

ԵՐԵՎԱՆԻ ՊԵՏԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

ՖԻԶԻԿԱՅԻ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ

ԿԻՐԱՌԱԿԱՆ ԷԼԵԿՏՐՈՂԻՆԱՄԻԿԱՅԻ ԵՎ ՍՈՂԵԼԱՎՈՐՄԱՆ  
ԱՍԲԻՈՆ

ՌԱԴԻՈՖԻԶԻԿԱ ԿՐԹԱԿԱՆ ԾՐԱԳԻՐ

Սիմոնյանց Դավիթ Վաչեի

## ԱՎԱՐՏԱԿԱՆ ԱՇԽԱՏԱՆՔ

Անտենաների թերությունների և ճառագայթվող  
Էլեկտրամագնիսական դաշտի հետազոտումը  
ջերմաառաձգական օպտիկական ինդիկատորով  
մանրադիտակի օգնությամբ

«Ռադիոֆիզիկա» մասնագիտությամբ ֆիզիկայի բակալավրի  
որակավորման աստիճանի հայցման համար

ԵՐԵՎԱՆ 2023

**Ուսանող՝** \_\_\_\_\_  
ստորագրություն

Սիմոնյանց Դավիթ  
\_\_\_\_\_   
ազգանուն, անուն

**Ղեկավար՝** \_\_\_\_\_  
ստորագրություն

Ֆ. մ. գ. դ., պրոֆեսոր, Բաբաջանյան Արսեն  
\_\_\_\_\_   
գիտ. աստիճան, կոչում, ազգանուն, անուն

**«Թույլատրելի պաշտպանության»**

**Ամբիոնի վարիչ՝** \_\_\_\_\_  
ստորագրություն

Ֆ. մ. գ. դ., պրոֆեսոր, Բաբաջանյան Արսեն  
\_\_\_\_\_   
գիտ. աստիճան, կոչում, ազգանուն, անուն

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023թ.

Այս աշխատանքում հետազոտվել են անտենայի ճառագայթված էլեկտրամագնիսական դաշտերը ջերմաառաձգական օպտիկական ինդիկատորով մանրադիտակի (ՋԱՕԻՄ) օգնությամբ: Այս աշխատանքի նպատակն է ուսումնասիրել անտենաների վարքը և դրանց հնարավոր թերությունների ազդեցությունը անտենաների աշխատանքի վրա, ինչպես նաև ուսումնասիրել ՋԱՕԻՄ-ի օգնությամբ անտենայի ճառագայթված էլեկտրամագնիսական դաշտի տարածական բաշխվածությունը հետազոտելու հնարավոր եղանակները և դրանց առավելությունները: Հետազոտությունը իր մեջ ներառում է փորձ, որում ՋԱՕԻՄ-ի հիման վրա հատուկ փորձարարական ստենդով չափվել է ալիքատարային անտենայի ճառագայթված էլեկտրամագնիսական դաշտի մագնիսական բաղադրիչի բաշխվածությունը: Փորձը կրկնվել է երեք անգամ, ալիքատարում տարբեր մուտքային հզորությամբ, 6-14 ԳՀց հաճախային տիրույթում էլեկտրամագնիսական ալիքների գեներացումների դեպքում: Ալիքատարով անցկացվել են ինչպես իր աշխատանքային տիրույթում ընկած հաճախություններով էլեկտրամագնիսական ալիքներ, այնպես էլ դրանից դուրս: Փորձի արդյունքները ցույց տվեցին, որ ՋԱՕԻՄ-ի միջոցով հնարավոր է մեծ լուծունակությամբ և բարձր ջերմային զգայունությամբ չափել անտենայի ճառագայթած դաշտի բաշխվածությունը: Արդյունքներում պարզ արտահայտվում են դաշտի առանձահատկությունները և դրանց փոփոխման վարքը ալիքատարային անտենայի աշխատանքային տիրույթում և տիրույթից դուրս ճառագայթումների դեպքում: Այս հետազոտությունը նոր եղանակներ է առաջ քաշում անտենաների ճառագայթվող դաշտերի չափման, ուսումնասիրման, թերությունների հայտնաբերման համար, ինչը կարող է բերել այդ թերությունների շտկման, անտենաների օպտիմիզացման և անյար հեռահաղորդակցության ոլորտի զարգացման:

# Բովանդակություն

Ներածություն . . . . .	5
1 Փորձի նկարագրությունը . . . . .	7
1.1 ՋԱՕԻՄ-ի կառուցվածքը . . . . .	7
1.2 Ջերմային բաշխվածության արտապատկերումը . . . . .	8
1.3 Էլեկտրամագնիսական դաշտի կորուստները . . . . .	11
1.4 Տվյալների հավաքագրումը և վերամշակումը . . . . .	13
1.5 Ալիքատարային անտենայի հետազոտումը . . . . .	15
2 Փորձի արդյունքները . . . . .	18
2.1 Ինտենսիվության կախումը հաճախությունից . . . . .	18
Եզրակացություն . . . . .	22
Գրականություն . . . . .	23

## Ներածություն

Անտենաների գործունեությունը կարևոր դեր ունի ժամանակակից հեռահաղորդակցման բազմաթիվ ոլորտներում՝ անլար ցանցերից մինչև արբանյակային կապեր: Էլեկտրամագնիսական ալիքների ճշգրիտ և էֆեկտիվ հաղորդումը կարևոր նշանակություն ունի անտենաների ճիշտ աշխատանքի համար: Միևնույն ժամանակ անտենայում հայտնվող թերությունները կարող են բերել դրանց աշխատանքի սխալ կատարման և ազդանշանների կորուստի կամ աղավաղման, ինչի արդյունքում նվազում է անտենայի հաղորդակցման տիրույթը և հուսալիությունը: Ուստի անտենաների ճառագայթած Էլեկտրամագնիսական դաշտերի հետազոտումը և հնարավոր դեֆեկտների հայտնաբերումը կարևոր նշանակություն ունի հեռահաղորդակցման ոլորտում:

Այս խնդրին և նմանատիպ այլ խնդիրներին լուծումներ են առաջարկվել հիմնված տարատեսակ ֆիզիկական երևույթների վրա: Դրանցից օրինակ են սկանավորող ջերմային մանրադիտումը (Scanning thermal microscopy (SThM)), մերձադաշտային օպտիկական մանրադիտումը (Near-field scanning optical microscopy (NSOM)) կամ այլ սկանավորման տեխնիկայի վրա հիմնված լուծումներ: Չնայած նրան, որ սկանավորման տեխնիկան ունի տասնյակ նանոմետրերի հասնող բարձր տարածական լուծունակություն [1], նրա գործողության երկար ժամանակը իր գլխավոր թերություններից է և հնարավորություն չի թողնում կատարել ժամանակից կախված չափումներ: Բացի դրանից, սկանավորման տեխնիկան պահանջում է թանկարժեք և դժվար հասանելի նյութեր և սարքավորումներ և չափումների խիստ պայմաններ: Մասնավորապես SThM-ը նաև պահանջում է հպում չափվող նմուշի հետ, ինչը բերում է նմուշի ջերմահաղորդականության հետևանքով ջերմային բաշխվածության չափման սխալանքների:

Վերջին տարիներում առաջացել և զարգացել է ջերմաառաձգական օպտիկական ինդիկատորով մանրադիտակի (ՉԱՕԻՄ) վրա հիմնված, տարբեր նյութերում և սարքերում ջերմային և մեխանիկական հատկությունների հետազոտումը՝ բարձր զգայունությամբ և տարածական լուծունակությամբ: ՉԱՕԻՄ-ը սարք է, որը հնարավորություն է տալիս հետազոտել Էլեկտրամագնիսական կամ ջերմային ճառագայթման աղբյուր հանդիսացող սարքերից ճառագայթվող Էլեկտրամագնիսական դաշտերը կամ ջերմային բաշխվածությունները: Այն օգտագործվում է բազմաթիվ սարքերի, օրինակ՝ Էլեկտրոսխեմաների, հիշասարքերի, բարձր կամ ցածր հաճախային ֆիլտրերի ճառագայթման հետազոտման, այդ սարքերում ճառագայթման վրա ազդեցություն թողած

թերությունների հայտնաբերման համար:

ՉԱՕԻՄ-ի աշխատանքի սկզբունքը կայանում է նրանում, որ նրա ինդիկատորը կլանում է էլեկտրամագնիսական կամ ջերմային ճառագայթումը, վերածելով այն ջերմության: Ինդիկատորում առաջացած ջերմությունը նրա մեջ առաջացնում է ջերմամեխանիկական լարումներ, որոնց բաշխվածությունները չափվում են ֆոտոէլաստիկ երևույթների վրա հիմնված եղանակով: Չափումներից վերականգնվում է ինդիկատորում ջերմային բաշխվածությունը: Համապատասխան հատկություններով ինդիկատոր ընտրելու դեպքում, եթե ջերմության պատճառը էլեկտրամագնիսական դաշտն էր, ապա վերականգնված ջերմային բաշխվածությունը նկարագրում է ինդիկատորում առաջացած էլեկտրամագնիսական դաշտը:

ՉԱՕԻՄ-ի միջոցով չափված ինտենսիվության կամ ջերմության բաշխվածությունը ունենում է բավականին բարձր տարածական լուծունակություն և ջերմային զգայունություն: Ի տարբերություն սկանավորման տեխնիկայի, ՉԱՕԻՄ-ի համար պահանջվող նյութերն ու սարքերը օրինակ՝ սովորական ապակին, CCD (charge-coupled device) տեսախցիկը կամ բևեռացրած լույսի միկրոսկոպը, հեշտ հասանելի են և ոչ թանկ: Ինչպես նաև ՉԱՕԻՄ-ի արագ աշխատանուկայությունը հնարավորություն է տալիս ժամանակից կախված չափումներ իրականացնել: ՉԱՕԻՄ-ի այս հատկությունները, ինչպես նաև չափումների պարզությունը նրան դարձնում են անտենաների ճառագայթվող էլեկտրամագնիսական դաշտերի հետազոտման համար հարմար և գրավիչ միջոց:

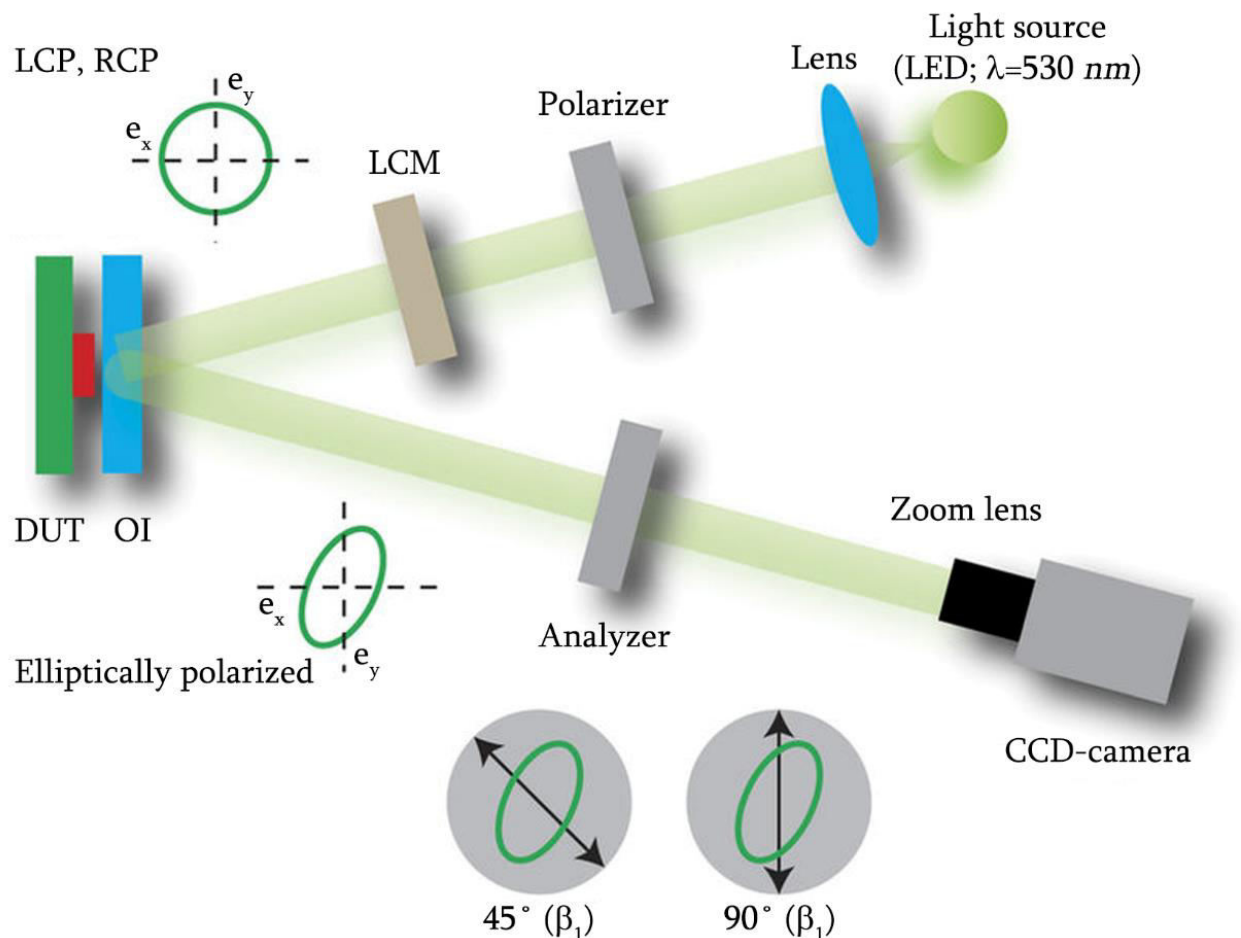
Այս աշխատանքի նպատակն է ցույց տալ, թե ինչպես է հնարավոր ՉԱՕԻՄ-ի օգնությամբ բարձր լուծունակությամբ և ջերմային զգայունությամբ արտապատկերել և ուսումնասիրել ալիքատարային անտենայի ճառագայթած էլեկտրամագնիսական դաշտը: Ներկայացվելու է ՉԱՕԻՄ համակարգի աշխատանքի սկզբունքը և այն օգտագործող փորձի նկարագրությունը: Վերջում ներկայացվելու են փորձի արդյունքները և քննարկումները:

Անտենայի ճառագայթած էլեկտրամագնիսական դաշտի ուսումնասիրությունը ջերմաառաձգական օպտիկական ինդիկատորով մանրադիտակի օգնությամբ հնարավորություն կարող է ընձեռնել բարելավել անտենաների աշխատունակությունը և հուսալիությունը: Այս ուսումնասիրությունը կարող է բերել բարելավված նոր անտենաների նախագծերի մշակման և գոյություն ունեցող անտենաների բարելավման:

# 1 Փորձի նկարագրությունը

## 1.1 ՉԱՕԻՄ-ի կառուցվածքը

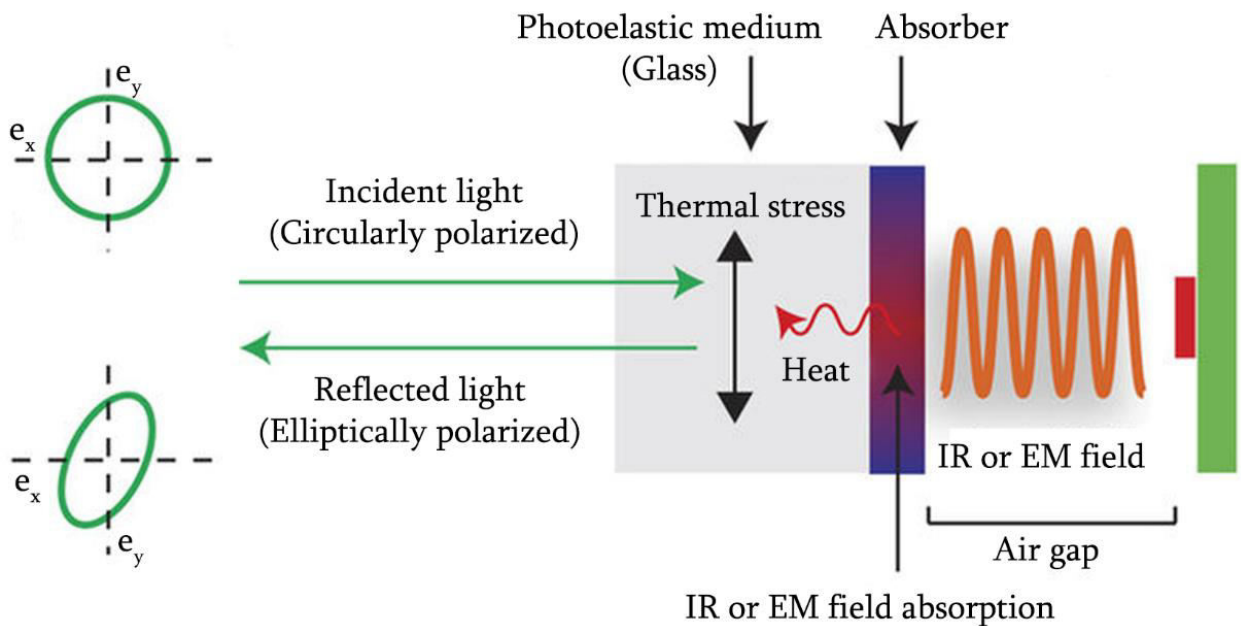
Նկ. 1-ում պատկերված է ՉԱՕԻՄ-ի փորձարարական սխեման [3]: Հետազոտվող սարքի վրա տեղադրված է օպտիկական ինդիկատոր, որը իրենից ներկայացնում է ջերմային կամ էլեկտրամագնիսական ճառագայթում կլանող նանոմետրական շերտով ապակի: Սովորական LED-ից ինդիկատորի վրա ընկած է լույս, որը սկզբից անցնում է հարթ բևեռացուցչով, այնուհետև անցնում է հեղուկ-բյուրեղային մոդուլյատորով և ձեռք բերում շրջանային բևեռացում: Շրջանային բևեռացած լույսն ընկնելով ինդիկատորի վրա, կլանիչ շերտից անդրադառնալով անցնում է վերլուծիչով և նրա բևեռականության փոփոխությունները գրանցվում են CCD տեսախցիկով:



Նկ. 1: Փորձի սկզբունքային սխեման

Ինչպես պատկերված է նկ. 2-ում, կախված շերտի նյութի հատկություններից, ինդիկատորը կարող է կլանել ջերմային ճառագայթում կամ իր ներսում էլեկտրամագնիսական ճառագայթումը

կլրի ջերմային կորուստներ: Կլանող շերտում առաջացած ջերմությունը տարածվում է իր ամբողջ ջերմաէլաստիկ միջավայրով և նրանում առաջացնում է ջերմամեխանիկական լարումներ: Ջերմամեխանիկական լարումների պատճառով ինդիկատորի վրա ընկած շրջանային բևեռացված լույսը, կախված իր դիրքում լարվածության առանցքի կողմնորոշումից, կլանող շերտի միջավայրում կփոխի իր բևեռացվածությունը Էլիպտիկի: Այս երևույթը հայտնի է որպես Ֆոտոէլաստիկ երևույթ: Այնուհետև  $0^\circ$  և  $45^\circ$  աստիճան կողմնորոշմամբ վերլուծիչից անցած լույսի ինտենսիվությամբ կարելի է չափել հետազոտվող սարքի պատճառով օպտիկական ինդիկատորում առաջացած գծային երկբեկման փոփոխությունը:



Նկ. 2: Ինդիկատորում կլավնած ջերմային կամ էլեկտրամագնիսական ճառագայթումից առաջացած ջերմամեխանիկական լարումների պատճառով շրջանային բևեռացրած լույսի վերափոխումը Էլիպտիկ բևեռացվածի:

## 1.2 Ջերմային բաշխվածության արտապատկերումը

Գտնենք ջերմամեխանիկական լարման կապը նորմալ և սահքի լարումներով պայմանավորված գծային երկբեկման բաշխվածությունների հետ: Նկ. 3-ում օպտիկական սարքերից յուրաքանչյուրի համար Ջոնի մատրիցը տրվում է հետևյալ կերպ՝

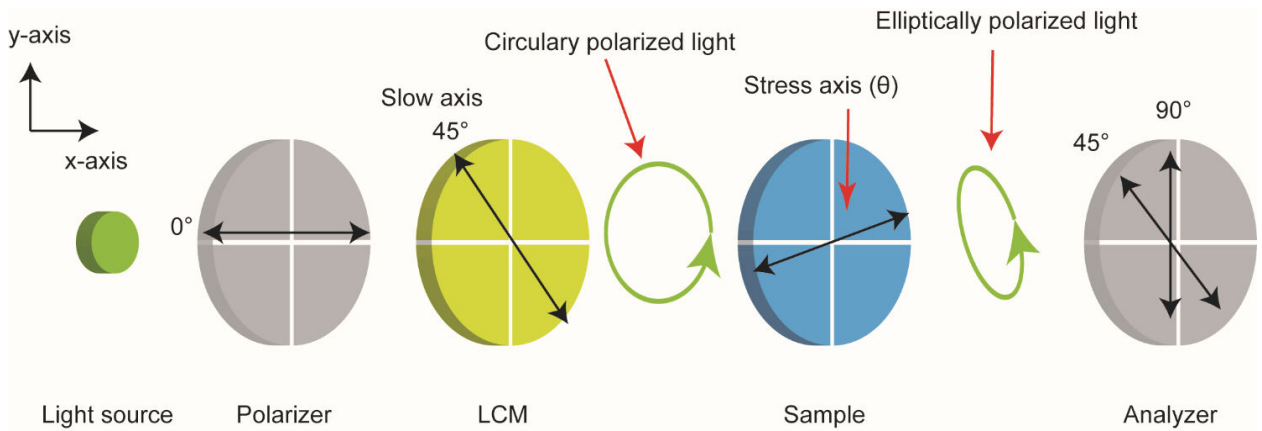
$$J_p = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, J_{LCM} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} e^{i\frac{\delta}{2}} + e^{-i\frac{\delta}{2}} & e^{i\frac{\delta}{2}} - e^{-i\frac{\delta}{2}} \\ e^{i\frac{\delta}{2}} - e^{-i\frac{\delta}{2}} & e^{i\frac{\delta}{2}} + e^{-i\frac{\delta}{2}} \end{pmatrix}, J_A = \begin{pmatrix} \cos^2 \phi & \cos \phi \sin \phi \\ \cos \phi \sin \phi & \sin^2 \phi \end{pmatrix}, \quad (1)$$



որտեղ՝  $\delta$ -ն հեղուկ-բյուրեղային մոդուլյատորի գծային երկբեկումն է, իսկ  $\phi$ -ն վերլուծող բևեռացուցիչի և  $x$  առանցքի հետ կազմած անկյունը: Գծային և շրջանային փոխադարձելիության և շրջանային երկբեկման պայմաններում ինդիկատորի համար Ջոնի մատրիցը կրնալ հետևյալ տեսքը [2]՝

$$J_s = \begin{pmatrix} e^{i\beta} \cos^2 \theta + e^{-i\beta} \sin^2(\theta) & (e^{i\beta} - e^{-i\beta}) \cos \theta \sin \theta \\ (e^{i\beta} - e^{-i\beta}) \cos \theta \sin \theta & e^{i\beta} \cos^2 \theta + e^{-i\beta} \sin^2(\theta) \end{pmatrix}, \quad (2)$$

որտեղ՝  $\beta$ -ն ինդիկատորում ջերմամեխանիկական լարումներից առաջացած գծային երկբեկումն է, իսկ  $\theta$ -ն՝ լարման սկզբունքային առանցքի և վերլուծող բևեռացուցիչի կազմած անկյունը:



Նկ. 3: Փորձում օգտագործվող օպտիկական բաղադրիչների անկյունային կողմնորոշումները:

CCD տեսախցիկին ընկնող լույսի ինտենսիվությունը կորոշվի հետևյալ բանաձևով՝

$$I = \frac{E_i^2}{4} (|A|^2 \cos^2 \phi + |B|^2 \sin^2 \phi + (A^* B + A B^*) \cos \phi \sin \phi), \quad (3)$$

որտեղ՝  $E_i$ -ն ընկնող լույսի էլեկտրական դաշտի լայնույթն է, իսկ  $A$ -ն ու  $B$ -ն ներկայացվում են հետևյալ կերպ՝

$$A = j_1 \delta_+ + j_2 \delta_-, \quad B = j_2 \delta_+ + j_1 \delta_-, \quad (4)$$

$$j_1 = e^{i\beta} \cos^2 \phi + e^{-i\beta} \sin^2 \phi, \quad j_2 = (e^{i\beta} - e^{-i\beta}) \cos \phi \sin \phi, \quad (5)$$

$$\delta_+ = e^{i\frac{\delta}{2}} + e^{-i\frac{\delta}{2}}, \quad \delta_- = e^{i\frac{\delta}{2}} - e^{-i\frac{\delta}{2}}, \quad (6)$$

Հաշվի առնելով (3)-(6) բանաձևերը և անկման լույսի շրջանային բևեռացվածությունը, CCD տեսախցիկին հասնող լույսի ինտենսիվության

համար ունենք՝

$$I_{\phi=\pi/2, \delta=-\pi/2} = \frac{E_i^2}{2}(1 - \sin 2\beta \sin 2\theta), \quad I_{\phi=\pi/2, \delta=\pi/2} = \frac{E_i^2}{2}(1 + \sin 2\beta \sin 2\theta), \quad (7)$$

$$I_{\phi=\pi/4, \delta=-\pi/2} = \frac{E_i^2}{2}(1 - \sin 2\beta \cos 2\theta), \quad I_{\phi=\pi/4, \delta=\pi/2} = \frac{E_i^2}{2}(1 + \sin 2\beta \cos 2\theta), \quad (8)$$

$\beta$ -ի փոքր անկյունների դեպքում՝

$$\beta_1 = \frac{1}{2} \frac{I_{\phi=\pi/4, \delta=\pi/2} - I_{\phi=\pi/4, \delta=-\pi/2}}{I_{\phi=\pi/4, \delta=\pi/2} + I_{\phi=\pi/4, \delta=-\pi/2}} \approx \beta \cos 2\theta, \quad \beta_2 = \frac{1}{2} \frac{I_{\phi=\pi/2, \delta=\pi/2} - I_{\phi=\pi/2, \delta=-\pi/2}}{I_{\phi=\pi/2, \delta=\pi/2} + I_{\phi=\pi/2, \delta=-\pi/2}} \approx \beta \sin 2\theta \quad (9)$$

Ենթադրվում է, որ ջերմամեխանիկական լարումները բնութագրվում են երկչափ թենզորով, քանի որ ինդիկատորի նանոմետրական շերտի չափը երրորդ չափողականությամբ անհամեմատ փոքր է մյուս երկու ուղղությամբ չափումներից: Մեխանիկական թենզորի համար ունենք՝

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_1 \cos^2 \theta + \sigma_2 \sin^2 \theta & (\sigma_1 - \sigma_2) \cos \theta \sin \theta \\ (\sigma_1 - \sigma_2) \cos \theta \sin \theta & \sigma_1 \cos^2 \theta + \sigma_2 \sin^2 \theta \end{pmatrix}, \quad (10)$$

որտեղ՝  $\sigma_1$ -ը և  $\sigma_2$ -ը մեխանիկական լարումների սկզբունքային առանցքներն են: (9) և (10) բանաձևերից կատանանք կապը գծային երկբեկման և մեխանիկական լարման միջև՝

$$\beta_1 = \frac{2\pi d S}{\lambda}(\sigma_{xx} - \sigma_{yy}), \quad \beta_2 = \frac{2\pi d S}{\lambda} 2\sigma_{xy}, \quad (11)$$

որտեղ՝  $S$ -ը լարման օպտիկական հաստատունն է,  $\lambda$ -ն ընկնող լույսի ալիքի երկարությունն է, իսկ  $d$ -ն ինդիկատորի հաստությունն է:

Գտնենք կապը ջերմային բաշխման և մեխանիկական լարման միջև: Հարթությամբ ազդող ուժերի դեպքում ջերմային լարումները կարելի է ներկայացնել հետևյալ բանաձևերով [4]՝

$$\sigma_{xx} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + CT, \quad \sigma_{yy} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + CT, \quad \sigma_{xy} = -\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial y}, \quad C = \frac{\alpha E}{1 - 2\nu}, \quad (12)$$

որտեղ  $T$ -ն ջերմաստիճանային բաշխվածությունն է,  $\alpha$ -ն ջերմային ընդարձակման գործակիցն է,  $\nu$ -ն Պուասոնի գործակիցն է,  $E$ -ն Յունգի մոդուլն է, իսկ  $\Phi$ -ն լարման ֆունկցիան է և բավարարում է հետևյալ

հավասարմանը՝

$$\nabla^4 \Phi = -\frac{\alpha E}{1-\nu} \nabla^2 T, \quad (13)$$

(12)-ից կստանանք՝

$$-\frac{\partial(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})}{\partial x} - 2\frac{\partial\sigma_{xy}}{\partial y} = \frac{\partial(\nabla^2 \Phi)}{\partial x}, \quad -\frac{\partial(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})}{\partial y} - 2\frac{\partial\sigma_{xy}}{\partial x} = \frac{\partial(\nabla^2 \Phi)}{\partial y}, \quad (14)$$

որից կստանանք կապը լարման ֆունկցիայի և գծային երկբեկման միջև՝

$$\frac{\partial(\nabla^2 \Phi)}{\partial x} = -\frac{\lambda}{2\pi d S} \left( \frac{\partial\beta_1}{\partial x} + \frac{\partial\beta_2}{\partial y} \right), \quad \frac{\partial(\nabla^2 \Phi)}{\partial y} = -\frac{\lambda}{2\pi d S} \left( \frac{\partial\beta_1}{\partial y} - \frac{\partial\beta_2}{\partial x} \right), \quad (15)$$

Ջերմահաղորդականության հավասարումից, ստացիոնար ջերմային աղբյուրի դեպքում նրա բաշխվածությունը որոշվում է հետևյալ բանաձևով՝

$$q = -\frac{(1-\nu)k}{\alpha E} \left( \frac{\partial^2(\nabla^2 \Phi)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(\nabla^2 \Phi)}{\partial y^2} \right), \quad q = k \nabla^2 T, \quad (16)$$

որտեղ  $q$ -ն ջերմային բաշխվածությունն է, իսկ  $k$ -ն ինդիկատորի էֆեկտիվ ջերմահաղորդականությունը: (15)-ից և (16)-ից կստանանք կապը ջերմային բաշխվածության և գծային երկբեկման միջև՝

$$q = \frac{\lambda}{2\pi d S} \frac{1-\nu}{\alpha E k} \left( 2\frac{\partial^2\beta_2}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2\beta_1}{\partial x^2} - \frac{\partial^2\beta_1}{\partial y^2} \right) : \quad (17)$$

### 1.3 Էլեկտրամագնիսական դաշտի կորուստները

Բարձր ջերմահաղորդականությամբ օժտված ինդիկատորը լավ է կլանում իր մեջ ջերմային ճառագայթումը և ստացված գծային երկբեկմամբ հնարավոր է լինում արտապատկերել ջերմային ճառագայթումը ինդիկատորի մեջ: Սակայն ինդիկատորի նանոմետրական շերտի համապատասխան հատկություններով նյութը ընտրելու դեպքում ինդիկատորում էլեկտրամագնիսական ճառագայթումը կկրի ջերմային կորուստներ, որից առաջացած ջերմային բաշխվածության արտապատկերումը կնկարագրի ինդիկատորում էլեկտրամագնիսական դաշտի ինտենսիվության բաշխվածությունը: Համարելով ինդիկատորի ապակու ջերմահաղորդականությունը համասեռ, էլեկտրամագնիսական կորուստներով ինդիկատորի ապակյա տակդիրում ջերմաստիճանի

փոփոխությունը կնկարագրվի հետևյալ բանաձևով՝

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla(k \nabla T) = q, \quad (18)$$

որտեղ՝  $\rho$ -ն ապակյա տակդիրի խտությունն է,  $k$ -ն՝ ջերմահաղորդականությունը,  $C_p$ -ն՝ ջերմունակությունը, իսկ  $q$ -ն էլեկտրամագնիսական կորուստներով նյութում ջերմության բաշխվածությունն է: Ստացիոնար վիճակում հավասարումը պարզեցվում է՝

$$-k \nabla^2 T = q : \quad (19)$$

Կախված ինդիկատորի նանոմետրական շերտի նյութից, էլեկտրական կամ մագնիսական դաշտը ինդիկատորում կարող է կրել ջերմային կորուստներ: Եթե շերտը դիէլեկտրիկ կորուստներով նյութ է, ապա էլեկտրական դաշտը կրում է ջերմային կորուստներ: Առաջացած ջերմային էներգիայի խտությունը կորոշվի հետևյալ բանաձևով՝

$$q = \frac{\omega}{2} \varepsilon'' |E|^2, \quad (20)$$

որտեղ՝  $\omega$ -ն էլեկտրամագնիսական դաշտի հաճախությունն է, իսկ  $\varepsilon''$ -ն կորուստներով շերտի դիէլեկտրիկ թափանցելիության կեղծ մասն է, իսկ  $E$ -ն՝ էլեկտրական դաշտի լայնությունը:

Եթե նանոմետրական շերտը բարձր հաղորդականությամբ նյութ է, ապա մագնիսական դաշտը նրանում մակածում է մրրկային հոսանքներ, որոնք կրում են ջերմային կորուստներ: Առաջացած ջերմային էներգիայի խտությունը կորոշվի հետևյալ բանաձևով՝

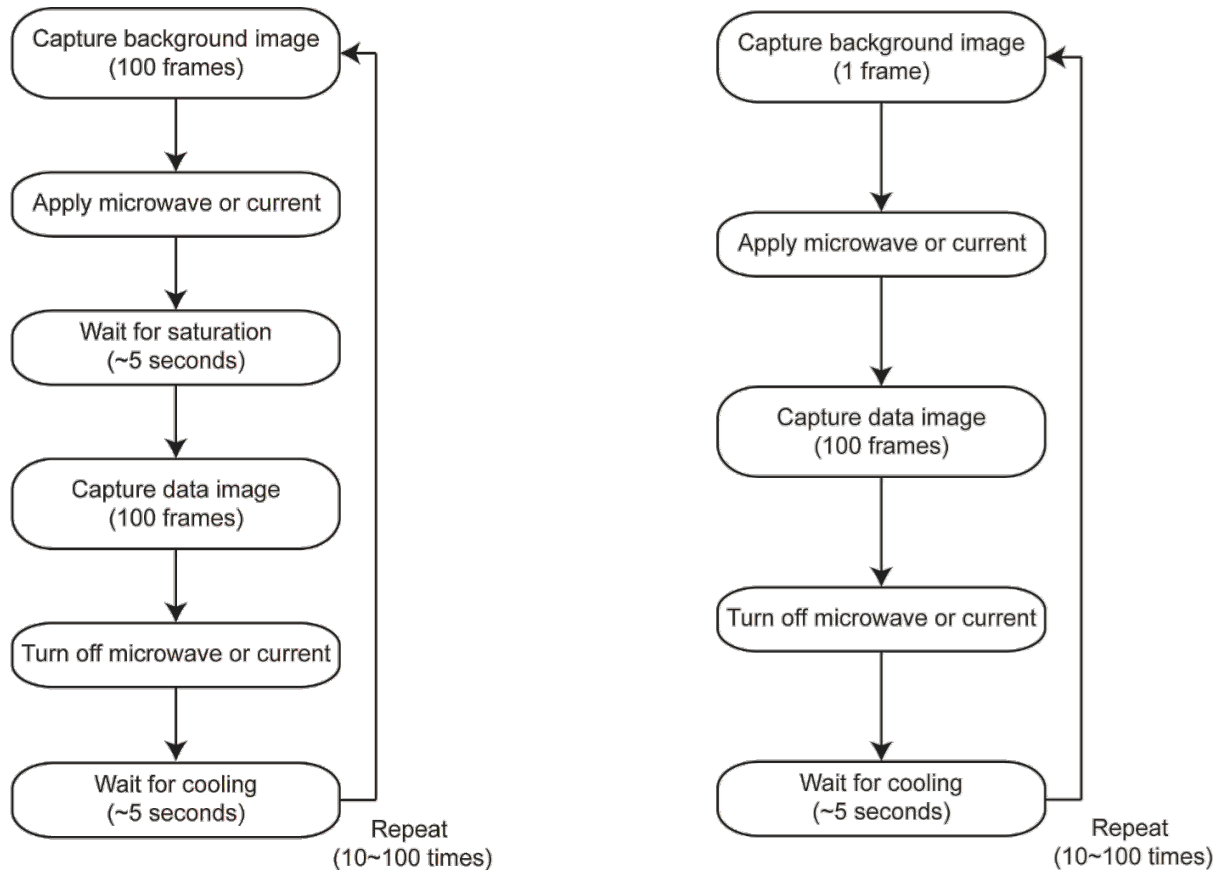
$$q = \frac{P_{av}}{V} = \frac{R_s}{2t} |H_t|^2, \quad (21)$$

$$P_{av} = \int \frac{R_s}{2} |H_t|^2 dS, \quad (22)$$

$$R_s = \sqrt{\frac{\omega \mu}{2\sigma}} = \frac{1}{\sigma \delta_s}, \quad (23)$$

որտեղ  $P_{av}$ -ն հաղորդիչ շերտի կլանած էլեկտրամագնիսական հզորությունն է,  $R_s$ -ը և  $\delta_s$ -ը համապատասխանաբար շերտի մակերևութային դիմադրությունն է և սկիին շերտի հաստությունը,  $H_t$ -ն հաղորդիչ շերտի նկատմամբ մագնիսական դաշտի տանգենցիալ բաղադրիչն է, իսկ  $t$ -ն շերտի հաստությունն է:

## 1.4 Տվյալների հավաքագրումը և վերամշակումը



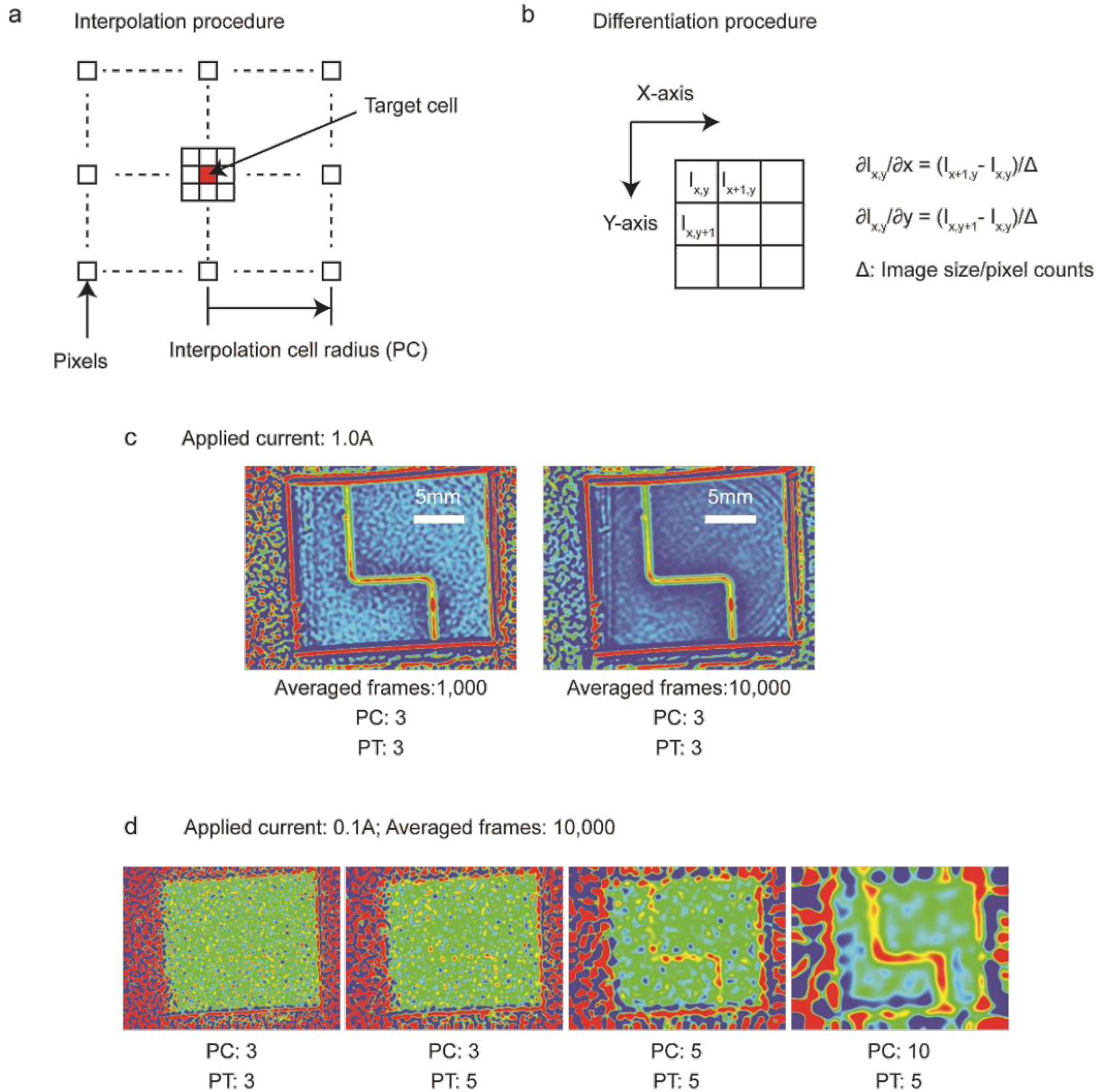
(a) Stationary state measurement

(b) Time resolved measurement

Նկ. 4: Տվյալների հավաքագրման քայլերի հերթականությունը (a) ստատիկ չափումների և (b) ժամանակից կախված չափումների դեպքում:

CCD տեսախցիկով արված պատկերները հավաքագրվում են և վերամշակվում: Նկ. 4-ում ցույց է տրված ստատիկ և ժամանակից կախված չափումների դեպքում տվյալների հավաքագրման քայլերը: Ստատիկ չափումներում սկզբից CCD տեսախցիկով վերցվում են «հենքային» (background) տվյալների պատկերները և միջինացվում, այնուհետև միացվում է ջերմային կամ էլեկտրամագնիսական ճառագայթման աղբյուրը և մոտ 5 վրկ հազեցումից հետո, երբ ինդիկատորում հաստատվում է որոշակի ջերմային բաշխում, վերցվում և միջինացվում են «ինֆորմատիվ» (data) տվյալների պատկերները: Ճառագայթման աղբյուրը անջատվում է և ինդիկատորը կրկին 5 վրկ հազեցում է, որից հետո կատարվում է նույն փորձը 10-100 անգամ: Ժամանակից կախված չափումների դեպքում «հենքային» պատկերը վերցվում է մեկ անգամ, այնուհետև ճառագայթման աղբյուրը միացնելուց հետո որոշակի ժամանակի ընթացքում վերցվում են «ինֆորմատիվ» պատկերները, որից

հետո աղբյուրն անջատվում է և հագեցնում: Նույն փորձը կրկնվում է 10-100 անգամ: Ընդհանուր առմամբ ստանում ենք 1000-10000 միջինացվող կադր:

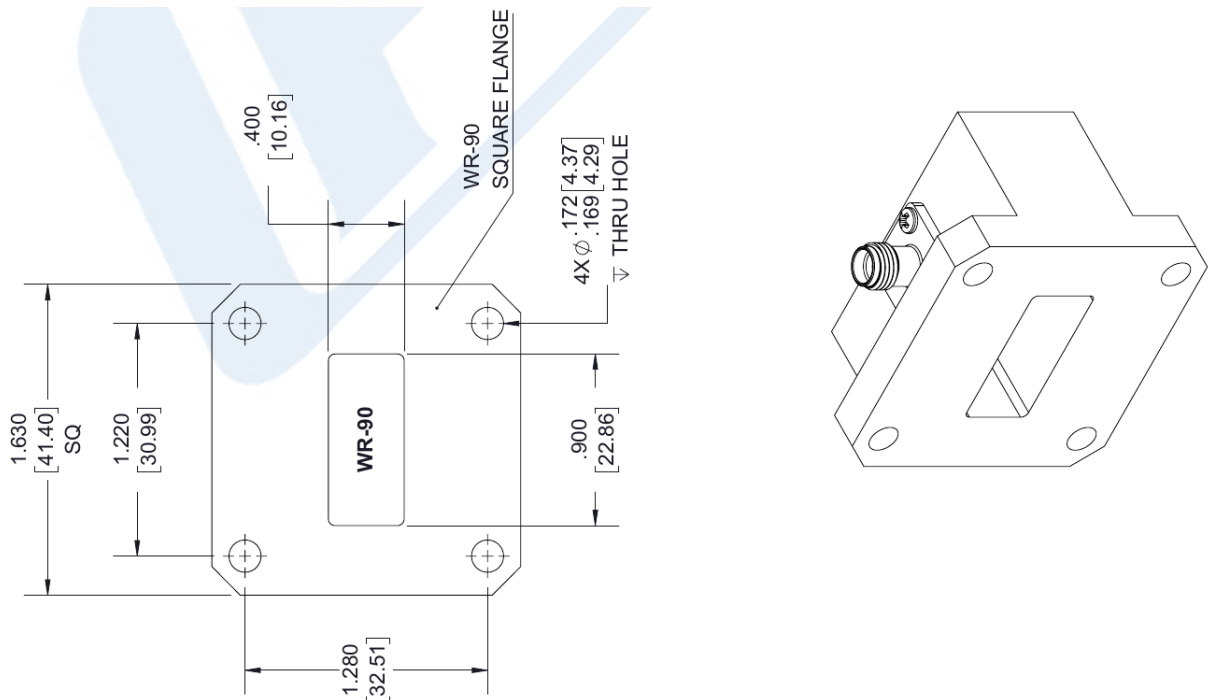


Նկ. 5: (a) Պատկերի հարթեցման պրոցեսը: (b) Պատկերի դիֆերենցման պրոցեսը: (c) Հաշվարկված ջերմային բաշխվածությունը 1000 և 10000 կադրերի միջինացմամբ: (d) Հաշվարկված ջերմային բաշխվածությունը տարբեր չափերով «շարժվող բջիջի» տարբեր քանակի հարթեցումներից հետո:

Միջինացումից բացի պատկերները նաև հարթեցվում են, ինչպես ցույց է տրված նկ. 5 (a)-ում: Հարթեցումը տեղի է ունենում «շարժվող բջիջի» միջոցով, որում բջիջի տակ եղած պատկերի պիկսելների ինտենսիվությունները միջինացվում են: Այնուհետև պատկերները դիֆերենցվում են ըստ հորիզոնական և ուղղահայաց ուղղություններով

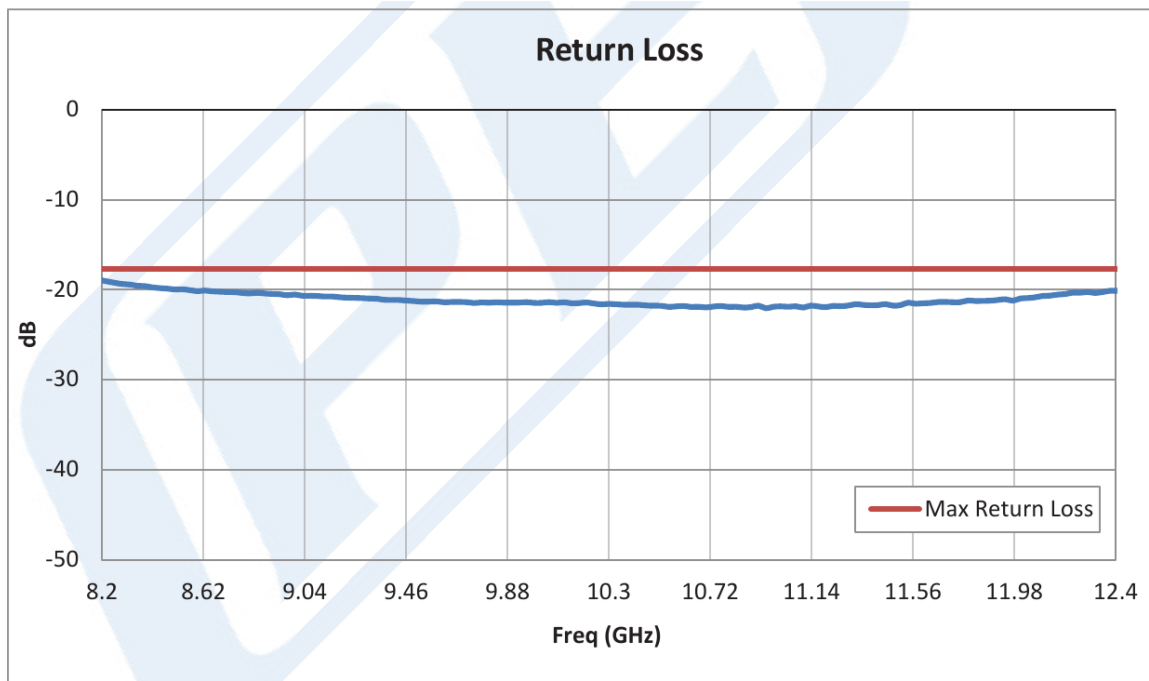
հարևան պիկսելների ինտենսիվությունների տարբերության (b): Նկ. 5-ի (c)-ում և (d)-ում ցույց են տրված տարբեր քանակի կադրերի միջինացումներից և տարբեր չափերի «շարժվող բջիջներով», տարբեր քանակի հարթեցումներից հետո ջերմային աղբյուրների հաշվարկված պատկերները:

## 1.5 Ալիքատարային անտենայի հետազոտումը



Նկ. 6: PE9804 WR-90 ալիքատարի սխեմատիկ պատկերը

ՋԱՕԻՄ-ի միջոցով հետազոտվել է ալիքատարային անտենայի էլեկտրամագնիսական ճառագայթումը: Օգտագործվել է Pasternack արտադրության PE9804 WR-90 մոդելի ուղղանկյուն ալիքատարը, որն էլ հենց օգտագործվել է որպես անտենա: Նկ. 6-ում ցույց է տրված ալիքատարի սխեմատիկ պատկերը: Այն այլումինից պատրաստված ալիքատար է, որը նախագծված է անցկացնել 8.2-12.4 ԳՀց հաճախային տիրույթում էլեկտրամագնիսական ալիքներ: Նկ. 7-ում կապույտ գրաֆիկը ցույց է տալիս նրա միջինացված մարման գործակիցը 8.2-12.4 ԳՀց հաճախային տիրույթում: Կարմիր գրաֆիկը ցույց է տալիս նրա առավելագույն մարման գործակիցը: Ուղղանկյուն ալիքատարը ունի 22.86 մմ լայնությամբ և 10.16 մմ բարձրությամբ ուղղանկյուն կտրվածք: Այն տեղադրված է եղել օպտիկական ինդիկատորին հանդիպակաց՝ 5 մմ հեռավորության վրա:



Նկ. 7: PE9804 WR-90 ալիքատարի աշխատանքի տիրույթում հաճախությունից կախված մարման գործակիցը:

Որպես օպտիկական ինդիկատոր օգտագործվել է ինդիում-անագի բարակ օքսիդային թաղանթով ապակին (ITO Glass): Ինդիում-անագի օքսիդը թափանցիկ հաղորդիչ օքսիդ է, որն իրենից ներկայացնում է ինդիումի օքսիդի ( $\text{In}_2\text{O}_3$ ) և անագի օքսիդի ( $\text{SnO}_2$ ) պինդ լուծույթ: Այն  $n$  տիպի կիսահաղորդիչ է շուրջ 4 ԷՎ արգելված գոտով: ITO-ն օժտված է բարձր հաղորդականությամբ (մոտ  $10^6$  Սմ/մ) և մեծ թափանցիկությամբ (90.2%) [5]: ITO-ն օգտագործվում է տարբեր էլեկտրոնային սարքերում, օրինակ՝ սենսորային էլրաններում կամ արևային մարտկոցներում: Ինդիում-անագի օքսիդի բարակ թաղանթը հարթության վրա նստեցվում է հիմնականում ֆիզիկական գոլորշիների նստեցման (physical vapor deposition (PVD)) եղանակով: Ինդիումի բարձր գնի և սահմանափակ քանակի, ինչպես նաև վակուում պահանջող թաղանթի նստեցման եղանակի բարձր գնի պատճառով ITO-ի պատրաստման այլ եղանակների և ITO-ին փոխարինող, թափանցիկ հաղորդիչ այլ նյութերի, օրինակ՝ գրաֆենի, ածխածնային նանոխողովակների, հաղորդիչ պոլիմերների ուսումնասիրություններ են կատարվել:

Ինդիկատորի ապակու վրա պատված ITO թաղանթի հաստությունը 100 նմ էր: Ինչպես նշվեց, այսպիսի թաղանթով ինդիկատորը ունի բարձր հաղորդականություն, այսինքն նրանում, ինչպես հայտնի է, մագնիսական դաշտը մակածում է մրրկային հոսանքներ, որոնք նյութի դիմադրության պատճառով կրում են ջերմային կորուստներ: Այսինքն



չափվելու է ալիքատարի ճառագայթած էլեկտրամագնիսական դաշտի հենց մագնիսական բաղադրիչը:

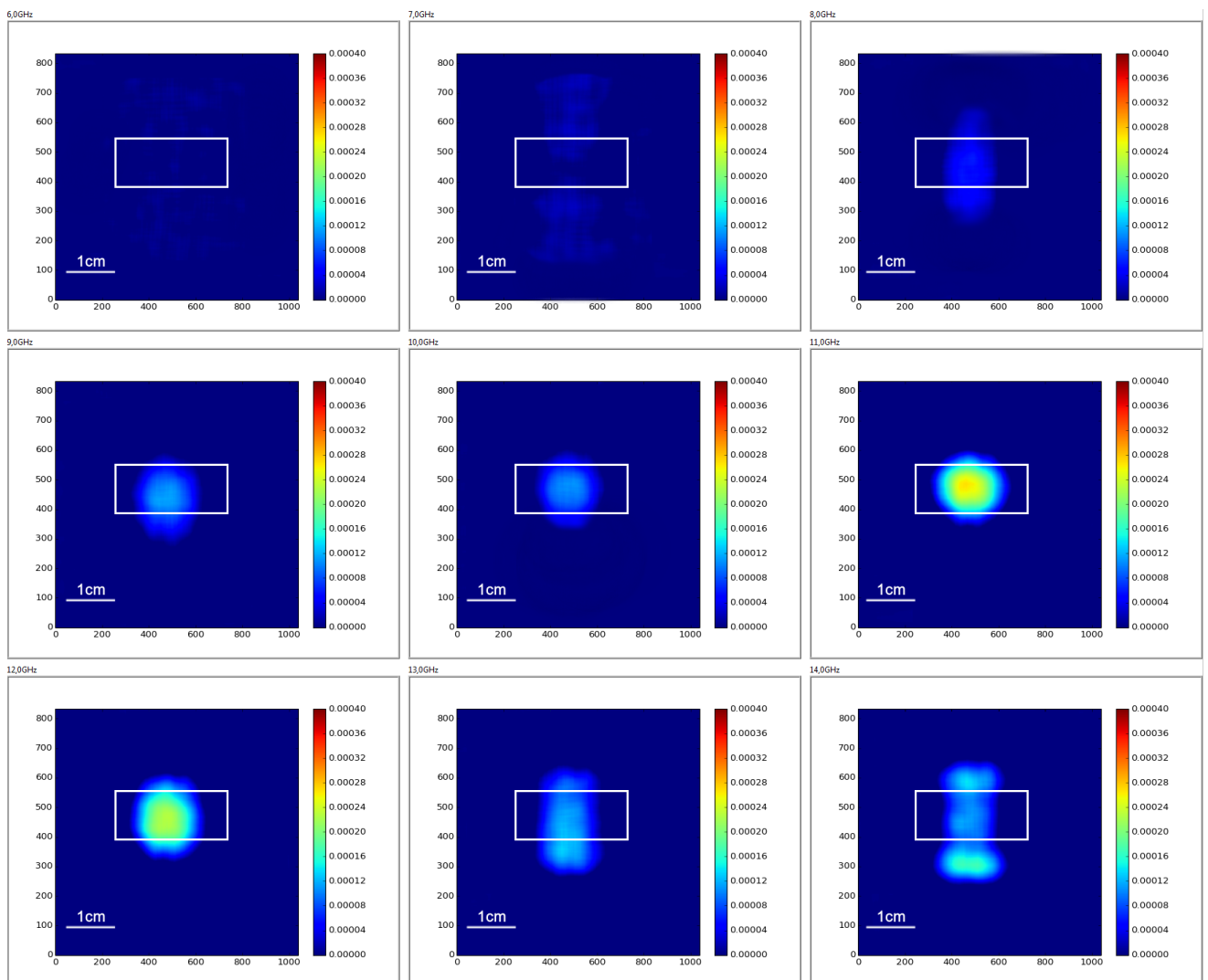
Փորձը բաժանված էր երեք մասի, փորձի յուրաքանչյուր մասում գեներացվել են որոշակի հզորության էլեկտրամագնիսական ալիքներ, որոնք անցկացվել են ուղղանկյուն ալիքատարով: Փորձի առաջին մասում գեներացվել են 0 dBm, երկրորդում՝ 3 dBm, իսկ երրորդում՝ 6 dBm հզորությամբ էլեկտրամագնիսական ալիքներ: Փորձի յուրաքանչյուր մասում հերթով ճառագայթվել են նույն հզորության, ինքն տարբեր հաճախություններով էլեկտրամագնիսական ալիքներ՝ 1 ԳՀց քայլով [6;14] ԳՀց միջակայքում: Ալիքատարից դուրս եկած էլեկտրամագնիսական ալիքների մագնիսական բաղադրիչը ուսումնասիրվել է ալիքատարից 5 մմ հեռավորության վրա:

Յուրաքանչյուր հզորության և հաճախության էլեկտրամագնիսական ալիքների համար, համաձայն նկ. 4 (a)-ում ցուցադրված տվյալների ստատիկ հավաքագրման քայլերի և (17) բանաձևի, CCD տեսախցիկով հավաքվել և վերամշակվել են ջերմային բաշխվածությունների պատկերները: CCD տեսախցիկով հավաքված պատկերները միջինացվել և հարթեցվել են LabVIEW միջավայրում գրված հատուկ ծրագրի միջոցով: Համաձայն (22) օրենքի՝ ստացված ջերմային բաշխվածության պատկերը նկարագրում է մագնիսական դաշտի ինտենսիվությունների բաշխվածությունը: Այսպիսով, ստացված պատկերները բարձր տարածական լուծունակությամբ և ջերմային զգայունությամբ նկարագրում են ալիքատարային անտենայից դուրս եկած մագնիսական դաշտը: Վերամշակման գործողության հետ մեկտեղ փորձի յուրաքանչյուր մասի վրա ծախսվել է մոտ 40 րոպե ժամանակ:

## 2 Փորձի արդյունքները

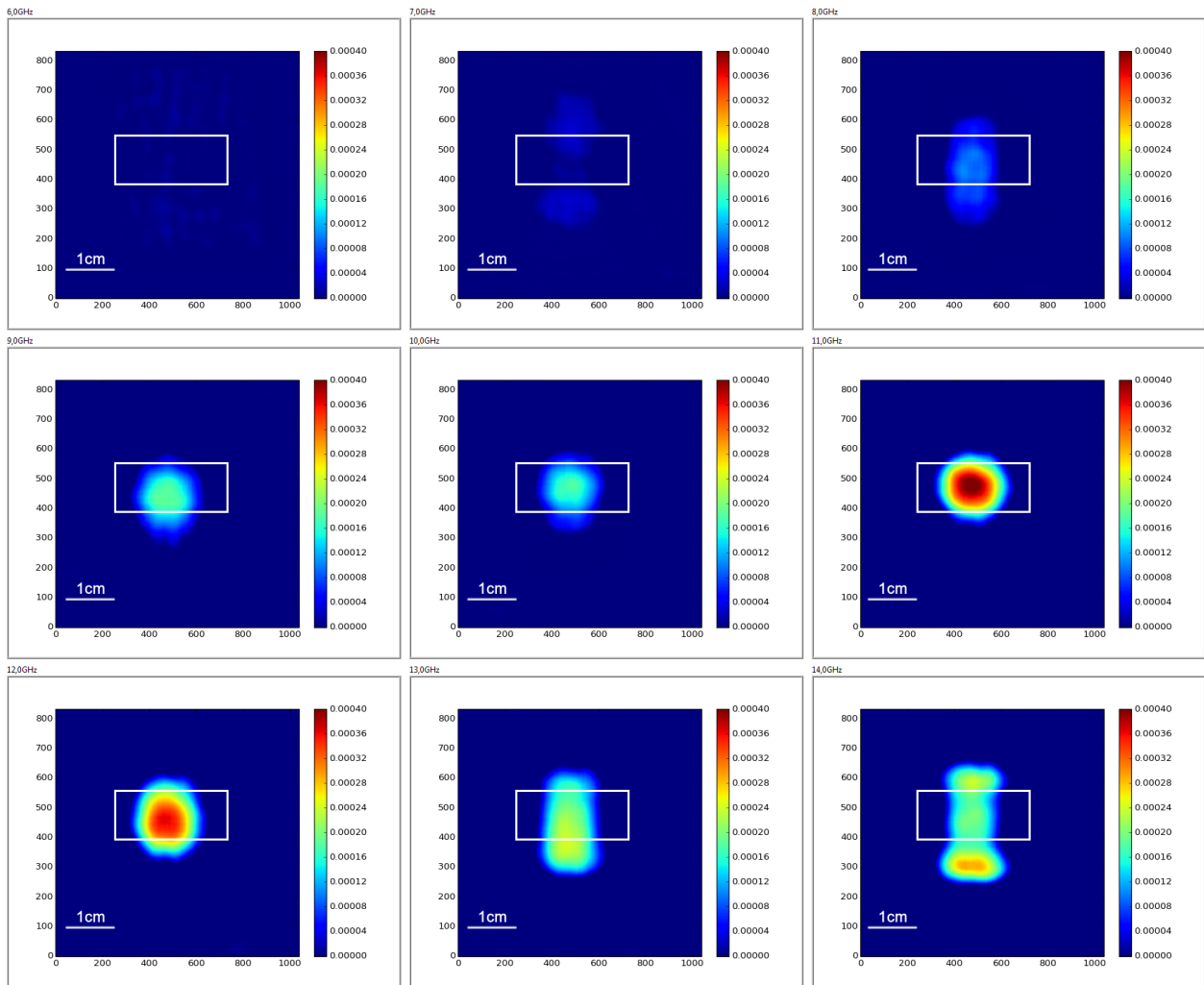
### 2.1 Ինտենսիվության կախումը հաճախությունից

Նկ. 8-ում, 9-ում և 10-ում ցույց են տրված ալիքատարային անտենայի ճառագայթած մագնիսական դաշտերի ինտենսիվությունների պատկերները, համապատասխանաբար 0 dBm, 3 dBm և 6 dBm մուտքային հզորություններով գեներացված էլեկտրամագնիսական ալիքների դեպքում: Յուրաքանչյուր նկարում մագնիսական դաշտերի ինտենսիվությունները պատկերված են նույն հզորությամբ վերը նշված ինը հաճախություններով գեներացված ալիքների համար, որոնք ստացվել էին LabVIEW-ով գրված հատուկ ծրագրում, գծային երկբեկման բաշխվածությունները հավաքագրելու և վերամշակելու արդյունքում:

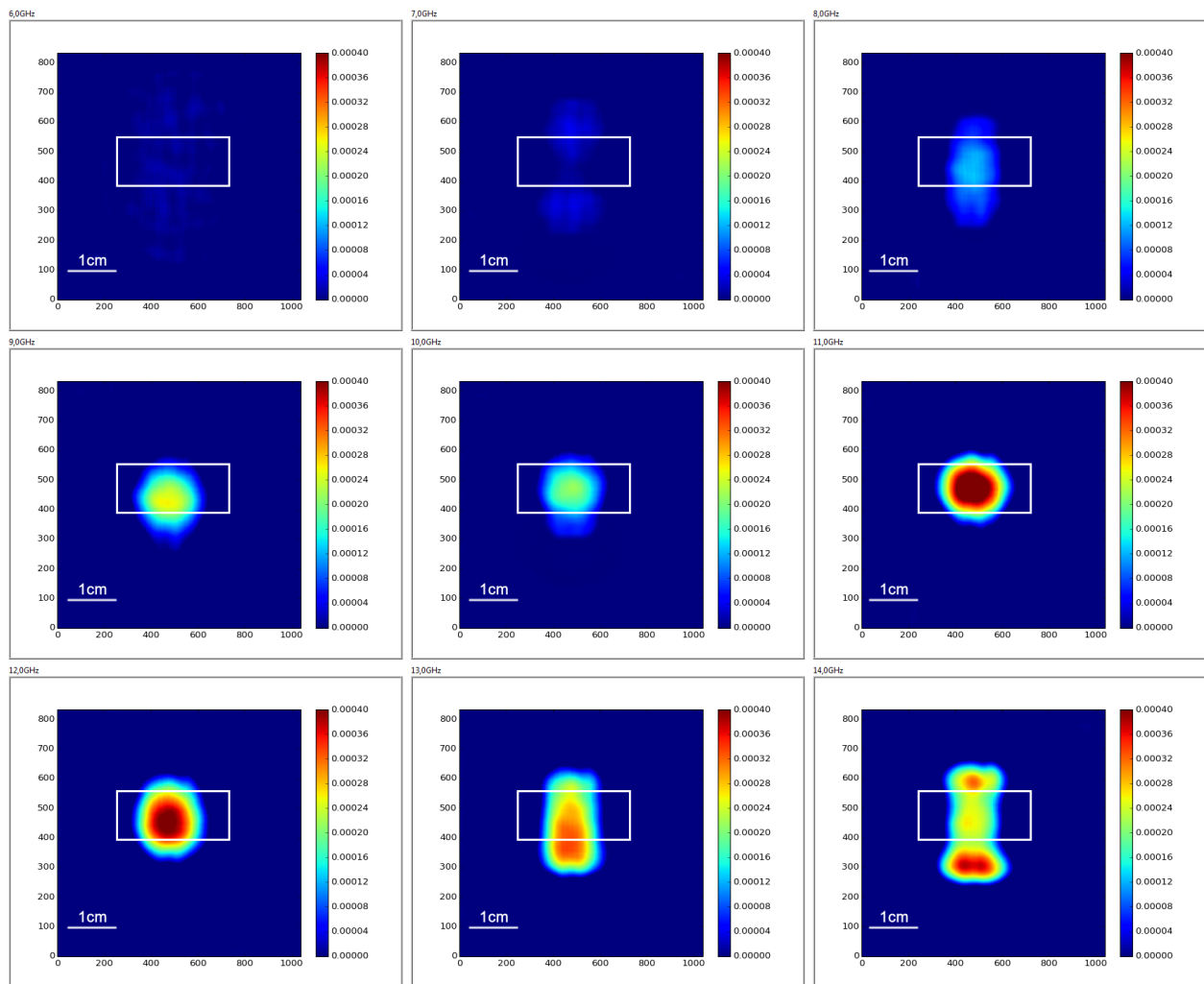


Նկ. 8: 0 dBm հզորությամբ գեներացված էլեկտրամագնիսական ալիքների դեպքում մագնիսական դաշտի ինտենսիվությունները յուրաքանչյուր հաճախության ալիքների համար: Պատկերները ցույց են տված ըստ հաճախության աճման՝ ձախից աջ, վերևից ներքև հաջորդականությամբ:

Յուրաքանչյուր պատկերներում նաև ցույց է տրված ուղղանկյուն ալիքատարի կտրվածքի դիրքը և չափը:



Նկ. 9: 3 dBm հզորությամբ գեներացված էլեկտրամագնիսական ալիքների դեպքում մագնիսական դաշտի ինտենսիվությունները յուրաքանչյուր հաճախության ալիքների համար: Պատկերները ցույց են տված ըստ հաճախության աճման՝ ձախից աջ, վերևից ներքև հաջորդականությամբ:

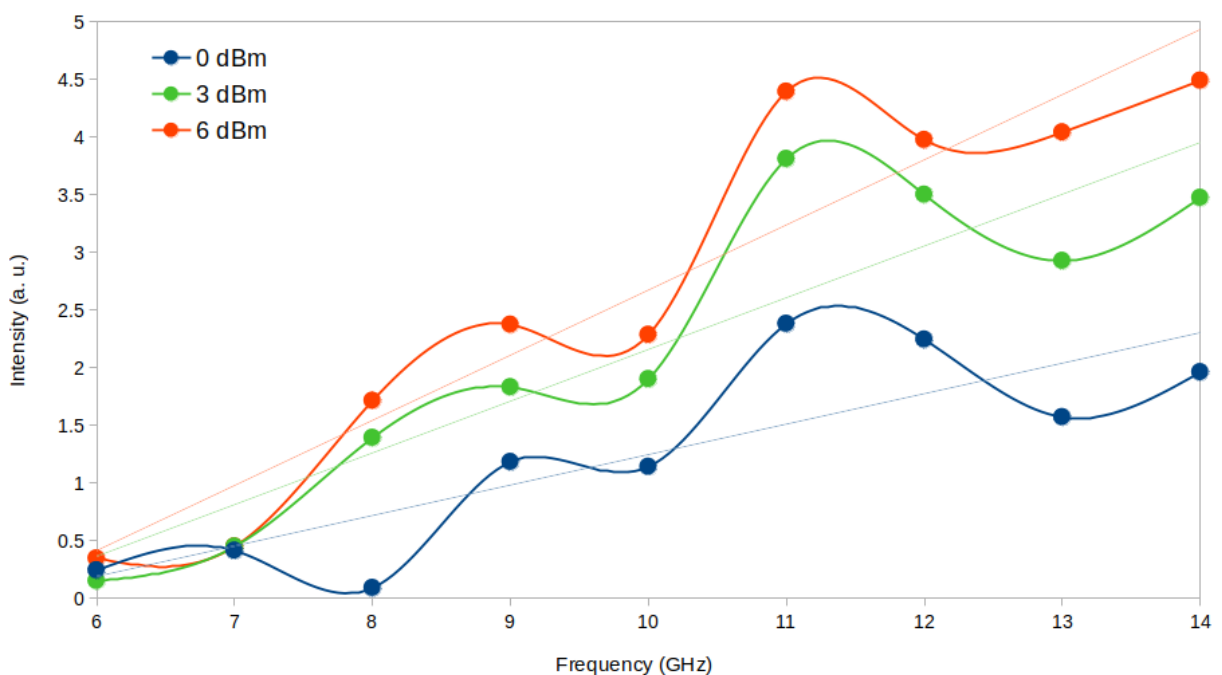


Նկ. 10: 6 dBm հզորությամբ գեներացված էլեկտրամագնիսական ալիքների դեպքում մագնիսական դաշտի ինտենսիվությունները յուրաքանչյուր հաճախության ալիքների համար: Պատկերները ցույց են տված ըստ հաճախության աճման՝ ձախից աջ, վերևից ներքև հաջորդականությամբ:

Ինչպես տեսնում ենք, հաճախությունը բարձրացնելիս՝ ալիքատարի մագնիսական դաշտի ինտենսիվությունը մեծանում է, իսկ նրա վերաբաշխվումը՝ փոխվում: Նույն վարքը տեղի է ունենում բոլոր 0, 3 և 6 dBm հզորություններում: Նկատի առնենք, որ ալիքատարը օգտագործվել է նաև իր աշխատանքային հաճախային տիրույթից դուրս հաճախություններում: Օրինակ՝ 6, 7, 13 կամ 14 ԳՀց հաճախությամբ ալիքներ են անցկացվել ալիքատարով: Ինչպես տեսնում ենք նկարներում, ալիքատարի աշխատանքային տիրույթից ցածր հաճախությունների դեպքում մագնիսական դաշտը ունի անկանոն տեսք և ցածր ինտենսիվություն: Սա պայմանավորված է ալիքատարում ցածր հաճախությամբ էլեկտրամագնիսական ալիքների անդրադարձմամբ: Բարձր հաճախությունների դեպքում, ինչպես օրինակ 13 կամ 14

ԳՀց, մագնիսական դաշտը կրկին կրում է անկանոն տեսք, ինչը պայմանավորված է ալիքատարում ալիքների անդրադարձումների, ինտերֆերենցիաների և այլ տեսակի շեղումների առկայությամբ: Այս ամենին համեմատ, ալիքատարի աշխատանքային տիրույթում անցկացված ալիքների մագնիսական դաշտի ինտենսիվությունը հաճախության բարձրացման հետ աճում է:

Նկ. 11-ում ցույց է տրված վերը նշված հզորությունների դեպքում ալիքատարից ճառագայթված մագնիսական դաշտի միջինացված ինտենսիվության կախումը 6-14 ԳՀց միջակայքում ալիքի հաճախությունից:



Նկ. 11: Ալիքատարային անտենայի ճառագայթած մագնիսական դաշտի միջինացված ինտենսիվության կախումը հաճախությունից՝ բոլոր երեք մուտքային հզորություններով էլեկտրամագնիսական ալիքների գեներացումների դեպքում:

Փորձը ցույց է տալիս, որ մագնիսական դաշտի միջինացված ինտենսիվությունը 6-14 ԳՀց միջակայքում ալիքի հաճախության բարձրացման հետ աճում է համարյա գծային օրենքով:

## Եզրակացություն

ՁԱՕԻՄ-ը օգտագործվել է ալիքատարային անտենայի ճառագայթած դաշտի տարածական բաշխվածությունն ուսումնասիրելու նպատակով: 6-14 ԳՀց հաճախային տիրույթում գրանցվել է դաշտի բաշխվածությունը մուտքային հզորության 0, 3 և 6 dBm արժեքների դեպքում:

Բարձր հաճախությունների դեպքում նկատվում է ավելի շատ ալիքների տեղակայում, որը պայմանավորված է ավելի կարճ ալիքի երկարությամբ միկրոալիքներով: Հզորության մեծացմանը զուգընթաց ճառագայթված դաշտի ինտենսիվությունն աճել է առանց փոխելու դաշտի բաշխվածության տեսքը, իսկ հաճախության աճին զուգընթաց փոխվել է ինչպես ճառագայթված դաշտի ինտենսիվությունը, այնպես էլ տարածական բաշխվածությունը վերոնշյալ հաճախային տիրույթում: Առավելագույն ինտենսիվության արժեքը գրանցվել է 11 ԳՀց հաճախության դեպքում, ինչը պայմանավորված է ՁԱՕԻՄ-ի (օպտիկական ինդիկատորի) և ալիքատարային անտենայի հաճախային առանձնահատկություններով:

Ալիքատարային անտենայի ճառագայթված դաշտի հետազոտումը ցույց տվեց, որ ՁԱՕԻՄ-ի օգնությամբ պարզ և մատչելի եղանակով հնարավոր է մեծ տարածական լուծունակությամբ և ջերմային զգայունությամբ չափել ճառագայթված էլեկտրամագնիսական դաշտը և ուսումնասիրել իր առանձնահատկությունները: Չափելով թերի և անթերի աշխատող նույն տեսակի և մոդելի անտենաների ճառագայթված դաշտերը և համեմատելով չափված դաշտերի բաշխվածությունները, կարելի է հայտնաբերել թերի աշխատող անտենայի թերությունները: Այսպիսով, այս եղանակի շնորհիվ հնարավոր է ուսումնասիրել տարատեսակ անտենաների վարքը, հայտնաբերել դրանց հնարավոր թերությունները և ուսումնասիրությունների հիման վրա բարելավել և օպտիմիզացնել դրանք, ինչպես նաև նոր բարելավված անտենաներ նախագծել:

## Գրականություն

- [1] Yue, Y. & Wang, X. Nanoscale thermal probing. Nano Reviews. 3, 11586 (2012).
- [2] Xie, X., Simon, J. D. Picosecond circular dichroism spectroscopy: a Jones matrix analysis. J. Opt. Soc. Am. B 7, 1673 (1990).
- [3] H. Lee, S. Arakelyan, B. Friedman, K. Lee, Temperature and microwave near field imaging by thermo-elastic optical indicator microscopy, Sci. Rep. 6, 39696 (2016).
- [4] Barron R. F., Barron B. R. Design for Thermal Stresses. Ch. 6 (Wiley, 2011).
- [5] Chen Z, Li W, Li R, Zhang Y, Xu G, Cheng H. Fabrication of highly transparent and conductive indium-tin oxide thin films with a high figure of merit via solution processing. Langmuir. 2013 Nov 12;29(45):13836-42. doi: 10.1021/la4033282. Epub 2013 Oct 28. PMID: 24117323.