնարավորությամբ,

5. Մշակել համակարգչային ծրագիր՝ ժամանակային տիրույթի սպեկտրոմետրից ստացված տվյալների գրանցման, վերլուծությունների և արդյունքների մշակման համար:

Գիտական նորույթը

1. Տույց է տրվել, որ մարդու սրտի աշխատանքի որոշ առանձնահատկություններ, մասնավորապես՝ դիթմի դինամիկան, կարելի է վերծանել էլեկտրասրտագրի հաճախա-ժամանակային վերլուծության հիման վրա:

2. Հատուկ մշակված սենսորների և ազդանշանը վերլուծող համակարգի միջոցով առաջին անգամ գրանցվել են գլխուղեղի էլեկտրական ակտիվությունը ռադիոհաճախային տիրույթում և գլխուղեղի արձագանքը թույլ ռադիոհաճախային ազդանշանին:

3. Առաջին անգամ փորձնականորեն հետազոտվել են կենդանու նյարդային համակարգի էլեկտրադինամիկական հատկությունները հաճախությունների SՀց տիրույթում: Ցույց է տրվել, որ որոշակի շեմային արժեքից մեծ հաստատուն լարման ազդեցության տակ ողնուղեղի նյարդաթելերը վերածվում են յուրատեսակ ոչ գծային հաղորդալարերի:

4. Առաջին անգամ փորձնականորեն ցույց է տրվել, որ կենդանու ողնուղեղը արտաքին հաստատուն լարման ազդեցության տակ ակտիվանում է՝ դրսևորելով անիզոտրոպ և ոչ գծային հատկություններ տերահերցային տիրույթում, ինչն արտահայտվում է SՀց իմպուլսի սպեկտրի ցածր հաճախային բաղադրիչների ուժեղ ռեզոնանսային կլանմամբ և ողնուղեղի բեկման ցուցիչի էական փոփոխությամբ:

Գործնական արժեքը

Կատարված հետազոտությունները ցույց են տալիս, որ մարդու էլեկտրասրտագրի տարբեր տիպի վիճակագրական վերլուծությունների միջոցով հնարավոր է ստանալ սրտի աշխատանքի վերաբերյալ լրացուցիչ օգտակար տեղեկություններ, որոնք վերծանելով մեքենայական ուսուցման կիրառմամբ, հնարավոր է բացահայտել սրտի որոշակի ախտանիշներ, որոնք կարող էին չնկատվել էլեկտրասրտագիրը անզեն աչքով զննելու դեպքում:

Գլխուղեղի էլեկտրական ակտիվությունը գրանցելու և վերլուծելու համար մշակված համակարգը պարունակում է մեքենայական ուսուցման տարբեր ալգորիթմներ, որոնց մուտքային արժեքները գլխուղեղի ռադիոհաճախային ազդանշանների վիճակագրական վերլուծությունների արդյունքներն են: Այդ համակարգը կարող է օգտագործվել գլխուղեղի աշխատանքի վերաբերյալ ամբողջական պատկերացում կազմելու և մարդու հոգեկան վիճակի գնահատման համար:

Հաճախությունների SՀց տիրույթում կենդանու ողնուղեղի նյարդաթելային համակարգի էլեկտրադինամիկական հատկությունների հետազոտման արդյունքները կօգնեն հասկանալ ողջ նյարդային համակարգի աշխատանքը, ինչը կարող է շատ օգտակար լինել օրգանիզմում տարբեր հիվանդությունների վաղ ախտորոշման և բուժման համար:

Պաշտպանության ներկայացվող հիմնական դրույթները.

1. Սրտի աշխատանքի որոշ առանձնահատկություններ, մասնավորապես՝ ռիթմի դինամիկան, հնարավոր է վերծանել մեքենայական ուսուցման կիրառմամբ՝ էլեկտրասրտագրի հաճախա-ժամանակային վերլուծության հիման վրա:

2. Մարդու գլխուղեղն արձագանքում է թույլ ռադիոհաճախային ազդանշանին, ինչը կարելի է գրանցել ազդանշանների բիսպեկտրալ վերլուծության միջոցով

3. Կենդանու ողնուղեղը արտաքին հաստատուն լարման աղբյուրության տակ ակտիվանում է՝ դրսևորելով անիզոտրոպ և ոչ գծային հատկություններ տերահերցային տիրույթում, ինչն արտահայտվում է ՏՀց ինպուլսի սպեկտրի ցածր հաճախային բաղադրիչների ուժեղ ռեզոնանսային կլանմամբ և բեկման ցուցիչի էական փոփոխությամբ:

4. Հաստատուն լարում կիրառելուց 1-2 րոպե անց կենդանու ողնուղեղի նմուշը վերածվում է ոչ գծային դիֆրակցիոն ցանցի: Գեներացվում են ՏՀց տիրույթի նոր՝ բարձր հաճախային բաղադրիչներ:

Աշխատանքի ներկայացումը

Բազմիցս զեկուցվել է Երևանի պետական համալսարանի Ֆիզիկայի ինստիտուտի և Ռադիոֆիզիկայի և էլեկտրոնիկայի ամբիոնի սեմինարներում,

Տարբեր միջազգային գիտաժողովներում.

Advanced Cardiology and Cardiovascular Research, Paris, France, 2022,

International Conference on Microwave & THz Technologies, Wireless Communications and OptoElectronics (IRPhE 2022), Yerevan, Armenia, 2022,

International Conference on Microwave & THz Technologies, Wireless Communications and Optoelectronics (IRPhE 2024), Yerevan, Armenia, 2024

Ներկայացվել է Լևոն Օրբելու անվան Ֆիզիոլոգիայի ինստիտուտում և Թուրուզի համալսարանի Համակարգչային գիտության ինստիտուտի լաբորատորիայի MINDS գիտական խմբին:

Հրատարակումները

Տպագրված հոդվածներ.

1. “Time-Frequency Analysis of Electric Cardiograms”, B. A. Oganisyan, T. N. Oganisyan, and A. O. Makaryan, Journal of Contemporary Physics (Armenian Academy of Sciences), 2020, Vol. 55, No. 4, pp. 371-375

2. “Study of the Brain Response to the MHz RF Signal”, T. N. Hovhannisyan, Journal of Contemporary Physics (Armenian Academy of Sciences), 2022, Vol. 57, No. 2, pp. 182-186

3. “Biosignal processing using machine learning methods”, A. Mkoyan, A. Manasyan, A. Makaryan, B. Hovhannisyan, T. Hovhannisyan and S. Khachunts, International Conference on Microwave & THz Technologies, Wireless

Communications and OptoElectronics (IRPhE 2022), Hybrid Conference, Yerevan, Armenia, 2022, pp. 4-6

4. “Investigation of Nerve Fiber Network in THz Spectrum Range”, T. Hovhannisyan, A. Makaryan, Armenian Journal of Physics, 2024, vol. 17, issue 1, pp. 17-20

5. “Исследование параметров нейронной системы спинного мозга в терагерцовой области частот”, Т.Н. Оганесян, А. О. Макарян, академик Р. М. Мартиросян, Reports NAS RA, 124(2) (2024) 16-23

6. “Nonlinear properties of biological nerve fiber system in THz spectrum range”, T. N. Hovhannisyan, Reports NAS RA, 124(3-4) (2024) 7-11

7. “Investigation of Nonlinear Properties of Animal Spinal Cord in THz Range”, Tigran Hovhannisyan, Armen Makaryan, Radik Martirosyan, IET Conference Proceedings, vol. 2024, issue 32, 2025, pp. 19-22

8. “Statistical analysis of the electroencephalographic signals”, Babken Hovhannisyan, Tigran Hovhannisyan, Armen Makaryan, Eduard Sivolenko, Vanand Mkhoyan, IET Conference Proceedings, vol. 2024, issue 32, 2025, pp. 23-25

Գիտաժողովների նյութեր

1. “Deep statistical analysis of ECG”, Advanced Cardiology and Cardiovascular Research, Paris, France, 2022

2. “Biosignal processing using machine learning methods”, International Conference on Microwave & THz Technologies, Wireless Communications and OptoElectronics (IRPhE 2022), Yerevan, Armenia, 2022

3. “Investigation of Nonlinear Properties of Animal Spinal Cord in THz Range”, International Conference on Microwave & THz Technologies, Wireless Communications and Optoelectronics (IRPhE 2024), Yerevan, Armenia, 2024

4. “Statistical analysis of the electroencephalographic signals”, International Conference on Microwave & THz Technologies, Wireless Communications and Optoelectronics (IRPhE 2024), Yerevan, Armenia, 2024

Ատենախոսության կառուցվածքը

Ատենախոսությունը բաղկացած է առաջաբանից, երեք գլխից, եզրակացությունից, 127 անուն գրականության ցանկից: Ատենախոսության ընդհանուր ծավալը 114 էջ է, որում առկա են 49 նկար և մեկ աղյուսակ:

Ատենախոսության 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:

Ատենախոսության առաջին գլուխը նվիրված է վիճակագրական վերլուծությունների միջոցով մարդու էլեկտրասրտագրի և գլխուղեղի ռադիոհաճախային ազդանշանների հետազոտմանը:

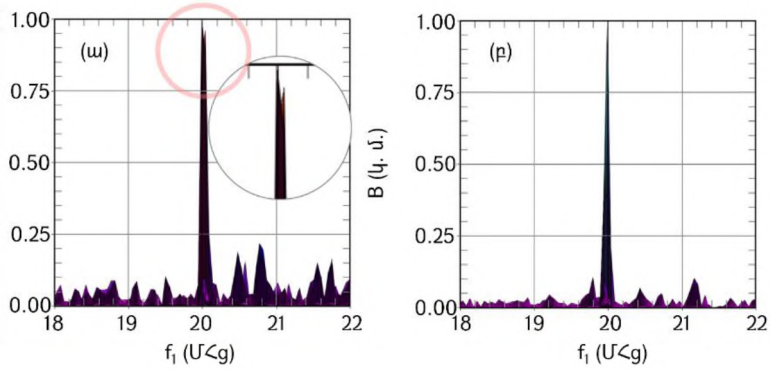
1.1 պարագրաֆում ներկայացված են կենսաազդանշանների տեսակները և հիմնական պարամետրերը, դրանց գրանցման և մշակման հիմնական եղանակները:

1.2 պարագրաֆում ներկայացված են սպեկտրալ և բարձր կարգի սպեկտրալ (բիսպեկտրալ) վերլուծությունները՝ որպես ազդանշանների վիճակագրական վերլուծության մեթոդներ:

1.3 պարագրաֆում նկարագրված են ԷՍԳ գրանցումը և վերլուծությունը՝ սահող պատուհանի մեթոդի կիրառմամբ: Տույց է տրվել, որ այս դեպքում տեսանելի է դառնում սրտի ռիթմի դինամիկան:

1.4 պարագրաֆում նկարագրվել է բարձր հաճախային կենսաազդանշանների գրանցման համար մշակված և պատրաստված ապլիկատորային անտենայի կառուցվածքը և պարամետրերը: Տույց է տրված, որ այն իրեն դրսևորում է որպես ունակային տվիչ:

1.5 պարագրաֆում ապլիկատորային անտենայով գրանցված ազդանշանների բիսպեկտրալ վերլուծությունը ցույց է տվել, որ մարդու գլխուղեղը արձագանքում է մարդուն տրված թույլ ռադիո հաճախային ազդանշանին: Գլխի ճակատային հատվածից գրանցված ազդանշաններում կան նոր սպեկտրալ բաղադրիչներ, և դրանք էապես տարբերվում են մարմնի այլ հատվածներից գրանցված ազդանշաններից (տես Նկ.1):



Նկ. 1. (ա) քունքից, (բ) ձեռքից գրանցված ազդանշանների բիսպեկտրը (B-f₁ պրոյեկցիա)

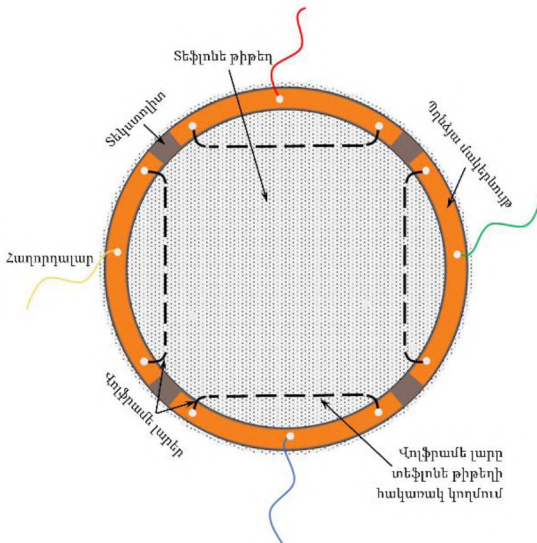
1.6 պարագրաֆում նկարագրված է մարդու տարբեր հոգեբանական և ֆիզիկական վիճակների գնահատման արդյունավետությունը (կանխատեսման հավաստիությունը) տարբեր ալգորիթմներով մեքենայական ուսուցման կիրառման դեպքում՝ մեքենայական ուսուցման համար որպես մուտքային տվյալներ վերցնելով գլխուղեղի ռադիո հաճախային ազդանշանների բիսպեկտրալ վերլուծության արդյունքները: Արհեստական ռեկուրենտ նեյրոնային ցանցերի կիրառման դեպքում կանխատեսումների արդյունավետությունը հասել է մինչև 85%:

1.7 պարագրաֆում ամփոփվում են 1-ին գլխի հիմնական արդյունքները:

Երկրորդ գուխը նվիրված է կենդանու նյարդաթելային համակարգերի էլեկտրադինամիկական պարամետրերի հետազոտմանը՝ տերահերցային տիրույթում:

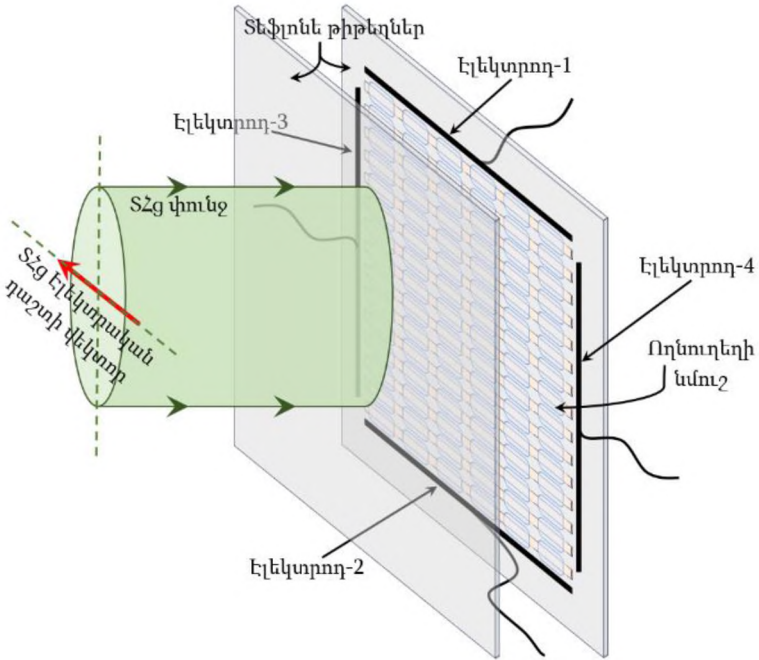
2.1 պարագրաֆում ներկայացված են նյարդային համակարգերում գործող էլեկտրական ազդակների պարամետրերը, տարածման դասական մեխանիզմը, ինչպես նաև՝ բարձր հաճախային (ԳԲՀ, ՏՀց, ԻԿ) էլեկտրամագնիսական ալիքների միջոցով ինֆորմացիայի փոխանցման հնարավորությունները կենսաբանական համակարգերում:

2.2 պարագրաֆում ողնուղեղից վերցված հատվածը դիտարկվել է որպես նմուշ փորձարարական հետազոտությունների համար: Ողնուղեղի նմուշը տեղադրվել է տեֆլոնե կյովետի մեջ, որի պատերից մեկի վրա տեղադրված են վոլֆրամե էլեկտրոդներ, նմուշին արտաքին լարում կիրառելու համար (Նկ.2):



Նկ. 2. Կյուվետի պատերի կառուցվածքը

2.3 պարագրաֆում ներկայացված են ժամանակային տիրույթի տերահերցային սպեկտրոմետրի աշխատանքի առանձնահատկությունները և ողնուղեղի նմուշի դիրքորոշումը սպեկտրոմետրի ՏՀց փնջի տիրույթում նմուշի պարամետրերը չափելիս (տես Նկ. 3):

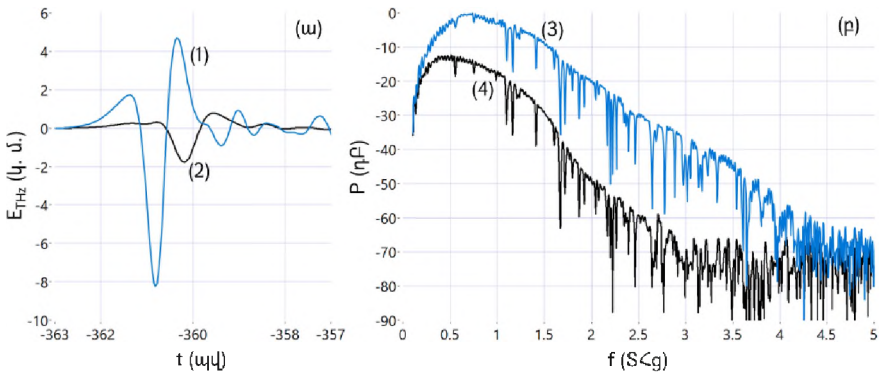


Նկ. 3. Ողնուղեղի նմուշի դիրքը ՏՀց փնջի նկատմամբ

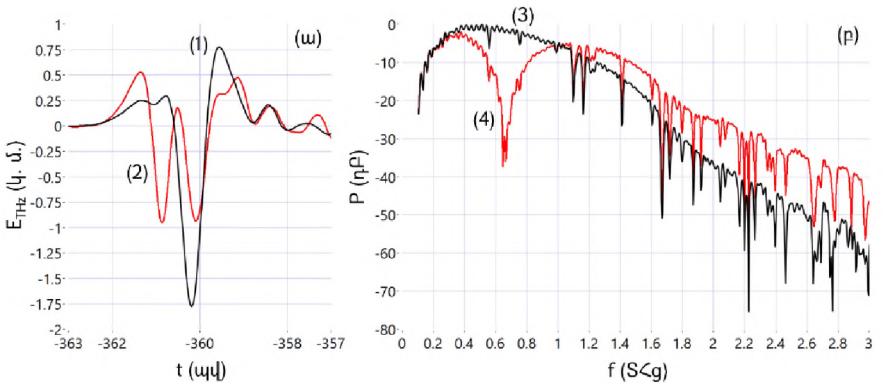
2.4 պարագրաֆում բերված են ողնուղեղի նմուշի պարամետրերը ՏՀց տիրույթում՝ ժամանակային տիրույթի ՏՀց սպեկտրոմետրով կատարված չափումների արդյունքների հիման վրա: Նկ. 4-ում պատկերված են դատարկ և հետազոտվող նմուշով լցված կյուվետի միջով անցնող ՏՀց իմպուլսի ժամանակային տեսքը և նրա սպեկտրը:

Ցույց է տրվել, որ ողնուղեղի նմուշի պարամետրերը ՏՀց տիրույթում կրում են էական փոփոխություններ, երբ նմուշին՝ նյարդաթելերի ուղղության ուղղահայաց կիրառված է 50 Վ/սմ-ից մեծ հաստատուն էլեկտրական դաշտ, իսկ նյարդաթելերի դասավորվածության ուղղությունը համընկնում է ՏՀց իմպուլսի էլեկտրական դաշտի ուղղության հետ (Նկ. 3): Դաշտը կիրառելուց որոշ ժամանակ անց ՏՀց իմպուլսի սպեկտրի ցածր հաճախային մասում առաջանում

Է խորը ռեզոնանսային կլանում, իսկ մոտ 1 SՀg-ից բարձր հաճախային բաղադրիչների հզորությունն էապես աճում է՝ Նկ. 5, Նկ. 6:

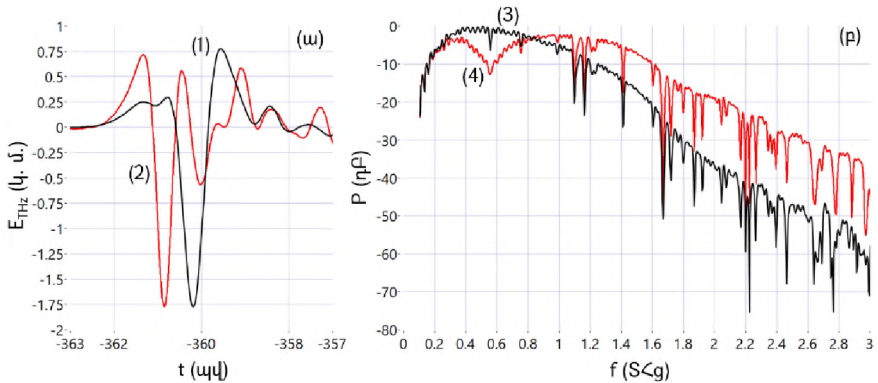


Նկ. 4. SՀg իմպուլսի (ա) ժամանակային տեսքը և (բ) հզորության սպեկտրը, 1, 3 - դադարկ կյուվեյի և 2, 4 - հեփազոփոդ նմուշի միջով անցնելիս



Նկ. 5. SՀg իմպուլսի (ա) ժամանակային տեսքը և (բ) հզորության սպեկտրալ խտությունը, 1, 3 - նախքան լարում կիրառելը և 2, 4 - 3 ր վոլտողությամբ լարում կիրառելուց հետո

2.5 պարագրաֆում ամփոփվում են 2-րդ գլխի հիմնական արդյունքները:



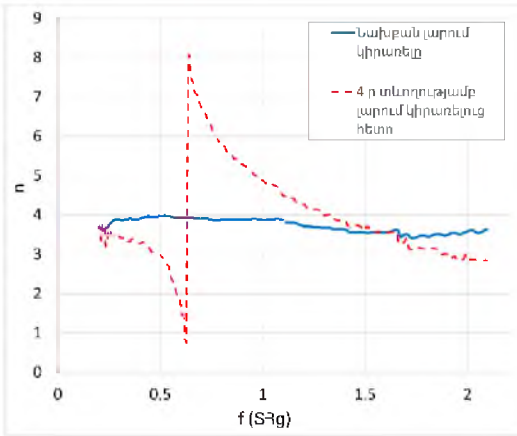
Նկ. 6. SՀց իմպուլսի (ա) ժամանակային տեսքը և (բ) հզորության սպեկտրալ խտությունը, 1, 3 - նախքան լարում կիրառելը և 2, 4 - 5 ը տևողությամբ լարում կիրառելուց հետո

Երրորդ գլխում կատարվել է ողնուղեղի նմուշի SՀց տիրույթում արված փորձարարական հետազոտությունների ընթացքում ստացված արդյունքների վերլուծություն: Հաշվվել է հետազոտվող նմուշի բեկման ցուցիչը: Կառուցվել է SՀց տիրույթում նյարդաթելային համակարգի ոչ գծային վարքը բնութագրող մաթեմատիկական մոդել:

3.1 պարագրաֆում նկարագրված են նյարդային համակարգերում ազդանշանների փոխանցման մեխանիզմը բացատրելու համար առաջարկված մոդելները, համարժեք էլեկտրական շղթաները և դրանց առանձնահատկությունները:

3.2 պարագրաֆում կատարված են հետազոտվող նմուշի բեկման ցուցիչի հաշվարկները: Բեկման ցուցիչի հաճախային կախվածությունը նախ որոշվել է նմուշով անցած SՀց իմպուլսի սպեկտրալ բաղադրիչների փուլային ուշացման միջոցով: Վերլուծության արդյունքները ցույց են տվել, որ նմուշին շեմային 50 Վ/սմ-ից բարձր էլեկտրական դաշտ կիրառելու դեպքում ողնուղեղի նմուշի բեկման ցուցիչը SՀց տիրույթում կրում է էական փոփոխություններ. նմուշը վերածվում է անիզոտրոպ և դիսպերս միջավայրի: Լարում կիրառելու ընթացքում բեկման ցուցիչը որոշակի հաճախությունների վրա ընդունում է նույնիսկ 1-ից փոքր արժեքներ (տես Նկ. 7): Սա նշանակում է, որ ողնուղեղի նմուշով անցնելիս SՀց իմպուլսը ենթարկվում է այնպիսի ձևափոխության, որ նրա սպեկտրում ի հայտ են գալիս որոշակի բաղադրիչներ, որոնք առաջ են ընկած նույնիսկ դատարկ կյուվետով անցած SՀց իմպուլսների համապատասխան սպեկտրալ բաղադրիչներից, ինչը ոչ մի գծային համակարգում հնարավոր չէ:

Հետևաբար՝ ողնուղեղի նմուշով անցնող SՀg իմպուլսում առաջ ընկնող սպեկտրալ բաղադրիչների առկայությունը չի կարող բացատրվել միայն նմուշի բեկման ցուցիչի փոփոխմամբ և այլ բացատրություն է պահանջում:



Նկ. 7. Նմուշի բեկման ցուցիչը հաճախությունից կախված՝ (կապույտ հոծ) - նախքան լարում կիրառելը և (կարմիր կետրագիծ) - 4 ր տևողությամբ լարում կիրառելուց հետո

3.3 պարագրաֆում վերլուծելով ստացված արդյունքները՝ ցույց է տրվել, որ որ հետազոտվող նմուշի մուտքային SՀg իմպուլսի համապատասխան սպեկտրալ բաղադրիչները նմուշի միջով տարածվում են ոչ թե լույսի արագությունից մեծ արագությամբ, այլ նմուշի ոչ գծային հատկությունների շնորհիվ ավելի շուտ եկած ցածր հաճախային բաղադրիչներից գեներացվում են համապատասխան հաճախությամբ նոր հաճախային բաղադրիչներ, որոնք առաջ են ընկած մուտքային SՀg իմպուլսի համապատասխան հաճախային բաղադրիչներից:

Գնահատվել է նաև նմուշի միջով անցած SՀg իմպուլսի էներգիան: Նմուշին լարում կիրառելուց հետո այն սկսում է զգալիորեն նվազել՝ մոտ 0,8 SՀg հաճախության շուրջ խորը կլանման պատճառով, բայց որոշ ժամանակ անց (լարումը կիրառելուց մոտ 2 րոպե անց) SՀg իմպուլսի էներգիան սկսում է աճել շնորհիվ նոր՝ բարձր հաճախային սպեկտրալ բաղադրիչների գեներացման:

3.4 պարագրաֆում ողնուղեղի նմուշի պարամետրերը համեմատվել են իր հետ որոշակի կառուցվածքային նմանություններ ունեցող մետաղական դիֆրակցիոն ցանցի հետ: Ցույց է տրվել, որ թե՛ մետաղական ցանցի, թե՛ ողնուղեղի նմուշի դեպքում SՀg իմպուլսի ցածր հաճախային բաղադրիչները ցուցաբերում են միանման վարք, սակայն ի տարբերություն ողնուղեղի նմուշի, մետաղական ցանցի դեպքում չկա խիստ արտահայտված ռեզոնանսային կլանում, իսկ բարձր հաճախային սպեկտրալ բաղադրիչների աճ բոլորովին չի նկատվում:

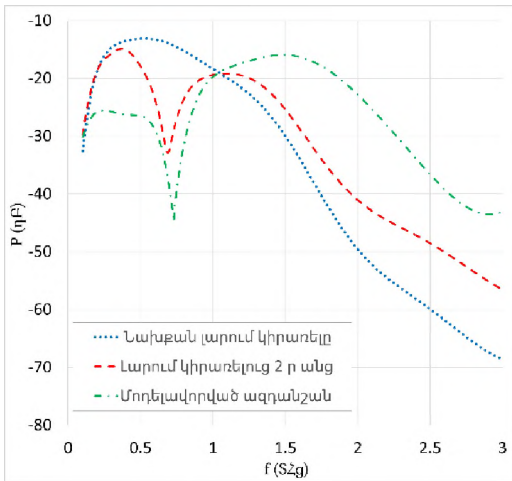
3.5 պարագրաֆում կատարված է ողնուղեղի նմուշի ոչ գծային հատկությունների համակարգչային մոդելավորում, որտեղ նյարդաթելերով անցնող հոսանքի $I(t)$ խտությունը՝ կախված $S<g$ իմպուլսի $E(t)$ էլեկտրական դաշտից ներկայացվել է աստիճանային շարքի տեսքով.

$$I(t) = a_1E(t) + a_2E^2(t) + a_3E^3(t) + a_4E^4(t) + a_5E^5(t) \quad (1)$$

Այս դեպքում հետազոտվող նմուշում առաջացած հոսանքները կվերաճառագայթեն $S<g$ իմպուլս, որի դաշտը ուղիղ համեմատական է հոսանքի (հոսանքի խտության) ըստ ժամանակի ածանցյալին.

$$E_{out}(t) \propto \frac{d}{dt}I(t) \quad (2)$$

Համեմատությունը ցույց է տալիս, որ (1) բանաձևում նույնիսկ միայն քառակուսային անդամով սահմանափակվելու դեպքում մոդելավորված իմպուլսի սպեկտրի հաճախային կախվածության բնույթը նույնն է, ինչ նմուշով անցած իմպուլսինը՝ լարում կիրառելից 2 րոպե անց (տես Նկ. 8):



Նկ. 8 Ողնուղեղի նմուշով անցած $S<g$ իմպուլսի հզորության սպեկտրները նախքան նմուշին լարում կիրառելը, լարման կիրառումից 2 րոպե անց և մոդելավորված ազդանշանի սպեկտրը

3.6 պարագրաֆում ամփոփվում են 3-րդ գլխի հիմնական արդյունքները:

Հիմնական եզրակացություններ

Ատենախոսության շրջանակներում կատարված հետազոտությունները ցույց են տալիս, որ

1. Մարդու էլեկտրասրտագրի սպեկտրալ և բիսպեկտրալ վերլուծությունների միջոցով՝ սահող պատուհանի մեթոդի կիրառմամբ հնարավոր է ստանալ սրտի

աշխատանքի վերաբերյալ լրացուցիչ օգտակար տեղեկություններ, որոնք կարող էին չնկատվել էլեկտրաստագիրը անգն աչքով զննելու դեպքում:

2. Վիճակագրական վերլուծության հետ համատեղ կիրառելով նաև մեքենայական ուսուցման ալգորիթմներ՝ հնարավոր է հայտնաբերել ԷՍԳ-ում առկա առանձնահատկությունները, ինչը կօգնի կատարել սրտի արագ և օպտիմալ ախտորոշում:

3. Գլխուղեղի էլեկտրական ակտիվությունը գրանցելու և վերլուծելու համար մշակված համակարգը գլխուղեղից ստացված ռադիոհաճախային ազդանշանների վիճակագրական վերլուծությունների արդյունքների հիման վրա կարող է հայտնաբերել գլխուղեղի արձագանքը մարդու վրա տարբեր ներգործությունների դեպքում: Առաջին անգամ գրանցվել է գլխուղեղի արձագանքը թույլ ռադիոհաճախային ազդանշանին:

4. Գլխուղեղից գրանցված ռադիոհաճախային ազդանշանների բիսպեկտրալ վերլուծությունների արդյունքները՝ մեքենայական ուսուցման տարբեր ալգորիթմների կիրառմամբ, կարող են օգտագործվել ուղեղի աշխատանքի վերաբերյալ ամբողջական պատկերացում կազմելու և մարդու հոգեկան ու առողջական վիճակի գնահատման համար:

5. Կենդանիների ողնուղեղի նմուշի էլեկտրադինամիկական պարամետրերը հիմնովին փոխվում են՝ նյարդաթելերին ուղղահայաց 50 Վ/սմ-ից մեծ հաստատուն էլեկտրական դաշտով զրգռելիս:

6. Երբ ՏՀց իմպուլսի էլեկտրական դաշտը բևեռացված է նյարդաթելերի դասավորվածության ուղղությանը զուգահեռ, և երբ նմուշին կիրառվում է արտաքին հաստատուն էլեկտրական դաշտ, ի հայտ են գալիս ռեզոնանսային կլանումներ տարբեր հաճախությունների վրա, որոնք փոխվում են ժամանակի ընթացքում: Արտաքին լարումը կիրառելիս որոշ ժամանակ անց (մոտ 5-6 րոպե) նմուշով անցած ՏՀց իմպուլսի պարամետրերը դադարում են փոփոխություններ կրել:

7. Արտաքին լարումն անջատելուց մոտ 1 ժամվա ընթացքում նմուշի էլեկտրադինամիկական հատկությունները սահուն վերադառնում են իրենց սկզբնական արժեքներին:

8. Ողնուղեղի նմուշին ~50 Վ/սմ-ից մեծ արտաքին հաստատուն էլեկտրական դաշտ կիրառելու դեպքում ողնուղեղի նմուշի բեկման ցուցիչը ՏՀց տիրույթում կրում է էական փոփոխություններ՝ նմուշը վերածվում է անիզոտրոպ և դիսպերս միջավայրի: Մոտ 4 ր տևական կիրառման դեպքում, բեկման ցուցիչը դառնում է նույնիսկ 1-ից փոքր, այսինքն՝ նմուշով անցած ՏՀց իմպուլսում առաջանում են սպեկտրալ բաղադրիչներ, որոնք առաջ են ընկած նմուշի մուտքային իմպուլսի

համապատասխան սպեկտրալ բաղադրիչներից, ինչը գծային համակարգերում հնարավոր չէ:

9. Նյարդաթելերի ուղղությանն ուղղահայաց էլեկտրական դաշտ կիրառելու դեպքում ողնուղեղի նմուշն իրեն պահում է որպես ոչ գծային համակարգ, երբ S<g իմպուլսի էլեկտրական դաշտի ուղղությունը համընկնում է նմուշի նյարդաթելերի ուղղության հետ:

10. Մուտքային S<g իմպուլսի համեմատաբար հզոր ցածր հաճախային սպեկտրալ բաղադրիչները կլանվում են ողնուղեղի նմուշի կողմից և նմուշի ոչ գծային հատկությունների շնորհիվ գեներացնում՝ տարբեր հաճախություններով նոր բաղադրիչներ, որոնք առաջ են ընկած մուտքային S<g իմպուլսի համապատասխան հաճախային բաղադրիչներից: Ողնուղեղի նմուշի վրա ընկնող և նրանով անցած S<g իմպուլսների սպեկտրների համեմատությունները նույնպես հաստատում են այդ եզրակացությունը:

11. Ողնուղեղի նմուշի վրա արտաքին հաստատուն լարում կիրառելու դեպքում բացվում են Ռանվիեի հանգույցների իոնային անցուղիները՝ նյարդաթելերը դարձնելով յուրահատուկ հաղորդիչ լարեր, որոնք ամբողջ նմուշը վերածում են ոչ-գծային հատկություններով օժտված դիֆրակցիոն ցանցի:

Հղված գրականություն

- [1] A. Swami, G. B. Giannakis, and G. Zhou, “Bibliography on higher-order statistics,” *Signal Processing*, vol. 60, no. 1, pp. 65–126, Jul. 1997, doi: 10.1016/S0165-1684(97)00065-0.
- [2] M. S. Bartlett, “An introduction to stochastic processes: with special reference to methods and applications,” Cambridge University Press, 1955.
- [3] A. L. Hodgkin and A. F. Huxley, “A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve,” *J Physiol*, vol. 117, no. 4, pp. 500–544, Aug. 1952, doi: 10.1113/jphysiol.1952.sp004764.
- [4] M. DeMaegd, C. Städele, and W. Stein, “Axonal Conduction Velocity Measurement,” *Bio Protoc*, vol. 7, no. 5, 2017, doi: 10.21769/BioProtoc.2152.
- [5] G. Liu et al., “Myelin Sheath as a Dielectric Waveguide for Signal Propagation in the Mid-Infrared to Terahertz Spectral Range,” *Adv Funct Mater*, vol. 29, no. 7, Feb. 2019, doi: 10.1002/adfm.201807862.
- [6] K. Yang, “Characterisation of the In-vivo Terahertz Communication Channel within the Human Body Tissues for Future Nano-Communication Networks.,” Queen Mary University of London, 2016.

INVESTIGATION OF ELECTROMAGNETIC ACTIVITY OF NEURAL NETWORKS

ABSTRACT

This dissertation is devoted to investigation of electromagnetic properties of biological neural systems.

Research conducted as part of the dissertation shows that through spectral and bispectral analyses of the human electrocardiogram (ECG), using the sliding window method, it is possible to obtain additional useful information about the work of the heart, which could not be observed when examining the electrocardiogram with the naked eye. This gives an opportunity to detect various features of ECG with high precision by applying machine learning algorithms in combination with statistical analyses.

A system has been developed to record and analyse brain electromagnetical activity in high frequency (HF) range. With the help of statistical analyses brain response to various influences have been detected. When a volunteer has been under physical and psychological stress, brain activity in HF range has been recorded and analyzed, using machine learning alongwith statistical analyses, artificial recurrent neural networks as a machine learning method gave the most accurate results – up to 85%. Using an antenna applicator, brain response to external 20 MHz signal has been recorded. Despite spectral analysis, the bispectral analysis revealed new spectral components correlated with the external signal, indicating that the brain reacts as a nonlinear or parametric system.

The results may improve our understanding of brain processes and help in the diagnosis and treatment of neurological disorders. Further studies revealing the correlations between radiofrequency responses and various brain pathologies may help in the development of medical diagnostics and treatment strategies.

The electrodynamic parameters of an animal (sheep and pig) spinal cord sample have been investigated in terahertz (THz) frequency range (0.1–3 THz) using a THz time domain spectrometer (TDS). It was shown, that when an external constant electric field – greater than 50 V/cm applied to the spinal cord sample is perpendicular to and the electric field vector of transmitted THz pulse is parallel to the direction of nerve fibers arrangement, the electrodynamic parameters of the sample change fundamentally. Particularly, after applying the voltage to the sample, strong resonant absorption appears around 0.8 THz frequencies and after 1-2 minutes, the resonant frequency shifts smoothly to lower frequencies (down to 0.6 THz) when voltage is applied to the sample. During that time, the energy of

frequency components bigger than 1 THz goes higher and reaches up to 20-25 dB difference compared to the corresponding components of THz pulse transmitted through the sample before applying the external voltage. After turning off the external voltage, the electrodynamic properties of the sample smoothly return to their original values within about 1 hour.

It was shown that when an external voltage is applied, the sample turns into an anisotropic and dispersed medium. Resonant features have been seen also in refractive index around similar frequencies. About after 4 minutes of external voltage applied, the refractive index becomes even less than 1. This means that some frequency components precede corresponding components of incident THz pulse, which cannot be possible in linear systems.

This phenomenon is explained as follows: when an external DC voltage is applied to the spinal cord sample, the ion channels in the nodes of Ranvier open, transforming the nerve fibers into specific nonlinear conductors, which transform the entire sample into a diffraction grating with nonlinear properties. The relatively powerful low frequency frequency components of the incident THz pulse are absorbed by the spinal cord sample and, due to the nonlinear properties of the sample, new components with different frequencies are generated, which precede the corresponding frequency components of the incident THz pulse. Comparisons of the spectra of the incident and transmitted THz pulses also confirm this conclusion.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

АННОТАЦИЯ

Диссертация посвящена исследованию электромагнитных свойств биологических нейронных систем.

Исследования, проведенные в рамках диссертации, показывают, что с помощью спектрального и биспектрального анализа электрокардиограммы (ЭКГ) человека с использованием метода скользящего окна можно получить дополнительную полезную информацию о работе сердца, которую невозможно наблюдать при исследовании электрокардиограммы невооруженным глазом. Это дает возможность с высокой точностью выявлять различные особенности ЭКГ, применяя алгоритмы машинного обучения в сочетании со статистическим анализом.

Разработана система для регистрации и анализа электромагнитной активности мозга в диапазоне высоких частот (ВЧ). С помощью статистического анализа выявлена реакция мозга на различные воздействия. При нахождении добровольца в состоянии физического и психологического стресса регистрировалась и анализировалась активность мозга в диапазоне ВЧ, с использованием машинного обучения наряду со статистическим анализом, рекуррентные искусственные нейронные сети как метод машинного обучения дали наиболее точные результаты – до 85%. С помощью антенны-аппликатора регистрировалась реакция мозга на внешний сигнал частотой 20 МГц. В отличие от спектрального анализа, биспектральный анализ выявил новые спектральные компоненты, коррелирующие с внешним сигналом, что указывает на то, что мозг реагирует как нелинейная или параметрическая система.

Результаты могут улучшить наше понимание мозговых процессов и помочь в диагностике и лечении неврологических расстройств. Дальнейшие исследования, раскрывающие связи между радиооткликами и различными патологиями головного мозга, могут помочь в разработке медицинской диагностики и стратегий лечения.

Электродинамические параметры образца спинного мозга животных (овцы и свиньи) были исследованы в терагерцовом (ТГц) диапазоне частот (0,1–3 ТГц) с использованием терагерцового спектрометра во временной области. Было показано, что когда внешнее постоянное электрическое поле – больше 50 В/см – прикладывается к образцу спинного мозга перпендикулярно направлению расположения нервных волокон, а вектор электрического поля ТГц-импульса

параллелен, то электродинамические параметры образца изменяются кардинально. В частности, при подаче напряжения на образец появляется сильное резонансное поглощение около частот 0,8 ТГц. После приложения напряжения в течение 1-2 минут резонансная частота плавно смещается в сторону более низких частот (до 0,6 ТГц) при подаче напряжения на образец. За это время энергия частотных компонентов больше 1 ТГц увеличивается и достигает разницы до 20-25 дБ по сравнению с соответствующими компонентами ТГц-импульса, прошедшего через образец до подачи внешнего напряжения. После отключения внешнего напряжения электродинамические свойства образца плавно возвращаются к исходным значениям в течение примерно 1 часа.

Было показано, что при подаче внешнего напряжения, образец превращается в анизотропную и дисперсную среду. Резонансные особенности были замечены также в показателе преломления около аналогичных частот. Примерно через 4 минуты подачи внешнего напряжения показатель преломления становится даже меньше 1. Это означает, что отдельные частотные компоненты опережают соответствующие компоненты падающего ТГц-импульса, что невозможно в линейных системах.

Это явление объясняется следующим образом: при подаче внешнего постоянного напряжения на образец спинного мозга ионные каналы в перехватах Ранвье открываются, превращая нервные волокна в специфические нелинейные проводники, которые преобразуют весь образец в дифракционную решетку с нелинейными свойствами. Относительно мощные низкочастотные частотные компоненты падающего ТГц-импульса поглощаются образцом спинного мозга и, благодаря нелинейным свойствам образца, генерируются новые компоненты с другими частотами, которые опережают соответствующие частотные компоненты падающего ТГц-импульса. Сравнения спектров падающего и прошедшего ТГц-импульса также подтверждают этот вывод.

