

*А.І. КОВАЛЕНКО, канд. техн. наук, С.В. ТИГОВ, канд. техн. наук,  
О.В. ТИГОВА, канд. техн. наук, О.С. ЧОРНА, канд. техн. наук*

## **ОЦІНКА ВИМОГ ДО ПАРАМЕТРІВ СИГНАЛІВ ПРИ V-ПОДІБНОМУ РОЗПОДІЛІ ЧАСТОТ У МАТЕМАТИЧНІЙ МОДЕЛІ ПЛОСКОЇ ФАЗОВАНОЇ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ**

### **Вступ**

Розвиток ефективних радіотехнічних систем різного призначення, таких як засоби локації ближньої дії, спеціальні системи зв'язку між об'єктами в заданих локальних ділянках простору, системи передавання енергії НВЧ-променем і формування в локальній ділянці простору високої щільності електромагнітної енергії, стає можливим завдяки використанню фокусування електромагнітного випромінювання. Фазовані антенні решітки (ФАР) надають найбільші можливості та гнучкість керування параметрами сфокусованого електромагнітного випромінювання (ЕМВ).

Різноманітні методи керування фокусуванням ЕМВ класифікуються та аналізуються в роботах [1 – 6]. У результаті дослідження, проведеного в [5, 6], було показано, що найефективнішими методами фокусування ЕМВ є методи, що ґрунтуються на взаємоузгодженому просторово-фазово-частотному (ПФЧ) і просторово-фазово-частотно-часовому управлінні. Для локалізації ЕМВ в заданому кутовому напрямку без сканування рекомендується використовувати методи фокусування, що ґрунтуються на ПФЧ-керуванні з використанням багатоступеневого V-подібного закону розподілу частот за апертурою ФАР.

Однак флуктуації параметрів сигналів і антен, спричинені різними випадковими факторами, обмежують потенційні можливості та можуть призвести до суттєвих змін сфокусованих просторово-часових імпульсів, а також до зниження їхньої пікової потужності. Тому представляє інтерес вивчення та обґрунтування вимог до параметрів випромінюваних сигналів при використанні різних методів фокусування ЕМВ [14, 15].

Мета статті – проведення статистичного дослідження, яке дозволить оцінити вплив різних випадкових і детермінованих змін електричних і конструктивних параметрів антен, а також систем управління випромінюваними сигналами під час використання багатоступеневого V-подібного розподілу частот за апертурою ФАР на рівень пікової потужності, тривалість і період повторення сфокусованих імпульсів. Основна увага приділяється вивченню впливу цих факторів на рівень пікової потужності, тривалість і період повторення сфокусованих імпульсів.

### **Основні припущення**

У статті [6] зазначено, що для формування послідовності сфокусованих просторово-часових імпульсів (ПЧІ) необхідно задати закон розподілу амплітуд, початкових фаз і частот випромінюваних сигналів по апертурі ФАР. Важливо забезпечити умови синфазного складання полів від усіх випромінювальних елементів в обраній точці фокусування. Параметри закону керування, заснованого на просторово-фазово-частотному (ПФЧ) підході, мають бути стабільними протягом часу, що дорівнює усередненій тривалості імпульсів на виході випромінювачів під час формування окремого ПЧІ, або протягом тривалості послідовності ПЧІ.

Вплив різних типів помилок під час виготовлення традиційних антен та елементів антенно-фідерного тракту на характеристики поля випромінювання було розглянуто в попередніх роботах [1, 8, 9, 12]. У даній статті особлива увага приділяється особливостям точності розташування фазових центрів випромінювачів і вимогам до дискретності й точності встановлення початкових фаз і несучих частот за апертурою плоских ФАР, специфічних для ПФЧ фокусування на основі V-подібних розподілів частот.

Параметри законів ПФЧ керування фокусуванням ЕМВ, як вид закону розподілу помилок, дисперсії та радіуси кореляції помилок, є вихідними величинами під час дослідження статистики поля випромінювання. Однак через велику кількість елементів у передавальних каналах і різних джерел нестабільностей, визначення точного закону розподілу помилок у кожному каналі ФАР досить складне. Тому для спрощення аналізу припускають, що помилки встановлення параметрів сигналів у каналах ФАР є некорельованими і рівноймовірними. За відсутності інформації про закон розподілу застосовується припущення про рівну ймовірність. Виявляється, що в найгіршому випадку помилка, викликана відхиленням дійсного закону від передбачуваного закону рівної ймовірності, не перевищує  $\pm 20\%$  сумарної похибки, якщо похибка, яку розглядають, є домінуючою [10, 11]. Це пояснюється тим, що закон рівної ймовірності знаходиться між модальними й антимодальними законами розподілу.

У статті розглядається вплив зазначених нестабільностей на рівень пікової потужності, тривалість і період повторення сфокусованих імпульсів. Проводиться оцінка максимальних значень помилок параметрів законів керування, за яких зазначені характеристики сфокусованих ПЧІ змінюються не більше ніж на  $10\%$ .

### Вимоги до точності розташування фазових центрів випромінювачів

Аналіз виразів для розрахунку щільності потоку потужності, створюваної плоскою ФАР у заданій точці простору [5 – 7], показує, що якість фокусування ПЧІ залежить від ступеня забезпечення заданих координат фазових центрів джерел випромінювання. При створенні конкретних зразків радіотехнічних систем із ФАР можливі помилки в забезпеченні обраних координат, і закони зміни миттєвих фаз не відповідатимуть вимозі когерентного складання сигналів випромінювачів у заданій точці простору. Тому процес формування послідовності сфокусованих ПЧІ може бути порушений. Для обґрунтування вимог до точності розташування фазових центрів випромінювачів у плоских ФАР проведемо математичне моделювання поля випромінювання під час використання багатоступеневих V-подібних законів розподілу частот за наявності зазначених помилок.

Вплив помилок у розташуванні фазових центрів окремих джерел випромінювання за рівноймовірного закону їхнього розподілу на математичне очікування нормованої щільності потоку потужності плоскої ФАР можна оцінити за виразом

$$\langle S_H(x, y, z, t) \rangle = \left\langle \frac{1}{S_{\max}} \left| \sum_{m=-\frac{N_x-1}{2}}^{\frac{N_x-1}{2}} \sum_{n=-\frac{N_y-1}{2}}^{\frac{N_y-1}{2}} \sqrt{\frac{P_{mn} G_{mn}}{4\pi z^2}} \exp \left\{ -j \left[ 2\pi f_{0mn} \left( t - \frac{R_{mn}^\Delta}{c} \right) + \varphi_{0mn} \right] \right\} \right|^2 \right\rangle; \quad (1)$$

де  $S_{\max}$  – максимальне значення щільності потоку потужності плоскої ФАР. Відстань до точки спостереження від кожного випромінювального елемента з урахуванням помилок розташування фазових центрів дорівнює

$$R_{mn}^\Delta = \sqrt{(x - x_{mn}^\Delta)^2 + (y - y_{mn}^\Delta)^2 + (z - z_{mn}^\Delta)^2}; \quad (2)$$

де  $x_{mn}^\Delta = x_{mn} + \frac{\Delta\rho}{\sqrt{2}}\Psi_1$ ,  $y_{mn}^\Delta = y_{mn} + \frac{\Delta\rho}{\sqrt{2}}\Psi_2$ ,  $z_{mn}^\Delta = \Delta h\Psi_3$  – значення координат фазових центрів джерел випромінювання плоскої ФАР з урахуванням помилок;  $\Delta\rho$  і  $\Delta h$  – максимальні значення помилок розташування фазових центрів джерел випромінювання;  $\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3$  – рівномірно розподілені в інтервалі  $[-1, 1]$  випадкові числа.

Закон розподілу початкових фаз для здійснення когерентного складання полів в обраній точці фокусування матиме вигляд [6, 7]

$$\varphi_{0n} = -2\pi f_{0n} \left( \frac{z_F}{c} - \frac{R_{Fn}}{c} \right); \quad (3)$$

де  $R_{Fn} = \sqrt{(x_F - x_n)^2 + (y_F - y_n)^2 + (z_F - z_n)^2}$  – відстань між точкою фокусування з координатами  $P_F(x_F, y_F, z_F)$  і центром  $n$ -го джерела випромінювання з координатами  $(x_n, y_n, z_n)$ .

Закон розподілу частот по апертурі ФАР має вигляд [7]

$$f_{0mn} = \begin{cases} f_0 + \gamma \left[ \frac{m}{\gamma} \right] \Delta F_x, & \text{если } \gamma \left[ \frac{m}{\gamma} \right] \Delta F_x \geq \gamma \left[ \frac{n}{\gamma} \right] \Delta F_y, \\ f_0 + \gamma \left[ \frac{m}{\gamma} \right] \Delta F_y, & \text{если } \gamma \left[ \frac{m}{\gamma} \right] \Delta F_x < \gamma \left[ \frac{n}{\gamma} \right] \Delta F_y; \end{cases} \quad (4)$$

$$m \in \left[ -\frac{N_x - 1}{2}; \dots; 0; \dots; \frac{N_x - 1}{2} \right]; \quad n \in \left[ -\frac{N_y - 1}{2}; \dots; 0; \dots; \frac{N_y - 1}{2} \right];$$

де  $\gamma$  – коефіцієнт зменшення щільності;  $\left[ \frac{m}{\gamma} \right]$  – оператор округлення результату до найближчого більшого цілого числа. Коефіцієнт зменшення щільності  $\gamma = \frac{\Delta F_{\max}}{\Delta F_i Q} = \frac{N_i - 1}{2Q}$  показує,

у скільки разів збільшується крок частоти між сусідніми шаблями закону частотного розподілу (або визначає кількість випромінювальних елементів з однаковими несучими частотами в одному шаблі частотного розподілу).

Оцінки проведемо для випадку: розміри ФАР  $L_x = L_y = L = 1,3$  м;  $\lambda = 0,02$  м ( $L/\lambda = 65$ );  $N_x = N_y = 65$  ( $N = N_x N_y = 4225$ ) і  $P_{mn} = 6$  Вт ( $P_{\text{визл.}} = P_{mn} N = 25$  кВт); амплітудний розподіл рівномірний  $A(x, y) = 1$ ; дискретність частоти між сусідніми випромінювачами  $\Delta F_x = \Delta F_y = 20$  МГц та, відповідно, максимальний рознос несучих частот за апертурою ФАР  $\Delta F_{x\max} = \Delta F_{y\max} = 640$  МГц. Це дає змогу формувати послідовність ПЧІ тривалістю  $\tau_{\text{пчі}} = 1,7$  нс із періодом повторення  $T_{\text{пчі}} = 50$  нс.

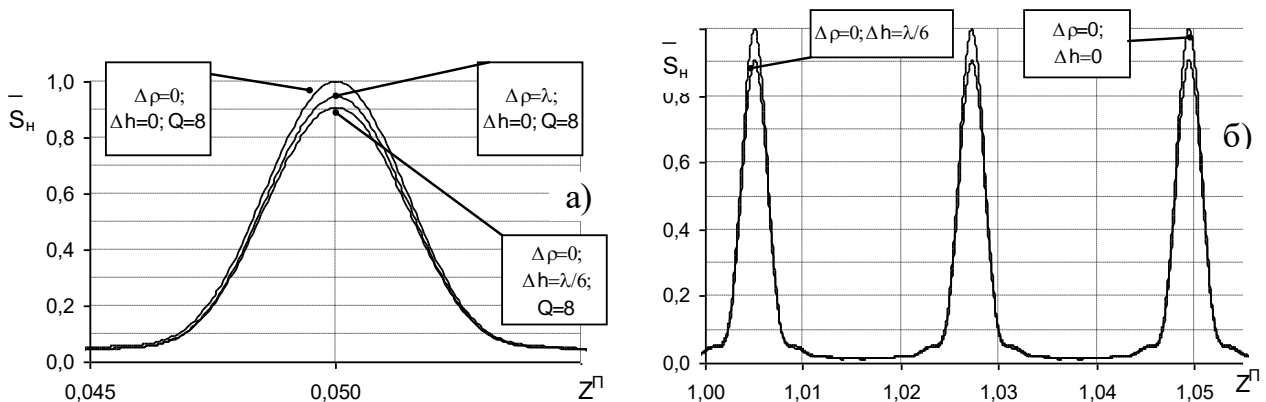


Рис. 1. Вплив помилок  $\Delta\rho$  і  $\Delta h$  на розподіл щільності потоку потужності ФАР за дальністю при  $\gamma=4$  ( $Q=8$ ): а)  $z_F=0,05z_d$ ; б)  $z_F=z_d$

На рис. 1 наведено залежності  $\bar{S}_n = \langle S(x, y, z, t) / S_{\max} \rangle$  в напрямку нормалі до розкриття плоскої ФАР без урахування помилок розташування випромінювачів ( $\Delta\rho = 0$ ;  $\Delta h = 0$ ), а також з урахуванням максимальних значень помилок у площині  $XOY$ , що дорівнює  $\Delta\rho = \lambda$ , та за віссю  $OZ$ , що дорівнює  $\Delta h = \lambda/6$ , у разі використання багатоступеневого V-подібного закону розподілу частот по апертурі (див. вир. (4)) з параметром  $\gamma=4$  ( $Q=8$ ) для двох точок фокусування  $z_F = 0,05z_d$  і  $z_F = z_d$  ( $z^n = 0,05$  і  $z^n = 1,0$ ) відповідно.

Як видно з рис. 1, вплив помилок розташування випромінювачів у площині  $XOY$  на рівень щільності потоку потужності ЕМВ позначається тільки в першій половині зони Френеля. При цьому зменшення значення  $S_H$  не перевищує 5 % на дальності  $z_F = 0,05z_d$  при  $\Delta\rho = \lambda$ . Зі збільшенням дальності до точки фокусування  $z_F \geq 0,5z_d$  вплив помилок розташування випромінювачів у площині  $XOY$  стає несуттєвим. Вплив помилок розташування фазових центрів випромінювачів по осі  $OZ$  не залежить від дальності до точки фокусування. Область допустимих значень  $\Delta h$ , у якій зменшення значення  $S_H$  не перевищує 10 %, визначається з умови

$$\Delta h \leq \lambda/6 . \quad (5)$$

Проведене математичне моделювання показує, що помилки розташування фазових центрів окремих джерел випромінювання плоскої ФАР, що дорівнюють  $\Delta\rho = \lambda$  і  $\Delta h = \lambda/6$ , практично не впливають на тривалість і період повторення ПЧІ.

### Вимоги до дискретності та точності встановлення початкових фаз і несучих частот за апертурою плоских ФАР

Аналіз запропонованих методів формування послідовностей коротких ПЧІ під час використання багатоступеневих V-подібних законів розподілу опорних частот за апертурою плоских ФАР проводили без урахування можливих помилок у встановленні початкових фаз і опорних частот у передавальних каналах. Однак під час практичного здійснення синфазного складання полів від великої кількості джерел випромінювання завдяки випадковим неконтрольованим змінам параметрів закону ПФЧ керування випромінюваними сигналами можливе істотне погіршення характеристик ФАР.

Під час проведення розрахунків математичного очікування нормованого значення щільності потоку потужності плоскої ФАР з урахуванням помилок у встановленні опорних частот і початкових фаз випромінюваних сигналів приймали вихідні дані, наведені вище. Розрахунок здійснювався на основі виразу (1) з урахуванням випадкових помилок у встановленні заданої дискретності початкових фаз виду

$$\varphi_{0mn}^{\Delta} = -2\pi f_{0mn} \left( \frac{z_F}{c} - \frac{R_{Fmn}}{c} \right) + \Delta\varphi\Psi_1; \quad (6)$$

де  $\Delta\varphi$  – максимальне значення помилки встановлення початкової фази в кожному випромінювальному елементі ФАР;  $\Psi_1$  – випадкова величина, рівномірно розподілена в межах інтервалу  $[-1,1]$ .

При цьому багатоступінчастий V-подібний закон розподілу несучих частот (див. (4)) з урахуванням помилок матиме вигляд

$$f_{0mn}^{\Delta} = \begin{cases} f_0 + \gamma \left[ \frac{|m|}{\gamma} \right] \Delta F_x + \Delta f\Psi_2, & \text{якщо } \gamma \left[ \frac{|m|}{\gamma} \right] \Delta F_x \geq \gamma \left[ \frac{|n|}{\gamma} \right] \Delta F_y, \\ f_0 + \gamma \left[ \frac{|n|}{\gamma} \right] \Delta F_y + \Delta f\Psi_2, & \text{якщо } \gamma \left[ \frac{|m|}{\gamma} \right] \Delta F_x < \gamma \left[ \frac{|n|}{\gamma} \right] \Delta F_y; \end{cases}$$

де  $\Delta f$  – максимальне значення помилки встановлення несучої частоти в кожному випромінювальному елементі ФАР;  $\Psi_2$  – випадкова величина, рівномірно розподілена в межах інтервалу  $[-1,1]$ .

Розглянемо вплив помилок в установці заданих дискретностей несучої частоти і початкової фази в кожному випромінювальному елементі на характеристики випромінювання плоскої ФАР. На рис. 2 наведено значення математичного очікування нормованої щільності потоку потужності випромінювання плоскої ФАР  $\bar{S}_H = \langle S(x, y, z, t) / S_{\max} \rangle$  у напрямі нормалі

до розкриву без урахування помилок встановлення опорних частот і початкових фаз ( $\Delta\varphi = 0$ ;  $\Delta f = 0$ ;  $Q = 32$ ), з урахуванням максимального значення помилки встановлення початкових фаз  $\Delta\varphi = \pi/2$  та з урахуванням максимального значення помилки встановлення опорних частот  $\Delta f = \Delta F_x/8 = \Delta F_y/8$  у разі використання багатоступеневого V-подібного закону розподілу частот за апертурою (див. (4)) для точки фокусування  $z_F = z_d$ .

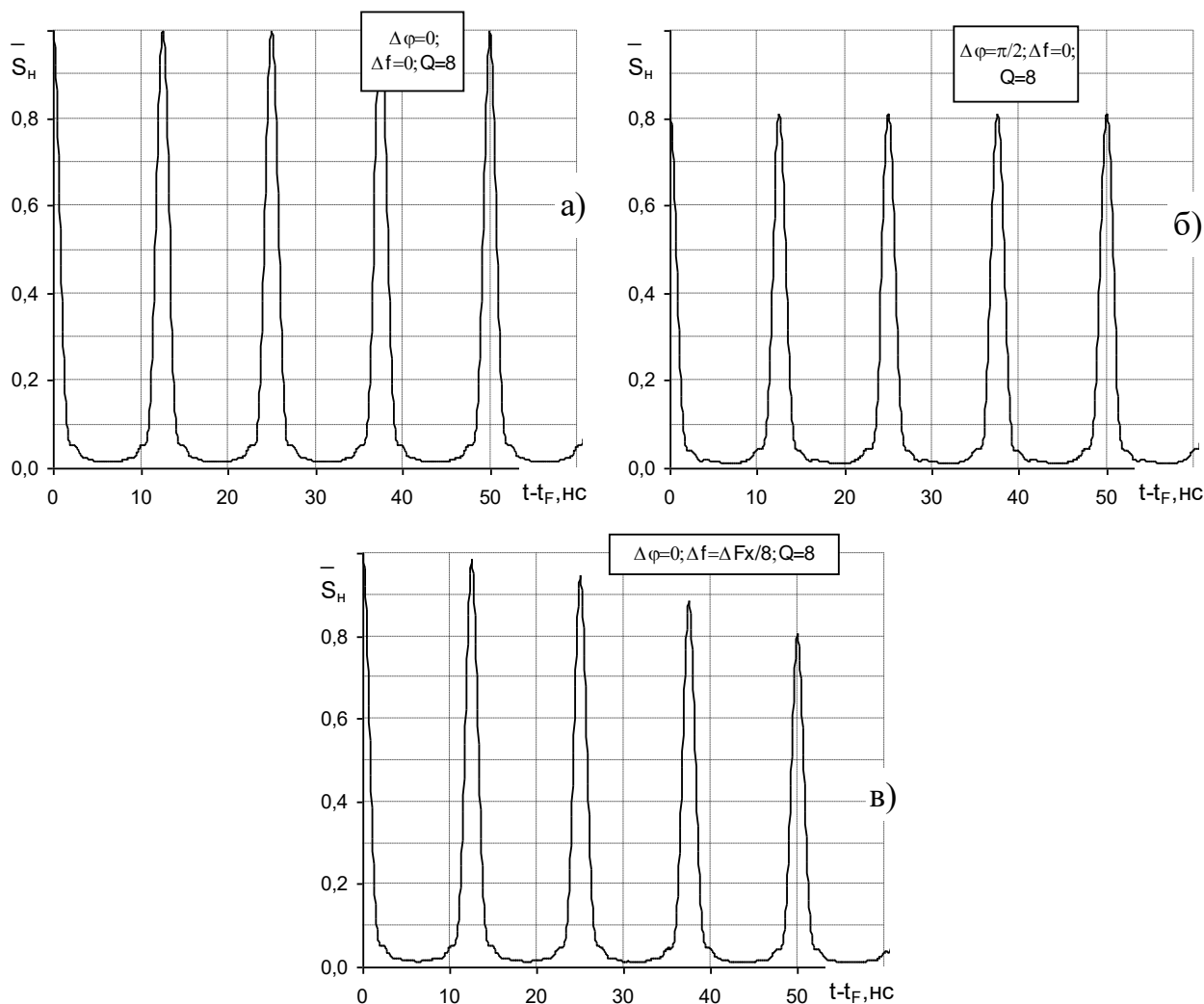


Рис. 2. Залежності математичного очікування нормованої щільності потоку потужності ФАР від помилок  $\Delta\varphi$  і  $\Delta f$ : а) за  $\Delta\varphi=0$ ,  $\Delta f=0$ ; б) за  $\Delta\varphi=\pi/2$ ,  $\Delta f=0$ ; в) за  $\Delta\varphi=0$ ,  $\Delta f=\Delta F_x/8$

Як видно з рис. 2, вплив помилок у встановленні заданої дискретності початкових фаз на характеристики сформованої послідовності ПЧІ не залежить від часу випромінювання. Вплив помилок у встановленні заданої дискретності несучих частот залежить від часу випромінювання, оскільки фазові помилки

$$\Delta\varphi_{0mn} = 2\pi f_{0mn}^{\Delta} (t - t_F),$$

зумовлені неточністю встановлення несучих частот випромінюваних сигналів, наростають із часом. На рис. 3 наведено залежності математичного очікування нормованого значення щільності потоку потужності випромінювання плоскої ФАР  $\bar{S}_n$  від часу спостереження з урахуванням максимального значення помилки встановлення опорних частот  $\Delta f = 2,0$  МГц у разі використання багатоступеневого V-подібного закону розподілу частот за апертурою (див. (4)) з максимальними розносами несучих частот  $\Delta F_{\max}$ , рівними 160, 320 МГц.

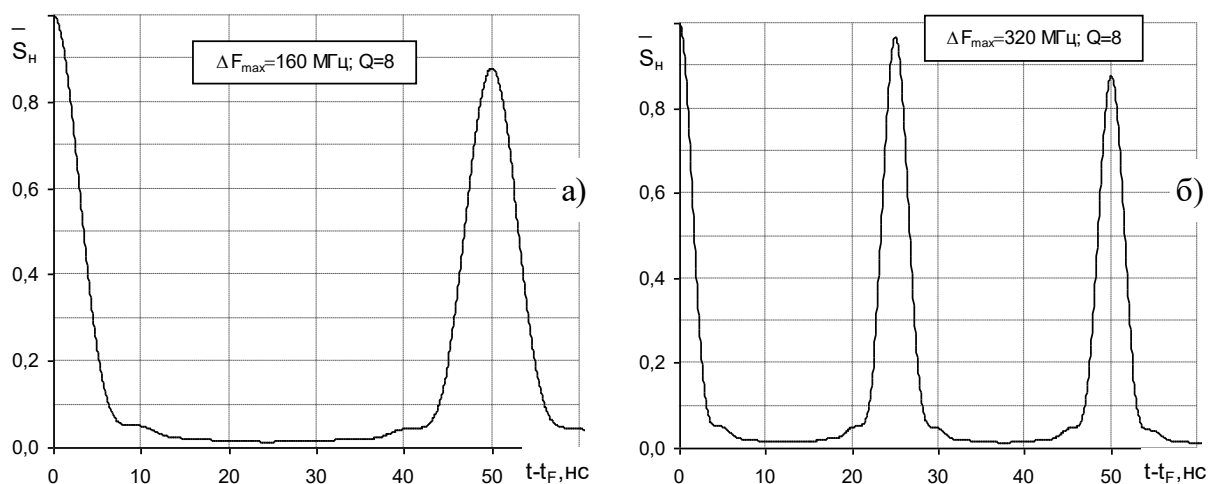


Рис. 3. Залежності математичного очікування нормованої щільності потоку потужності ФАР від часу випромінювання за  $\Delta f=2,0$  МГц: а –  $\Delta F_{\max}=160$  МГц; б –  $\Delta F_{\max}=320$  МГц

Аналіз рис. 3 показує, що вплив помилок встановлення несучих частот не залежить від обраного значення максимального розносу несучих частот за апертурою та визначається значенням помилки встановлення несучої частоти у випромінювальних елементах  $\Delta f$  (або абсолютною нестабільністю частоти).

На рис. 4 наведено залежність математичного очікування нормованого значення щільності потоку потужності випромінювання плоскої ФАР від значень абсолютної нестабільності частоти  $\Delta f$  і різних значень тривалості пачки ПЧІ. Як видно з рис. 4, при врахуванні впливу помилок встановлення несучої частоти у випромінювальних елементах необхідно враховувати тривалість сформованої пачки ПЧІ. Як відомо [12, 13], в наявних передавальних пристроях сантиметрового діапазону хвиль значення довготривалості (за кілька годин і до доби) відносної нестабільності частоти забезпечується на рівні  $10^{-5} \dots 10^{-6}$ , а короткочасної (за час до одиниць хвилин) – може досягати значень  $10^{-10} \dots 10^{-12}$  [13]. З урахуванням цього тривалість пачки ПЧІ, за якої густина потоку потужності знижується не більше ніж на 10 % через помилки встановлення несучої частоти у випромінювальних елементах ФАР, можна вибирати з умови  $\Delta f T \leq 0,1$ , де  $T = nT_{пчї}$  тривалість пачки періодичної послідовності  $n$  сформованих ПЧІ.

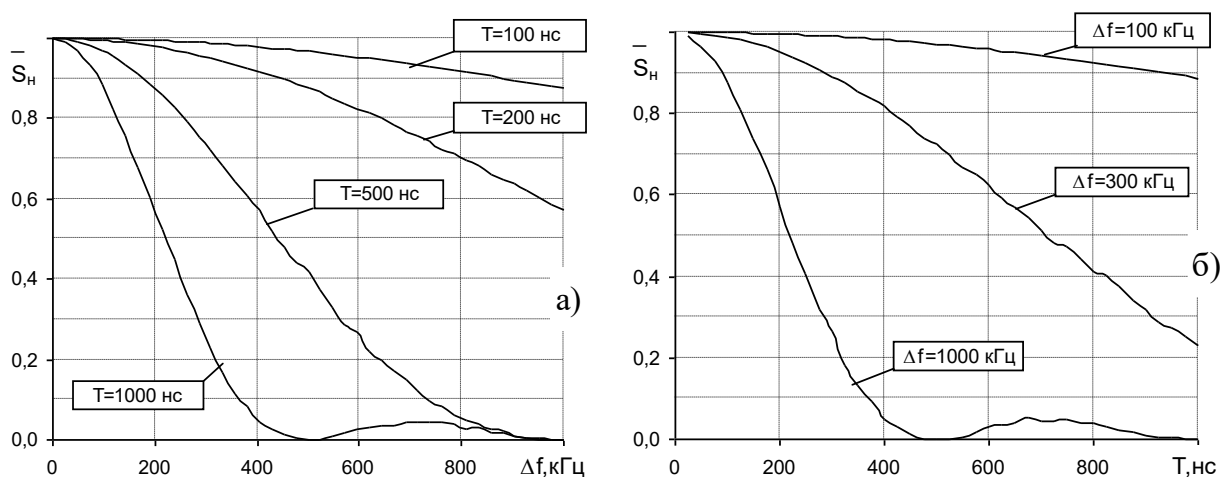


Рис. 4. Залежність математичного очікування нормованої щільності потоку потужності випромінювання плоскої ФАР: а – від тривалості пачки ПЧІ; б – від  $\Delta f$

На рис. 5 наведено залежність  $\bar{S}_n$  у напрямку нормалі до розкриття ФАР від максимальних значень помилок встановлення початкових фаз для точки фокусування  $z_F = z_d$ . Як

видно з рис. 5, область допустимих значень максимальних помилок встановлення початкових фаз  $\Delta\varphi$  за апертурою плоскої ФАР, у якій зменшення значення  $\bar{S}_H$  не перевищує 10 %, визначається з умови

$$\Delta\varphi \leq \pi/3. \quad (7)$$

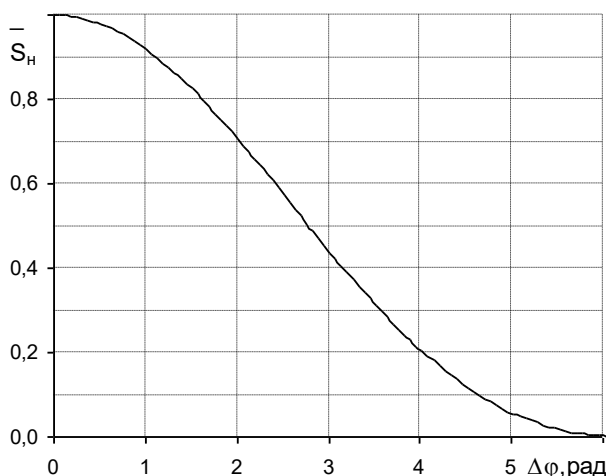


Рис. 5. Залежність математичного очікування нормованої щільності потоку потужності випромінювання ФАР від помилок  $\Delta\varphi$  за умови  $z_F=z_d$

Проведене математичне моделювання показує, що дискретність і випадкові помилки встановлення початкових фаз сигналів у передавальних каналах плоскої ФАР, що дорівнюють  $\Delta\varphi = \pi/3$ , практично не впливають на тривалість і період повторення послідовності ПЧІ.

### Висновки

1. Розглянуті помилки розташування випромінювачів за апертурою ФАР у площині  $XOY$  впливають на рівень щільності потоку потужності ЕМВ. Найсуттєвіше це позначається в першій половині зони Френеля. Зі збільшенням дальності до точки фокусування  $z_F \geq 0,5z_d$  вплив цих помилок стає менш істотним. Вплив помилок розташування фазових центрів випромінювачів по осі  $OZ$  не залежить від дальності до точки фокусування. Область допустимих значень  $\Delta\rho$  і  $\Delta h$ , в якій зменшення значення  $S_H$  не перевищує 10 %, визначається з таких умов:  $\Delta\rho \leq \lambda$  і  $\Delta h \leq \lambda/6$ .

2. Вплив помилок установки початкових фаз на характеристики сформованої послідовності ПЧІ не залежить від часу випромінювання. Область допустимих значень максимальних помилок встановлення початкових фаз  $\Delta\varphi$  за апертурою плоскої ФАР, у якій зменшення значення  $S_H$  не перевищує 10 %, визначається з умови  $\Delta\varphi \leq \pi/3$ . Дискретність і випадкові помилки встановлення початкових фаз окремих джерел випромінювання плоскої ФАР, що дорівнюють  $\Delta\varphi = \pi/3$ , практично не впливають на тривалість і період повторення послідовності ПЧІ.

3. Вплив помилок встановлення несучих частот залежить від тривалості випромінювання, оскільки фазові помилки, зумовлені неточністю встановлення несучих частот випромінюваних радіоімпульсів, наростають із часом. Аналіз помилок встановлення несучих частот у каналах плоскої ФАР показав, що їхній вплив не залежить від обраного значення максимального розносу несучих частот за апертурою та визначається значенням помилки встановлення несучої частоти у випромінювальних елементах (або абсолютною нестабільністю частоти). Тривалість пачки ПЧІ, за якої щільність потоку потужності знижується не більше ніж на 10 % через помилки встановлення несучих частот у випромінювальних елементах ФАР, обирається з умови  $\Delta f T \leq 0,1$ , де  $T = nT_{n\text{чi}}$  – тривалість пачки періодичної послідовності  $n$  сформованих ПЧІ.

### Список літератури:

1. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. Москва : Высш. шк., 1988. 432 с.
2. Зиолковски Р.В. Новые импульсы направленной электромагнитной энергии // SPIE. Microwave and Particle Beam Sources and Propagation. 1988. Vol. 873.
3. Фельсен Л.В., Хейшан Е. Методы фокусировки луча от распределенных апертур // SPIE. Microwave and Particle Beam Sources and Propagation. 1988. Vol.873.
4. Содин Л.Г. Характеристики импульсного излучения антенн (электромагнитного снаряда) // Радиотехника и электроника. 1992. Т.37, № 5. С. 849–857.
5. Гомозов В.И., Гомозов А.В. Новый метод фокусировки электромагнитных излучений // Антенны. 2001. Вып. 3(49). С. 54-60.
6. Гомозов В.И., Гомозов А.В. Титов С.В. Пространственно-фазово-частотная фокусировка сигналов в плоских ФАР при V-образной дискретизации частот // Радиотехника. 2001. Вып. 122. С. 201–207.
7. Гомозов В.И., Гомозов А.В., Титов С.В. Метод формирования последовательностей сфокусированных пространственно-временных импульсов при использовании многоступенчатого V-образного распределения частот по апертуре плоских ФАР // Радиотехника. 2002. Вып. 130. С. 33–38.
8. Сканирующие антенные системы СВЧ. Т.1 ; пер. с англ. под ред. Г.Т.Маркова и А.Ф. Чаплина. Москва : Сов. радио, 1966. 536 с.
9. Шифрин Я.С. Вопросы статистической теории антенн. Москва : Сов. радио, 1970. 384 с.
10. Маляревский Н.М. Погрешность измерения вероятностей // Известия вузов. 1962. № 2. С. 73–76.
11. Рабинович Б.Е. Методика суммирования частных погрешностей в области радиотехнических измерений // Вопросы радиоэлектроники. Сер. VI. Радиоизмерительная техника // Науч.-техн. сб. 1961. Вып. 4. С. 3–20.
12. Kovalenko A., Titov S., Titova E., Cherna O. Estimation of requirements to signal parameters at V-shaped frequency distribution in mathematical model of multi-position transmitter system // Radiotekhnika. 2022. No209. P. 178–184. DOI: 10.30837/rt.2022.2.209.17
13. Уманский В.С. Усилительный тракт импульсных передающих устройств СВЧ. Москва : Сов. радио, 1973. 256 с.
14. Гомозов А.В., Гомозов В.И., Ермаков Г.В., Титов С.В. Фокусировка электромагнитного излучения и ее применение в радиоэлектронных средствах СВЧ ; под ред. В.И. Гомозова. Харьков : КП «Городская типография», 2011. 330 с.
15. Математическое и информационное обеспечение многоступенчатого V-образного управления частотой пространственно-распределенной передающей системы / С. В. Титов, Е. В. Титова // Системы обробки інформації. Харьков : ХУПС. 2016. Вип. 2(139). С. 63–67.

*Надійшла до редколегії 15.05.2023*

### *Відомості про авторів:*

**Коваленко Андрій Іванович** – канд. техн. наук, старший науковий співробітник, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри системотехніки, Україна; e-mail: [andrey.kovalenko@nure.ua](mailto:andrey.kovalenko@nure.ua); ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2882-5082>

**Тітов Сергій Володимирович** – канд. техн. наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри системотехніки, Україна; e-mail: [serhii.titov@nure.ua](mailto:serhii.titov@nure.ua); ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0910-4415>

**Тітова Олена Вігольдівна** – канд. техн. наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри інформатики, Україна; e-mail: [olena.titova@nure.ua](mailto:olena.titova@nure.ua); ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8894-2040>

**Чорна Ольга Сергіївна** – канд. техн. наук, Харківський національний університет радіоелектроніки, старший викладач кафедри системотехніки, Україна; e-mail: [olha.chorna@nure.ua](mailto:olha.chorna@nure.ua); ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6745-8137>