

ՀՀ ԳԱԱ ԻՆՖՈՐՄԱՏԻԿԱՅԻ ԵՎ ԱՎՏՈՄԱՏԱՑՄԱՆ ՊՐՈԲԼԵՄՆԵՐԻ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ

Թադևոսյան Արթուր Սպարտակի

**ՄԻՆԹԵՏԻԿ ԱՊԵՐՏՈՒՐՈՎ ՌԱԴԱՐՈՒՄ ՄՇԱԿՎՈՂ ԱԶԴԱՆՇԱՆՆԵՐԻ  
ՄՈԴԵԼԱՎՈՐՄԱՆ ԵՎ ԻՄԻՏԱՑՄԱՆ ՄԵԹՈԴՆԵՐԻ ՆԱԽԱԳԾՈՒՄ**

Ե.13.04 – «Հաշվողական մեքենաների, համալիրների, համակարգերի  
և ցանցերի մաթեմատիկական և ծրագրային ապահովում»  
մասնագիտությամբ տեխնիկական գիտությունների թեկնածուի  
գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության

Ս Ե Ղ Մ Ա Գ Ի Ր

Երևան – 2017

---

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ИНФОРМАТИКИ И АВТОМАТИЗАЦИИ НАН РА

Тадевосян Артур Спартакович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИМИТАЦИИ  
ЭХО-СИГНАЛОВ ДЛЯ РАДАРА С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук по специальности  
05.13.04 «Математическое и программное обеспечение  
вычислительных машин, комплексов, систем и сетей»

Ереван – 2017

Ատենախոսության թեման հաստատվել է ՀՀ ԳԱԱ Ինֆորմատիկայի և ավտոմատացման պրոբլեմների ինստիտուտում:

Գիտական ղեկավար՝	տեխ.գիտ.դոկտոր	Մ.Վ.Մարկոսյան
Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝	տեխ.գիտ.դոկտոր	Դ.Գ.Ասատրյան
	ֆիզ.մաթ.գիտ.թեկնածու	Ա.Հ.Կոստանյան

Առաջատար Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան կազմակերպություն՝

Պաշտպանությունը կայանալու է 2017թ. հունիսի 8-ին, ժ. 17:00-ին ՀՀ ԳԱԱ Ինֆորմատիկայի և ավտոմատացման պրոբլեմների ինստիտուտում գործող 037 «Ինֆորմատիկա» մասնագիտական խորհրդի նիստում, հետևյալ հասցեով՝ Երևան, 0014, Պ. Սևակի 1:

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ՀՀ ԳԱԱ ԻԱՊԻ գրադարանում:  
Սեղմագիրը առաքված է 2017թ. մայիսի 8-ին:

037 Մասնագիտական խորհրդի գիտական քարտուղար ֆ.մ.գ.դ.



Հ.Գ.Սարգսյանյան

---

Тема диссертации утверждена в Институте проблем информатики и автоматизации НАН РА.

Научный руководитель:	доктор тех.наук	М.В.Маркосян
Официальные оппоненты:	доктор тех.наук	Д.Г.Асатрян
	кандидат физ.-мат. наук	А.Г.Костанян

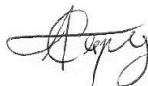
Ведущая организация: Национальный политехнический университет Армении

Защита состоится 8-ого июня 2017г. в 17:00 на заседании специализированного совета 037 «Информатика» Института проблем информатики и автоматизации НАН РА по адресу: 0014, г. Ереван, ул. П. Севака 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПИА НАН РА.

Автореферат разослан 8-ого мая 2017г.

Ученый секретарь,  
Специализированного совета 037  
доктор физ.-мат.наук



А.Г.Саруханян

**Թեմայի արդիականությունը**

Սինթետիկ ապերտուրով ռադարները (ՍԱՌ) կարևոր նշանակություն ունեն հեռագննման, երկրագիտության և օբյեկտների դիտարկման ոլորտներում: ՍԱՌ համակարգերը ազդանշանների մշակումը օգտագործելով՝ սինթեզում են ֆիզիկականից ավելի երկար անտենա: Այն կարող է արդյունավետորեն աշխատել վատ եղանակային պայմաններում և ձևավորել բարձր թույլտվությամբ պատկերներ: ՍԱՌ համակարգերը ի վիճակի են պատկերել տեղանքը անգամ ամպամած պայմաններում, քանի որ ռադարը ունի ավելի մեծ ալիքի երկարություն, քան՝ տեսանելի լույսը: Հետևաբար, դա հնարավորություն է տալիս խուսափել ամպերի ազդեցությունից և տեղանքից անդրադարձերը ստանալ հնարավորինս անվնաս:

ՍԱՌ-ում մշակվող ազդանշանների գեներացիան առանցքային դեր ունի այդ համակարգերի նախագծման և հետազոտման մեջ: Համոզվելու համար, որ մշակված ՍԱՌ համակարգը համապատասխանում է իր առջև դրված պահանջներին, այն նախօրոք պետք է ստուգվի գեներացված ազդանշանների հետ: Այսպիսով, չմշակված տվյալների (raw data, raw signal) գեներացիան հանդիսանում է ՍԱՌ համակարգերի նախագծման և մշակման կարևոր փուլերից մեկը: Այդ գեներացիան իրականացնող գործիքը կոչվում է ՍԱՌ նմանակիչ (SAR simulator):

ՍԱՌ նմանակիչները հիմնականում օգտագործվում են արդյունավետության չափման, նոր ալգորիթմների նախագծման, համակարգի ապարատային ու կառուցվածքային ստուգման, փորձերի պլանավորման ու պատկերի ձևավորման մեթոդների մշակման համար: Հիմնվելով այս նպատակների վրա՝ Ֆրանչեսկետին առանձնացրել է՝ երկու տեսակի ՍԱՌ նմանակիչներ՝ ՍԱՌ պատկեր կամ ՍԱՌ չմշակված ազդանշաններ գեներացնելու համար: Պատկեր գեներացնող նմանակիչները նախատեսված են պլանավորման, թիրախների ավտոմատ ճանաչման կամ երկրաբանական հետազոտման համար: Ազդանշան գեներացնող նմանակիչները նպատակաուղղված են ՍԱՌ պատկերի ձևավորման ալգորիթմների մշակմանը կամ ստուգմանը:

Չմշակված ազդանշանների գեներացման համար ներկայացվել են տեղանքը նկարագրող տարբեր մեթոդներ, ինչպիսիք են անդրադարձային ֆունկցիան (reflectivity function), անդրադարձելիության գնահատականներով (reflectivity evaluation) նկարագրումը: Այնուհետև կատարվել են աշխատանքներ մուտքային պատկերի հիման վրա թիրախների ցրման արդյունավետ մակերեսի (ՏԱՍ) ստացման ուղղությամբ:

Վերը նշված մեթոդների օգտագործմամբ մշակվել են տարբեր ՍԱՌ նմանակիչներ<sup>234</sup>: Ուսումնասիրելով և վերլուծելով այդ համակարգերը կարելի է գալ այն

<sup>1</sup> Franceschetti G., Migliaccio M., Riccio D. “The SAR simulation: an overview”. Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1995.

<sup>2</sup> SAR Simulation Toolbox. <http://www.array.ca/solutions/sar-simulation/>

<sup>3</sup> Sarsim Synthetic Aperture Radar Simulator – SDT.

<http://www.sdt.com.tr/en/products/sarsim-synthetic-aperture-radar-simulator/>

եզրահանգման, որ չկան ՍԱՌ չմշակված տվյալների գեներացման այնպիսի նմանակիչներ, որոնք հնարավորություն կտան առանց իրական թռիչքների կատարման (կամ նրանց սակավաթիվ լինելու դեպքում) նախագծել ռադարային պատկեր ձևավորող ապարատա-ծրագրային համակարգ՝ ՍԱՌ մշակման մոդուլ:

### **Ատենախոսության նպատակը**

Աշխատանքի նպատակն է ստեղծել սինթետիկ ապերտուրով ռադարում մշակվող ազդանշաններ գեներացնող նմանակիչ, որը թույլ կտա առավել փոքր ռեսուրսներով մշակել ՍԱՌ պատկեր ձևավորող ապարատա-ծրագրային համակարգ:

Աշխատանքում նպատակային խնդիր է եղել, նաև, ակտիվ խանգարումների կիրառման պայմաններում ՍԱՌ համակարգի էֆեկտիվ աշխատելուն նպաստող միջոցների մշակումը, մասնավորապես, ծրագրային ու սարքային սակավ միջոցների օգտագործմամբ ուղղվածության դիագրամում անկումի ստացման մեթոդի մշակումը:

### **Հետազոտության մեթոդները**

Հետազոտությունները հիմնվել են ռադիոտեղորոշման, ազդանշանների թվային մշակման դասական հասկացությունների, մաթեմատիկական հաշվարկների մոտարկումների վրա: Բացի այդ, մշակված համալիրի արագագործության ապահովման համար օգտագործվել են օբյեկտ կողմնորոշված ծրագրավորման մոտեցումները, C++ ծրագրավորման լեզուն, CUDA<sup>5</sup> տեխնոլոգիայի կիրառմամբ գրաֆիկական պրոցեսորի հետ աշխատանքի մեթոդներ: Անալոգային ազդանշանների ստացման համար կիրառվել է Deasy Tools<sup>6</sup> ծրագրային փաթեթը:

### **Գիտական նորությունը**

- Նախագծվել է ՍԱՌ-ում մշակվող ազդանշաններ գեներացնող նմանակիչ մոդել:
- Մշակվել է ՍԱՌ նմանակիչ ապարատա-ծրագրային համալիր, որը կարող է իրական ժամանակում գեներացնել և տարբեր ռեժիմներում թվային կամ անալոգային ազդանշաններ փոխանցել ՍԱՌ մշակման մոդուլին:
- Մշակվել է ակտիվ խանգարումների առկայության պայմաններում ՍԱՌ համակարգի կայունությունը ապահովող մեթոդ:

### **Արդյունքների կիրառական նշանակությունը**

Ստացված արդյունքները կարելի է կիրառել հետաքրքրություն ներկայացնող տարածքների հեռահար հետազոտման և անվտանգության ապահովման գործում: ՍԱՌ նմանակիչը կարող է կիրառվել ինչպես ՍԱՌ մշակման համակարգերի նախագծման խնդիրներում, այնպես էլ օգտագործվել որպես այլ ՍԱՌ համակարգերին հակազդող միջոց:

---

<sup>4</sup> OpenSource SAR simulator. <https://github.com/noobmartin/Open-source-SAR-simulator/>

<sup>5</sup> CUDA Parallel Computing Platform. [http://www.nvidia.com/object/cuda\\_home\\_new.html/](http://www.nvidia.com/object/cuda_home_new.html/)

<sup>6</sup> Deasy Tools. <http://www.insys.ru/downloads/dzy/>

## **Ներդրումները**

Աշակված ապարատա-ծրագրային համալիրը և ակտիվ խանգարումների ճնշմանը ուղղված մեթոդը փորձարկվել և ներդրվել են «Երևանի կապի միջոցների գիտահետազոտական ինստիտուտի» կողմից նախագծվող ՍԱՌ համակարգի մեջ:

## **Պաշտպանության ներկայացվող դրույթները**

- ՍԱՌ-ում մշակվող ազդանշաններ գեներացնող նմանակչի մոդելը:
- ՍԱՌ նմանակչի ապարատա-ծրագրային համալիրը:
- Ակտիվ խանգարումների առկայության պայմաններում ՍԱՌ համակարգի կայունությունը ապահովող մեթոդը:

## **Աշխատանքի արդյունքների հավաստիությունը**

Աշխատանքի ընթացքում ստացված արդյունքների հավաստիությունը հիմնավորվում է ապարատա-ծրագրային համալիրի կիրառմամբ ստացված և իրական փորձերի<sup>7</sup> ընթացքում ձեռք բերված արդյունքների համեմատությամբ:

## **Աշխատանքի արդյունքների ապրոբացիան**

Ատենախոսության մեջ ստացված հիմնական գիտական և կիրառական արդյունքները զեկուցվել են 10-րդ «Computer Science and Information Technologies-2015» միջազգային գիտաժողովում, Ինֆորմատիկայի և ավտոմատացման պրոբլեմների ինստիտուտի և Երևանի կապի միջոցների գիտահետազոտական ինստիտուտի գիտական սեմինարներում:

## **Հրատարակումներ**

Աշխատանքի հիմնական արդյունքները ներկայացված են 5 գիտական հոդվածներում, որոնց ցանկը բերված է սեղմագրի վերջում:

## **Աշխատանքի կառուցվածքը և ծավալը**

Աշխատանքը բաղկացած է ներածությունից, 4 գլխից, եզրահանգումից, առաջարկություններից, 95 օգտագործված գրականության ցանկից և 2 հավելվածներից: Աշխատանքը ներառում է 47 նկար և 7 աղյուսակ: Աշխատանքի ընդհանուր ծավալը 116 էջ է:

---

<sup>7</sup> Իրական փորձերը կատարվել են անօդաչու թռչող սարքի վրա տեղակայված ՍԱՌ-ով:

## ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ՀԻՄՆԱԿԱՆ ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆԸ

**Ներածության** մեջ հիմնավորվել են ատենախոսության թեմայի արդիականությունը, ներկայացվել են հետազոտության նպատակն ու խնդիրները, գիտական նորույթը, պաշտպանության ներկայացվող հիմնական դրույթները, հետազոտության տեսական և գործնական նշանակությունը:

Ատենախոսության **առաջին գլխում** ներկայացված է ՍԱՌ համակարգերում ազդանշանների մշակման հիմնական եղանակները, նրանցում առկա խնդիրները, գոյություն ունեցող ՍԱՌ նմանակիչների համեմատական վերլուծությունը:

**Բաժին 1.1**-ում դիտարկվել են ՍԱՌ պատկերման տարբեր մեթոդներ և կատարվել է նրանց համեմատական ուսումնասիրություն: Հիմնվելով այն փաստի վրա, որ Stripmap<sup>8</sup> տեսակի ՍԱՌ-ը հանդիսանում է ամենատարածված ռադարային պատկերման համակարգը՝ ատենախոսության մեջ դիտարկվել են այդ սկզբունքով աշխատող ՍԱՌ-երը: Համապատասխան օգտագործման դեպքում աշխատանքում ներկայացված նմանակիչը կարող է օգտագործվել նաև InSAR<sup>9</sup> և Tomographic<sup>10</sup> տեսակի համակարգերը մշակելու և ստուգելու համար:

**Բաժին 1.2**-ում քննարկվել են ՍԱՌ համակարգեր նախագծելու ժամանակ ռադարային բնութագրերի ընտրության նշանակությունը և դրանց օպտիմալ ընտրության հետ կապված բարդությունները:

**Բաժին 1.3**-ում ներկայացված է նմանակիչների ունեցած դերը ՍԱՌ համակարգեր մշակելիս: Սահմանվել են թիրախային օբյեկտ և թիրախային ազդանշան հասկացությունները: ՍԱՌ-ում թիրախային օբյեկտ համարվում է այն տարածքը, որի պատկերը պետք է ձևավորվի: Թիրախային համարվում է այն ազդանշանը, որը ստացվում է մեր կողմից որպես թիրախներ դիտարկվող օբյեկտներից՝ ճառագայթված զոնդավորող ազդանշանի անդրադառնալուց:

ՍԱՌ նմանակիչի հիմնական խնդիրը առավել հստակ սահմանվում է, որպես ռադարի աշխատանքի ընդունման փուլում սպասվող ազդանշանների գեներացում: Այս խնդիրը լուծելով՝ նմանակիչը դառնում է ՍՄՄ-ի գործիք, որը կարող է օգտագործվել վերջինիս մշակումն ու փորձարկումը արագացնելու և էժանացվելու համար:

---

<sup>8</sup> Ramakrishnan S., Demarcus V., Le J.N., "Synthetic Aperture Radar Imaging Using Spectral Estimation Techniques", University of Michigan, 2012.

<sup>9</sup> Ferretti A. "InSAR Principles - Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation", ESA Publications, 2007.

<sup>10</sup> Fornaro G. "Tomographic Processing of Interferometric SAR Data: Developments, applications, and future research perspectives", IEEE Signal Processing Magazine, Volume: 31, Issue: 4, 2014.

**Բաժին 1.4**-ում դիտարկվել են ՍԱՌ համակարգերում մշակվող ազդանշանների գեներացման համար նախատեսված մի քանի ՍԱՌ նմանակիչներ և կատարվել նրանց համեմատական վերլուծությունը: Ուսումնասիրված համակարգերից համեմատության համար ընտրվել են SAR Simulation Toolbox, SARSIM - Synthetic Aperture Radar Simulator և OpenSource SAR Simulator համակարգերը: Վերլուծելով վերը նշված համակարգերը կարելի է գալ այն եզրահանգման, որ չկան ՍԱՌ չմշակված տվյալների գեներացման համար նախատեսված այնպիսի նմանակիչներ, որոնք կարող են՝

- համակարգի ելքում տրամադրել անալոգային ազդանշաններ,
- գեներացնել տվյալներ՝ հիմնվելով թվային պատկերի վրա,
- գեներացված իդեալական ՍԱՌ ազդանշանին ավելացնել խանգարումներ:

Բացի դրանից տարբեր նմանակիչների մոտ հանդիպում են որոշ օգտակար հնարավորություններ, որոնք բացակայում են մյուսների մոտ: Դրանից ելնելով՝ մշակվող համակարգում նաև խնդիր է դրվում մեկտեղել այդ հնարավորությունները, որոնք են՝

- նախագծել իրական ժամանակում աշխատող, արագ մշակում իրականացնող համակարգ,
- ներդնել շարժման ժամանակ տատանումները հաշվի առնող կրողի հետագծեր,
- տեղանքը նկարագրելու համար ունենալ թվային պատկերի և պարամետրական օբյեկտների հիման վրա հիմնված մոդելներ:

Ատենախոսության **երկրորդ գլխում** բերված են նմանակիչ նկարագրող և նմանակային մոդելները:

**Բաժին 2.1**-ում ներկայացված է նմանակիչ նկարագրող տեղեկատվական մոդելը: Այստեղ քննարկվել են մուտքային և ելքային տվյալների, գեներացվող և զոնդավորող ազդանշանների հնարավոր տարբերակները: Մոդելի հիմնական բնութագրիչները բերված են աղյուսակ 1-ում:

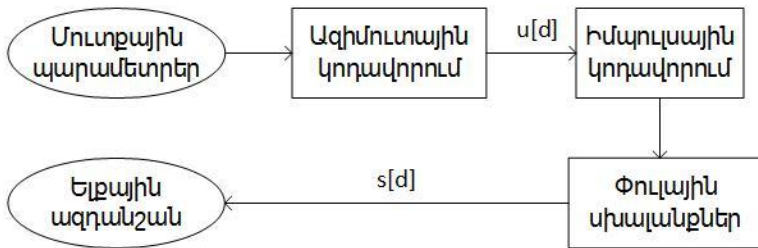
Մուտքային տվյալները	Տեղանքը նկարագրող	Պարամետրական օբյեկտներ
		Մուտքային պատկեր
	Շրջակա միջավայրն ու ռադարը նկարագրող	
Ելքային տվյալներ	Մի կրկնման պարբերությանը համապատասխանող	
	Մի խումբ կրկնման պարբերություններին համապատասխանող	
Գեներացվող ազդանշանները	Առանց աղավաղումների (իդեալական)	
	Աղմուկների ու խանգարումների պայմաններում	
	Կրողների տատանումների պայմաններում	
	Աղմուկների, խանգարումների, կրողի տատանումների պարագայում	
Զոնդավորող ազդանշանը	Գծային հաճախականային մոդուլացված ազդանշան	
	Օգտագործողի կողմից տրված ազդանշան	

*Աղյուսակ 1. Նմանակիչ նկարագրող մոդելի հիմնական բնութագրիչները*

**Բաժին 2.2**-ում ներկայացված է նմանակչի առաջարկվող ֆորմալ մոդելի կառուցման հիմնական սկզբունքները: Անդրադարձային ազդանշանի գեներացումը կարելի է վերածնակերպել, որպես  $N_d$  երկարությամբ  $s[d]$  զանգվածի արժեքների հաշվարկ: Այստեղ  $N_d$ -ն մի պարբերության ժամանակ ընդունված դիսկրետների քանակն է: Երբ գեներացվող կրկնման պարբերությունների քանակը տարբերվում է մեկից՝  $M_{rp} > 1$ , կատարվում է  $[M_{rp} \times N_d]$  չափանի մատրիցի հաշվարկ: Մատրիցի ամեն էլեմենտ կոմպլեքս թիվ է, որը նկարագրում է ժամանակի որոշակի պահին ստացված անդրադարձային ազդանշանը:

Մի կրկնման պարբերության մեջ գտնվող դիսկրետների հաշվարկը նույնական է բոլորի համար: Մի պարբերության գեներացումը բաղկացած է երկու փուլերից՝ ազիմուտային կոդավորում և իմպուլսային կոդավորում (նկար 1): Հնարավոր է ներառել փուլային սխալանքների ավելացման ոչ պարտադիր փուլը:

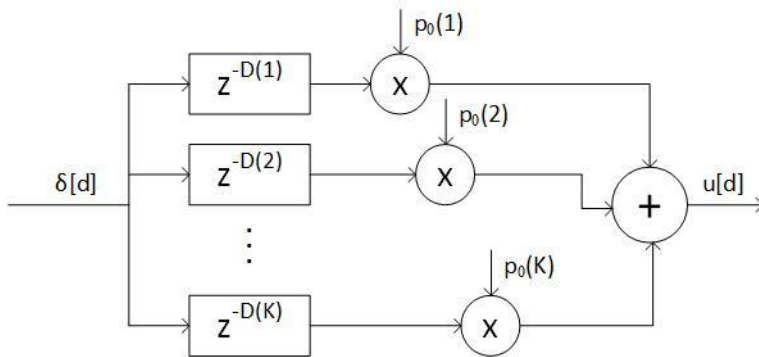
Ազիմուտային կոդավորման ընթացքում ենթադրվում է, որ յուրաքանչյուր թիրախից ստացվում է անդրադարձ՝ միավոր-ազդանշանի (delta function) տեսքով, իսկ իմպուլսային կոդավորման ժամանակ՝ այդ անդրադարձերը բերվում են զոնդավորող ազդանշանի տեսքի:



Նկար 1. Տվյալների գեներացման հիմնական փուլերը

**Բաժին 2.3**-ում ներկայացված է ազիմուտային կոդավորման փուլը: Այս փուլում յուրաքանչյուր պարբերության համար հաշվվում է բոլոր  $\forall k \in [1, K]$  թիրախներից ստացված  $\delta[d]$  միավոր-անդրադարձների  $u[d]$  գումարը (նկար 2):





Նկար 2. Ազիմուտային կողավորման փուլը

$D(k)$  ֆունկցիան որոշում է միավոր ֆունկցիայի շեղումը, որը կախված է  $k$ -րդ թիրախի հեռավորությունից:  $k$ -րդ թիրախից ստացված  $p_0(k)$  ազդանշանը որոշվում է ըստ՝

$$p_0(k) = a(k) \cdot \exp\left(4\pi \frac{R(k)}{\lambda}\right),$$

որտեղ՝  $a(k)$ -ն՝ ազդանշանի ամպլիտուդն է,  $R(k)$ -ն  $k$ -րդ թիրախի հեռավորությունն է ռադարից,  $\lambda$ -ն՝ ազդանշանի ալիքի երկարությունը:

Մշակված է պատկերվող տեղանքը նկարագրելու երկու եղանակ՝ պարամետրական թիրախների և մուտքային նկարի վրա հիմնված:

**Պարամետրական թիրախների** հիման վրա աշխատող նմանակչի աշխատանքի ժամանակ պատկերվող տարածքը նկարագրվում է կետային թիրախների տեսքով: Օգտագործվում են երկու տիպի մուտքային տվյալներ՝ պարամետրական օբյեկտները և շրջակա միջավայրն ու ռադարը նկարագրող պարամետրեր: Մշակված են պարամետրական թիրախի նկարագրման երկու եղանակ՝ պարզ և բարդ: Նրանցում թիրախը նկարագրող պարամետրերը բերված են աղյուսակ 2-ում:

Պարզ	Բարդ
<ul style="list-style-type: none"> <li>• դիրքը տարածության մեջ,</li> <li>• ամպլիտուդը (<math>a</math>):</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• դիրքը տարածության մեջ,</li> <li>• ցրման արդյունավետ մակերեսը (<math>\Sigma</math>, <math>\sigma</math>):</li> </ul>

Աղյուսակ 2. Պարամետրական թիրախների նկարագրման եղանակները

Նրանց տարբերությունը կայանում է թիրախից ստացված ազդանշանի ամպլիտուդի հաշվարկի մեջ, իսկ ազդանշանի փուլի հաշվարկը երկու եղանակների դեպքում նույնն է: Պարզ նկարագրման ժամանակ թիրախի ամպլիտուդի հաշվարկը պահանջում է ավելի քիչ քանակությամբ պարամետրերի օգտագործում, իսկ բարդ նկարագրման ժամանակ ազդանշանի ամպլիտուդը ստացվում է ռադարի հավասարման<sup>11</sup> միջոցով:

Երկու եղանակներում էլ թիրախի դիրքը տարածության մեջ կարող է տրվել հետևյալ երեք կոորդինատական համակարգերում՝ դեկարտյան, սֆերիկ և աշխարհագրական:

**Մուտքային պատկերի** հիման վրա աշխատող նմանակչի աշխատանքի համար անհրաժեշտ են երկու տիպի մուտքային տվյալներ՝ տեղանքը նկարագրող պատկեր և շրջակա միջավայրն ու ռադարը նկարագրող պարամետրեր: Այս դեպքում, որպես թիրախներ դիտարկվում են մուտքային պատկերի պիքսելների կենտրոնները:

Ազիմուտային կողավորման ընթացքում կատարվում է ցիկլ՝ ըստ կրկնման պարբերության մեջ եղած բոլոր դիսկրետների: Յուրաքանչյուր  $\forall d \in [1:N_d]$  էլեմենտի համար որոշվում են նրան համապատասխանող  $t(d)$  ժամանակը և  $R(d) = t(d) \cdot c/2$  հեռավորությունը: Դիտարկվում են մուտքային պատկերի բոլոր  $W_p$  քանակությամբ սյուները և յուրաքանչյուր  $\forall w_p \in [1:W_p]$  համարով սյան համար գտնվում է  $R(d)$  հեռավորությանը համապատասխանող տեղանքը նկարագրող պիքսելի տողի  $h_p$  համարը: Մի կրկնման պարբերության համար ազիմուտային կողավորման փուլում գեներացված տվյալները որոշվում են ըստ՝

$$u[d] = \begin{cases} \sum_{w_p=1}^{W_p} A[w_p, h_p] \cdot e^{i\left(\frac{2R(w_p, h_p)}{\lambda}\right)}, & d \in [d_{min}, d_{max}] \\ 0 + i \cdot 0, & d \in [1, d_{min} - 1] \text{ և } d \in [d_{max} + 1, N_d] \end{cases},$$

---

<sup>11</sup> Ռադարի հավասարման կիրառմամբ ստացվում է անտենայի ընդունիչում թիրախից անդրադարձած ազդանշանի մակարդակը, որը կախված է մի խումբ պարամետրերից, այդ թվում թիրախի ՑԱՄ-ից և մինչև ռադարը եղած հեռավորությունից:

որտեղ՝  $W_p$ -ն մուտքային պատկերի լայնությունն է,  $A[w_p, h_p]$ -ն՝  $(w_p, h_p)$  պիքսելի գույնից ստացվող ամպլիտուդը,  $d_{min}$ -ը և  $d_{max}$ -ը ամենամոտ և ամենահեռու թիրախների հեռավորություններին համապատասխանող դիսկրետի համարները:

**Բաժին 2.4**-ում ձևակերպված է իմպուլսային կողավորման փուլը, որի ժամանակ թիրախներից ստացված միավոր-անդրադարձերը բերվում են զոնդավորող ազդանշանի տեսքի: Նմանակչում ներդրված է գծային հաճախականային մոդուլացված զոնդավորող ազդանշան, որը որոշվում է ըստ՝

$$p[d] = A_p \cdot e^{i \cdot \varphi(d)}, \quad d \in [1, d_p],$$

$$\varphi(d) = \pi B \cdot t(d) \cdot \left( \frac{t(d)}{T_p} - 1 \right),$$

որտեղ՝  $A_p$ -ն զոնդավորող ազդանշանի ամպլիտուդն է,  $T_p$ -ն՝ զոնդավորող ազդանշանի տևողությունը,  $d_p$ -ն՝ իմպուլսի տևողությանը համապատասխան դիսկրետների քանակը,  $B$ -ն՝ ազդանշանի շերտի լայնությունը:

Ուղիղ գումարման ալգորիթմով կողավորումը կատարելու դեպքում կկիրառվի հետևյալ բանաձևը՝

$$s[d] = \begin{cases} \sum_{i=1}^d u[i] \cdot p[d - i + 1], & 1 \leq d \leq d_p - 1, \\ \sum_{i=1}^{d_p} u[d + i - d_p] \cdot p[d_p - i + 1], & d_p \leq d \leq d_{max}, \\ \sum_{i=1}^{d_p + d_{max} - d} u[d + i - d_p] \cdot p[d_p - i + 1], & d_{max} + 1 \leq d \leq d_{max} + d_p - 1, \end{cases}$$

Ուղիղ գումարման ալգորիթմի բարդությունը կլինի  $O(d_{max} d_p)$ :

Իմպուլսային կողավորման խնդրի լուծումը համարժեք է երկու վերջավոր  $u$  և  $p$  հաջորդականությունների արագ գծային փաթույթի (convolution) արդյունքին՝  $s = u * p$ : Այդ մեթոդը կիրառում է Ֆուրյեի արագ ձևափոխությունը (ՖԱՁ)՝ դրանով ապահովելով խնդրի քվադրատային՝  $O(N \log N)$  բարդությամբ լուծում: Փաթույթի ժամանակ մշակվող դիսկրետների քանակը կլինի  $N'_{rp} = 2^{\lceil \log_2(d_p + d_{max} - 1) \rceil}$ : Նկատի ունենալով, որ իրական

պայմաններում գործ ենք ունենում հազարավոր էլեմենտների հետ ավելի էֆեկտիվ է օգտագործել երկրորդ մեթոդը:

**Բաժին 2.5**-ում ներկայացված է խանգարումների և աղմուկների առաջարկվող դասակարգումը և դրան համապատասխան կատարված մոդելավորումը: Ինչպես նաև ներկայացված է կրողի տատանումների մոդելավորումը: Աղմուկների, խանգարումների և կրողի տատանումների առկայությունը պատճառ է հանդիսանում ստացվող թիրախային ազդանշանում փոլային սխալանքների առաջացման: Նմանակցում դրանց ներդրումը թույլ է տալիս ստուգել ՍՄՄ-ի աշխատանքը իրական մոտ պայմանների դեպքում:

Մոդելավորված են ջերմային և սարքավորումների սեփական աղմուկները, համակարգային, լայնշերտային, կենտրոնացված և պասիվ խանգարումները: Ներդրված են երկու տեսակի տատանումներ՝ եռանկյունաչափական ֆունկցիաների կամ պատահական օրենքով փոփոխվող:

**Բաժին 2.6**-ում բերված են երկրորդ գլխի վերաբերյալ եզրակացությունները և առաջարկված մոդելի համեմատությունը այլ նմանակիչների հետ: Եզրակացություններից բխող արդյունքները բերված են աղյուսակ 3-ում:

	<b>SAR Simulation Toolbox</b>	<b>SARSIM by STD Inc.</b>	<b>OpenSource SAR Simulator</b>	<b>Առաջարկված մոդելը</b>
Խանգարումների և աղմուկներ	չկա / կա	չկա / չկա	չկա / չկա	կա / կա
Կրողի տատանումներ	կա	կա	չկա	կա
Տարածության նկարագրություն	եռաչափ	եռաչափ	երկչափ	երկչափ և եռաչափ
Գեներացվող ազդանշանը	Spritemap, Spotlight	Spritemap, Spotlight	Spritemap	Spritemap
Տեղանքը նկարագրող մուտքային տվյալներ	օբյեկտների ցուցակ	DTED, DEM քարտեզներ	օբյեկտների ցուցակ	օբյեկտների ցուցակ, պատկեր

*Աղյուսակ 3. Մոդելի համեմատությունը այլ նմանակիչների հետ*

Ատենախոսության **երրորդ գլխում** ներկայացված են նմանակի ապարատա-  
ծրագրային համալիրի նախագծման հիմնադրույթները և գեներացված տվյալների  
փորձարկման կազմակերպումն ու ստացված արդյունքները:

**Բաժին 3.1**-ում նկարագրված է նմանակի ապարատա-ծրագրային համալիրի  
նախագծումը: Արագագործությունը ապահովելու համար օգտագործվել է NVIDIA  
վիդեոքարտ և CUDA զուգահեռ մշակման պլատֆորմը: Գեներացված թվային  
ազդանշանները անալոգայինի վերածելու համար ընտրված է Insys FM216x250MDA  
թվա-անալոգային ձևափոխիչը և օգտագործված է դրա ղեկավարման Deasy Tools  
ծրագրային փաթեթը: Տարբեր օպերացիոն համակարգերում աշխատելու համար  
ընտրվել է Qt մուլտիպլատֆորմ գրադարանը և միջավայրը:

Ելքային տվյալների տրամադրման համար մշակվել է երկու տարբերակ՝  
անդրադարձ և փաթեթ (անդրադարձերի խումբ) տրամադրող ռեժիմներ:

Նմանակման աշխատանքի հոսքը կարելի է բաժանել հետևյալ երեք փուլերի՝  
նախահաշվարկ, հաշվարկ և օգտագործում: Նախահաշվարկի և հաշվարկի փուլերը  
միասին կազմում են գեներացման փուլը: Գեներացված տվյալները կարող են  
օգտագործվել հետևյալ ձևերով՝ պահպանում հիշողության մեջ, փոխանցում ԹԱԶ-ին և  
ցուցադրում էկրանին:

ՍՄՄ-ին տվյալների փոխանցման համար մշակված են հետևյալ  
տարբերակները՝ անալոգային՝ մալուխի միջոցով, թվային՝ օպերատիվ հիշողության  
միջոցով և թվային՝ ֆայլով (աղյուսակ 4):

	Իրական պայմաններ	Մուտք/ելք պարզություն	Մուտք/ելք արագություն	Բազմակի օգտագործում
Անալոգային	+	-	+	-
Օպերատիվ հիշող.	-	+	+	-
Ֆայլ	-	+	-	+

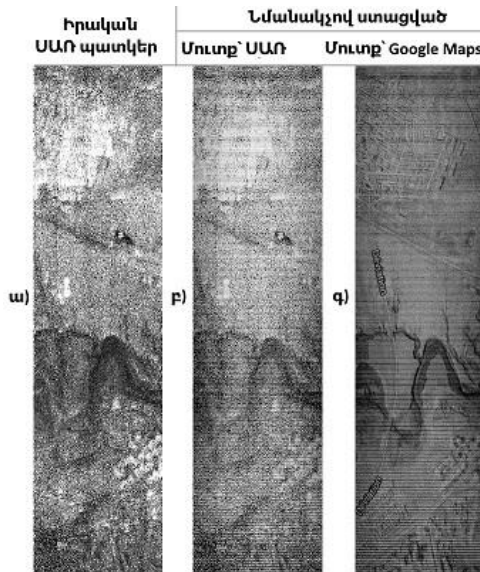
*Աղյուսակ 4. Նմանակիչ-ՍՄՄ տվյալների փոխանցման եղանակների համեմատություն*

**Բաժին 3.2**-ում մշակվել է ՍՄՄ-ի փորձնական տարբերակ: Այն նախատեսված  
է ստեղծված նմանակի աշխատանքը ստուգելու համար: Մշակված ՍՄՄ-ն կատարում է  
կիզակետված (focused) մշակում, որտեղ բաց են թողնված իրական աշխատանքային

պայմաններին հատուկ այնպիսի մշակման փուլեր ինչպիսիք են տվյալների կուտակումը, հաճախության փոփոխությունը, ազդանշանի փոփոխյին սխալանքների կոմպենսացիան:

**Բաժին 3.3**-ում կատարվել են թեստավորումներ փորձնական ՍՄՄ-ի հետ: Նմանակցով գեներացվել են ազդանշաններ տարբեր դեպքերի համար, որոնք այնուհետև մշակվել են փորձնական ՍՄՄ-ով:

Առանց աղավաղումների ազդանշանի մշակումից ստացվել է պատկեր, որը իրականից տարբերվել է 1.31%-ով: Աղմուկների առկայության դեպքում տարբերությունը կազմել է 3.12% և 7.89%՝ ազդանշան-աղմուկ հարաբերության համապատասխանաբար 2 և 1 արժեքների դեպքում: Կրողի տատանումների առկայության դեպքում մուտքային պատկերի վերականգնման սահմանային դեպք կարելի է համարել 50սմ ամպլիտուդով տատանումներով շարժումը, երբ տարբերությունը կազմել է 15.84% և 15.21%՝ ըստ բարձրության և թռիչքի ուղղությանը ուղղահայաց ուղղություններով համապատասխանաբար: Ավելի մեծ տատանումների դեպքում անհրաժեշտ է կիրառել ինքնակիզակետման (autofocus) ալգորիթմներ և ստուգել դրանց արդյունավետությունը:



Նկար 3. Իրական և նմանակցով գեներացված ազդանշաններով ձևավորված պատկերները

**Բաժին 3.4**-ում կատարվել է նմանակչի փորձարկում իրական ազդանշանների հետ, որոնք ստացվել են գործող անօդաչու թռչող սարքի (ԱԹՍ) վրա տեղակայված ՍԱՌ-ով: Նկար 3, ա-ում բերված է իրական թռիչքի արդյունքում ստացված ՍԱՌ պատկերը: Այն օգտագործելով՝ նմանակչով գեներացվել են իրական թռիչքին պայմաններին համապատասխան ազդանշաններ, որոնք այնուհետև մշակվել են գործող ԱԹՍ-ի ՍՄՄ-ով: Նմանակչի ազդանշանով ձևավորված (նկար 3, բ) և իրական ՍԱՌ պատկերի տարբերությունը կազմել է 7.04%: Նմանատիպ փորձ է կատարվել՝ օգտագործելով Google Maps արբանյակային քարտեզի տվյալ տեղանքի պատկերը: Այս դեպքում (նկար 3, գ) իրական ՍԱՌ պատկերի հետ տարբերությունը կազմել է 29.78%:

**Բաժին 3.5**-ում բերված են երրորդ գլխի վերաբերյալ եզրակացությունները և մշակված համալիրի համեմատությունը այլ նմանակիչների հետ (աղյուսակ 5):

	<b>SAR Simulation Toolbox</b>	<b>SARSIM by STD Inc.</b>	<b>OpenSource SAR Simulator</b>	<b>Առաջարկված մոդելը</b>
Արագագործություն	դանդաղ, Matlab	արագ, GPU	միջին, CPU	արագ, GPU
Խանգ. և աղմուկներ	չկա / կա	չկա / չկա	չկա / չկա	կա / կա
Անալոգ. ազդանշաններ	չկա	չկա	չկա	կա

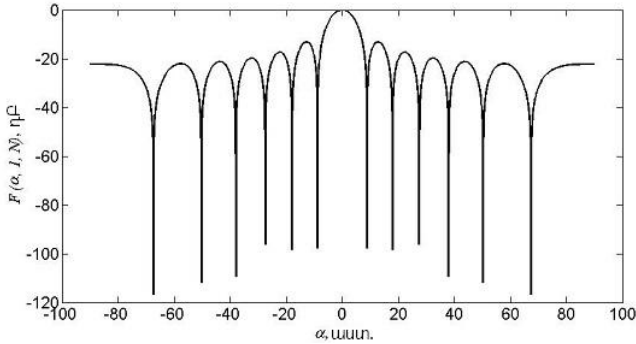
*Աղյուսակ 5. Նմանակչի համալիրի համեմատությունը այլ նմանակիչների հետ*

Ատենախոսության **չորրորդ գլխում** ներկայացված է ակտիվ խանգարումների հանդեպ կայունության ապահովման առաջարկվող մեխանիզմը:

**Բաժին 4.1**-ում քննարկվել են ՌԷՊ պայմաններում ՍԱՌ-ի կայուն և էֆեկտիվ աշխատանքի կարևորությունը, դրան հասնելու մեխանիզմները: Այդպիսի միջոցներից է անտենայի ուղղվածության դիագրամում (ՈւԴ) որոշակի ուղղությամբ փոքր ընդունման գործակցի (անկման, գրոյի) ստացումը:

**Բաժին 4.2**-ում քննարկվել են ՈւԴ-ում անկումների ձևավորման գոյություն ունեցող եղանակները և ներկայացվել է մշակված մեթոդը:  $N$  քանակությամբ նույնական, հավասարահեռ ճառագայթիչներից բաղկացած անտենային ցանցի (antenna array) ուղղվածության դիագրամը ունի նկար 4-ում բերված տեսքը և որոշվում է հետևյալ բանաձևով՝

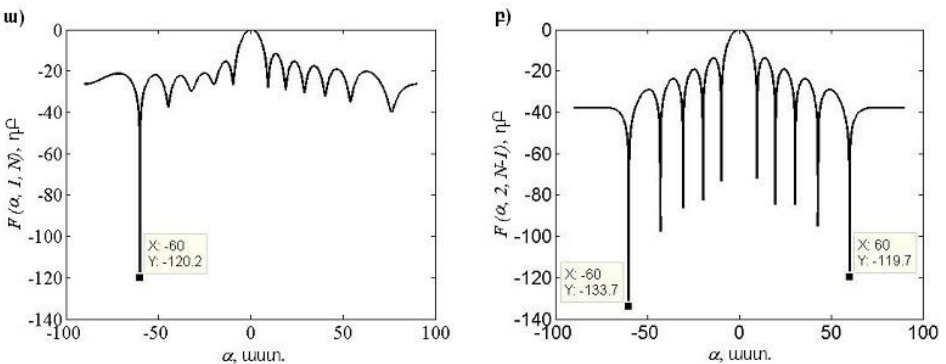
$$F(\alpha) = \sum_{n=1}^N I_n \cdot e^{ikd(n-1-\frac{N-1}{2})\sin\alpha}$$



Նկար 4. Գծային անտենային ցանցի ուղղվածության դիագրամի նախնական տեսքը

Մշակված մեթոդը թույլ է տալիս ձևավորել խանգարումային պայմանների համար նախատեսված հատուկ տեսքի ուղղվածության դիագրամներ: Համապատասխան անկման ստացման համար օգտագործվում են մեկ կամ երկու կարգավորվող քաշային գործակիցներ:

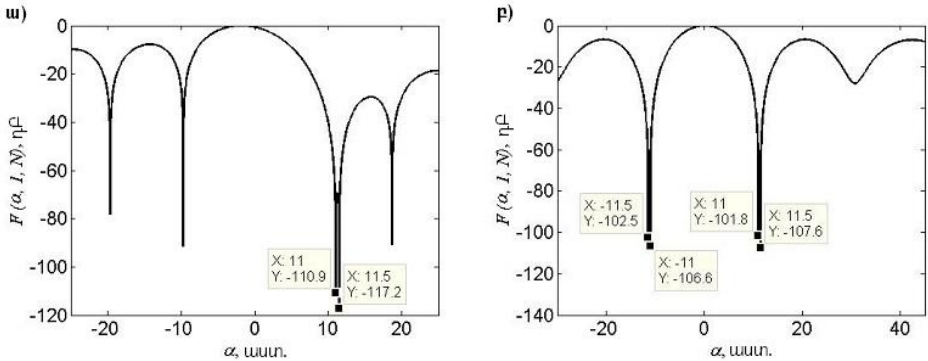
**Բաժին 4.3**-ում դիտարկվել է մեկ կարգավորող գործակցի օգտագործմամբ մեկ ուղղությամբ (նկար 5, ա) կամ կենտրոնի հանդեպ սիմետրիկ ուղղություններով անկումների ձևավորումը (նկար 5, բ): Նկար 5-ում բերված օրինակում կատարվել է  $60^\circ$  ուղղությամբ անկման ձևավորում, որը մինչ այդ ունեցել է  $-20$  դԲ մակարդակ:



Նկար 5. Մեկ կարգավորող գործակցով ձևավորված անկումներ  
ա) մեկ ուղղությամբ, բ) սիմետրիկ ուղղություններով



**Բաժին 4.4**-ում դիտարկվել է երկու կարգավորող գործակցի օգտագործմամբ մեկ ուղղությամբ ինտերվալի ճնշումը (նկար 6, ա) կամ կենտրոնի հանդեպ սիմետրիկ ուղղություններով ինտերվալների ճնշումը (նկար 6, բ): Կատարվել են փորձարկումներ  $0.25^\circ$  և  $0.5^\circ$  լայնությամբ տեղանքներ ճնշելու: Նկար 6-ում բերված է  $11.5^\circ$  ուղղությամբ և  $0.5^\circ$  լայնությամբ ինտերվալի ճնշումը:



Նկար 6. Երկու կարգավորող գործակիցներով ձևավորված անկումներ ա) մեկ ինտերվալի, բ) սիմետրիկ ուղղություններով ինտերվալների

**Բաժին 4.5**-ում բերված են չորրորդ գլխի վերաբերյալ եզրակացությունները, ըստ որի մշակված մեթոդը օգտագործում է անտենայի մեկ կամ երկու կարգավորվող էլեմենտ: Այն ապահովում է կողային թերթիկների ճնշման բավականաչափ բարձր՝ մինչև  $-120$ դԲ մակարդակ: Սա հնարավորություն է ընձեռում ճնշել ռադարային համակարգի վրա գործադրվող ակտիվ խանգարումները՝ փոփոխելով ուղղվածության դիագրամի տեսքը:

### ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ՀԻՄՆԱԿԱՆ ԱՐԴՅՈՒՆՔՆԵՐԸ

- Մշակվել է ՍԱՌ-ում ընդունվող ազդանշանների նմանակիչ, որում ներդրված է աղմուկների և խանգարումների հիմնական տեսակների դասակարգման նոր տարբերակ [1, 2, 3]:
- Նախագծվել է ՍԱՌ նմանակիչ ապարատա-ծրագրային համալիր, որը հնարավորություն է տալիս իրական ժամանակում գեներացնել ՍԱՌ-ում մշակվող

ազդանշաններ և ապահովել մշակման համակարգի հետ համատեղ աշխատանքի կազմակերպումը [3, 4]:

- Կատարվել են մշակված համալիրի թեստավորումներ՝ փորձնական և իրական ՍԱԴ համակարգերի համար: Փորձարկման արդյունքներից հետևում է, որ նմանակցով ստացված տվյալները կարող են օգտագործվել իրական թռիչքներից ստացված ազդանշանների փոխարեն [4]:
- Մշակվել է անտենային ցանցի ուղղվածության դիագրամում անկումների ձևավորման մեթոդ, որը հնարավորություն է տալիս անկումը ձևավորել՝ օգտագործելով ծրագրային ու սարքային սակավ միջոցներ [5]:

#### ՀՐԱՏԱՐԱԿՎԱԾ ԱՇԽԱՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ

- [1] Тадевосян А.С., Маргарян Д.А., Маркосян М.В. "Один вариант классификации радиолокационных помех и организация их подавления Сообщение 1: Классификация радиолокационных помех и их симуляция". Вестник Инженерной академии Армении, 2013 Т. 10 №4 сс. 732-739.
- [2] Тадевосян А.С., Маргарян Д.А., Маркосян М.В. "Один вариант классификации радиолокационных помех и организация их подавления Сообщение 2: Подавления радиолокационных помех". Вестник Инженерной академии Армении, 2014 Т. 11 №2 сс. 334-341.
- [3] Тадевосян А.С., Маркосян М.В. "Имитационная модель эхосигналов для радара с синтезированной апертурой на основе входного изображения", Сборник научных статей, Международный научно-образовательный центр, НАН РА, Зангак, 2015, сс. 175-185.
- [4] Tadevosyan A.S. "Realtime SAR simulator design". Proceedings of Computer Science and Information Technologies conference, 2015, pp. 312-317.
- [5] Тадевосян А.С., Саргсян В.Г., Петросян А.И. "Синтез нулей диаграммы направленности линейной антенной решетки", журнал Антенны №1, Радиотехника, Москва, 2017, сс. 3-13.

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИМИТАЦИИ  
ЭХО-СИГНАЛОВ ДЛЯ РАДАРА С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ

**РЕЗЮМЕ**

Радары с синтезированной апертурой (РСА) имеют важное значение для дистанционного зондирования, геономии и для систем наблюдения. РСА использует обработку сигналов для синтеза более длинной антенны или апертуры. Он может эффективно работать в суровых погодных условиях и получать изображения с высоким разрешением. Системы РСА способны получить изображение местности даже в облачных условиях, поскольку длина волны радара больше, чем у видимого света. Следовательно, можно избежать влияния облаков и получить отражение от местности с малыми искажениями.

Генерация эхо-сигналов является ключевым звеном в исследованиях и разработках систем РСА. Для утверждения того, что спроектированные системы РСА удовлетворяют конкретные требования при разных условиях, генерирование необработанных эхо-сигналов должно быть выполнено до разработки систем РСА. Таким образом, генерация эхо-сигналов является важным компонентом технологии проектирования систем РСА. Инструмент выполняющий генерацию эхо-сигналов РСА называется имитатором РСА.

Были разработаны разные РСА имитаторы. После изучения и анализа этих систем можно прийти к выводу, что нет таких имитаторов для генерации эхо-сигналов, которые дают возможность разрабатывать и тестировать системы формирования радиолокационных изображений без реальных полетов.

**Цель исследования**

Целью диссертации является создание имитатора генерирования эхо-сигналов для радара с синтезированной апертурой, который позволит разрабатывать систему формирования РСА изображения с использованием меньших ресурсов и времени, а также проверить работу уже существующих систем.

Одной из целевых задач научного труда является, также разработка вспомогательных средств для эффективной работы РСА систем в условиях применения активных помех, в частности разработка метода для формирования провала в диаграмме направленности с использованием меньших аппаратных и программных средств.

## **Научная новизна**

- Построена имитационная модель генерации эхо-сигналов РСА.
- Разработана аппаратно-программная система имитатора РСА, которая может в реальном времени сгенерировать и в разных режимах выдавать цифровой или аналоговый сигнал.
- Разработан метод, обеспечивающий стабильность РСА систем при наличии активных помех.

## **Практическая значимость исследования**

Полученные результаты могут быть использованы для дистанционного исследования и обеспечения безопасности местностей, представляющих интерес. РСА имитатор может быть использован как при разработке РСА систем, так и для противодействия других РСА систем.

## **Результаты**

- Разработана модель имитатора эхо-сигналов РСА, где внедрен новый вариант классификации помех и шумов.
- Разработан аппаратно-программный комплекс имитатора РСА, который генерирует данные в реальном времени и обеспечивает совместную работу с системой обработки РСА.
- Были проведены тестирования имитатора с промежуточной и реальной системами РСА. От результатов следует, что имитатор может быть использован вместо сигналов, полученных от реальных полетов.
- Разработан метод формирования провалов в диаграмме направленности линейной антенной решетки, который позволяет получить глубокие нули с использованием меньших аппаратных и программных средств.

Artur Tadevosyan

DEVELOPMENT OF MODELING AND ECHO SIGNAL  
SIMULATION METHODS FOR SYNTHETIC APERTURE RADAR

**ABSTRACT**

Synthetic aperture radar (SAR) plays a significant role in the remote sensing, geosciences, and surveillance applications. The basic concept of SAR is to use signal processing to generate the result of a longer antenna. It can effectively operate in severe weather conditions and achieve high-resolution images. SAR is able to work through cloudy environments because of the longer wavelength of the radar in comparison to visible light. Hence, it reduces the scattering effect of clouds, leaving the reflected wave relatively undistorted.

SAR echo signal generation technology is a key ring in the research and development of SAR system. To ensure that designed SAR systems satisfy the specific requirements of the different users, raw echo signal generation should be carried out before the development of the SAR systems. Therefore, the SAR raw signal generation is a significant component of the SAR system development. The SAR echo signal generation performing tool is called SAR simulator.

The various types of SAR simulators were developed. After studying and analyzing these systems, one can come to the conclusion that there are no simulators for generating echo signals capable of enabling the development and testing of radar imaging systems without real flights.

**The Main Objective**

The aim of this thesis is to create a simulator for generating echo signals for synthetic aperture radar that will allow to develop a SAR image formation system using less resources and time, as well as check the operation of existing systems.

One of the tasks of the research is to develop auxiliary tools for the efficient operation of SAR systems in active jamming conditions, in particular, the development of a null forming method in the sidelobe of the radiation pattern by using less devices and programming commands.

**Scientific Novelty**

- The simulator model for SAR echo signal generation is built.
- A computer appliance of SAR simulator is developed, which can generate data in real time and transfer digital or analog signals in different modes.
- A method has been developed to ensure the stability of SAR systems in active jamming conditions.

### **Practical significance of the research**

The obtained results can be used for remote sensing as well as in ensuring the safety of the areas of interest. The SAR simulator can be used both in the development of SAR systems and in countering the SAR systems of the enemy.

### **Results of the research**

- A simulation model for SAR echo signal generation has been developed, where a new version of the classification of noise and jammers is introduced.
- The computer appliance for SAR simulator is developed, which generates real-time data and supports cooperative work with the SAR system.
- The simulator tests were done by temporary and real SAR systems. The results show that the simulator can be used instead of signals received during real flights.
- A method for forming nulls in the radiation pattern of a linear antenna array have been developed, which allows to form deep nulls by using less devices and programming commands.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'P. M. ...', located in the lower right quadrant of the page.