

УДК 681.5.075

Радзівілов Г. Д., канд. техн. наук, доц. (Тел. +380 (96) 189 30 57. E-mail: grigoriy_71@ukr.net)

Беляков Р. О., ад'юнкт (Тел.: +380 (93) 9190047. E-mail: france417@gmail.com)

(Державний університет телекомунікацій, ВІТІ, м. Київ)

МЕТОДИКА ПІДВИЩЕННЯ ШВИДКОДІЇ ТА ДИНАМІЧНОЇ ТОЧНОСТІ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ДІАГРАМОЮ НАПРАВЛЕНОСТІ АКТИВНИХ ФАЗОВАНИХ АНТЕННИХ РЕШІТОК

Радзівілов Г. Д., Беляков Р. О. **Методика підвищення швидкодії та динамічної точності систем автоматичного керування діаграмою направленості активних фазованих антенних решіток.** У статті представлено методику підвищення швидкодії та динамічної точності систем автоматичного керування діаграмою направленості активних фазованих антенних решіток. Використання запропонованої методики дозволяє істотно зменшити час перехідних процесів керування фазою сигналу, зменшити середньоквадратичну помилку системи при випадковій збурюючій дії. Запропоновано синтез розімкнутого зв'язку комбінованої системи та синтез диференціального зв'язку, що виконані у відповідності з умовами зменшення динамічної, середньоквадратичної помилки, та підвищення швидкодії системи автоматичного керування.

Ключові слова: активна фазована антенна решітка, система автоматичного керування, діаграма направленості, перехідний процес, середньоквадратична помилка

Радзівілов Г. Д., Беляков Р. О. **Методика повышения быстродействия и динамической точности систем автоматического управления диаграммой направленности фазированных антенных решеток.** В статье представлена методика повышения быстродействия и динамической точности систем автоматического управления диаграммой направленности активными фазированными антенными решетками. Использование предложенной методики позволяет существенно минимизировать время переходных процессов управления фазой сигнала, уменьшить среднеквадратическую ошибку системы при случайном возмущающем воздействии. Предложен синтез разомкнутой связи комбинированной системы и синтез дифференциальной связи, выполненные в соответствии с условиями уменьшения динамической, среднеквадратичной ошибки, и повышения быстродействия системы автоматического управления.

Ключевые слова: активная фазированная антенная решетка, система автоматического управления, диаграмма направленности, переходный процесс, среднеквадратичная ошибка

Вступ. Відомо, що показники якості радіоелектронних систем в значній мірі залежать від властивості конструктивно-електричних параметрів антенно-фідерних пристроїв [1]. Останнім часом набуває все більшої актуальності використання в перспективних радіотехнічних комплексах різного призначення (повітряні сили, військово морські сили) складних систем активних фазованих антенних решіток (АФАР), формуючих задану діаграму направленості при швидкому скануванні одночасно в широкому спектрі частот.

В роботах [2...4] пропонуються шляхи покращення показників якості перехідних процесів систем автоматичного керування. Запропоновано синтез розімкнутого зв'язку комбінованої системи та синтез диференціального зв'язку, що виконані у відповідності з умовами зменшення динамічної, середньоквадратичної помилки та підвищення швидкодії системи автоматичного керування. Результати досліджень можуть бути використані для оцінки показників під час побудови АФАР.

У [5] показано метод оцінки показників якості системи автоматичного керування (САК) діаграмою направленості (ДН) АФАР. В роботах [5, 6] було отримано розрахункові значення параметрів САК ДН АФАР. Таким чином, вище згадані методи можливо застосувати для розробки методики підвищення швидкодії та динамічної точності систем автоматичного керування ДН АФАР.

Метою роботи визначено розробка методики підвищення швидкодії та динамічної точності систем автоматичного керування ДН АФАР по критеріям мінімуму квадратичної інтегральної оцінки, середньоквадратичної помилки, та стійкості фази сигналу.

Необхідно провести оцінку показників якості (динамічної точності та швидкодії) систем автоматичного керування (САК) ДН АФАР, дослідити стійкість системи, визначити динамічні, середньоквадратичні помилки (СКП), та показники якості перехідних процесів побудованої імітаційної моделі у відповідності до [5, 6] з метою підтвердження висновків

про можливість підвищення швидкодії САК ДН АФАР за допомогою одного диференціального зв'язку середньоквадратичних, динамічних помилок, покращення показників якості перехідних процесів системи, що викликаються як задаючою, так і збурюючою дією, прикладеною до різних точок системи, виконано моделювання системи та системи диференційним зв'язком.

Можливість мінімізації СКП залежить від властивостей передаточної функції системи, яка в свою чергу залежить від принципу керування, у відповідності з яким побудована ця система. Для забезпечення вимог по імовірності безпомилкового побігового прийому сигналів у системах зв'язку, мають місце задачі удосконалення систем автоматичного керування діаграмою направленості на рухомих об'єктах, які містять у своєму складі складні рухоми АФАР.

У роботі особливу увагу приділено методам теорії автоматичного керування, для оцінки і підвищення показників якості системи автоматичного керування діаграмою направленості АФАР з метою покращення відношення сигнал/шум, коефіцієнта направленої дії антени, і як результат і ККД АФАР.

Як критерій використовується відхилення рівносигнального напрямку променя АФАР від напрямку на ретранслятор зв'язку (абонентської станції). Функція САК АФАР в свою чергу полягає у формуванні задаючих дій на вхід системи для реакції на збурюючі дії на систему автоматичного керування різного роду. Також під реакцією системи автоматичного керування діаграмою направленості АФАР на задаючі і збурюючі дії слід розуміти не миттєвий процес, що в свою чергу накладає негативний відбиток на швидкодію керування променем АФАР. Тобто задача зводиться до розрахунку середньоквадратичних помилок та квадратичних інтегральних оцінок системи, та їх вплив на коефіцієнти передачі ланок системи автоматичного керування.

Оцінку показників якості системи автоматичного керування ДН АФАР складно реалізувати в умовах випадкового середовища, коли користувач оточений відбивачами, які розсіюють його сигнал, і являє собою розподілене джерело з кутовими розмірами, що часто досягають декількох десятків градусів.

Підвищення якості САК ДН АФАР досягається за рахунок використання методів мінімізації СКП систем автоматичного керування, синтезу диференційних зворотніх зв'язків систем автоматичного керування, та методу оцінки показників якості системи автоматичного керування діаграмою направленості АФАР [5...7].

Розглянемо більш докладно характеристики антенних решіток, які використовуються в сучасних системах зв'язку. Як відомо [8...10], антенні решітки складаються з великої кількості випромінюючих елементів, розташованих відповідним чином один відносно одного. Коли сигнали, що надходять до всіх елементів, узгоджуються за амплітудою і фазою, утворюється промінь, перпендикулярний площини антенної решітки. Переміщення променів в просторі досягається відповідною зміною фаз сигналів в елементах антенної решітки.

На Рис. 1 наведена схема решітки, що складається з елементів з рівними відстанями між ними. У режимі передачі сигналів утворена діаграма направленості повинна утримуватись САК у напрямку на ретранслятор незалежно від характеру зміни його положення, та безпосередньо, положення антенного полотна самої АФАР.

Сигнал першого елемента вважається опорним з фазою ϕ_0 . Тоді різниця фаз для суміжних елементів дорівнює [8, 9]

$$\Delta\phi = (2\pi d_0 / \lambda) \sin \theta, \quad (1)$$

де d_0 – відстань між елементами антенної решітки; λ – довжина хвилі; θ – кут на ретранслятор.

Тоді вираз, що описує діаграму направленості 2-х елементної АФАР має вигляд

$$G(\theta) = A(1 + e^{j2\pi \frac{d \sin \theta}{\lambda_0}}). \quad (2)$$

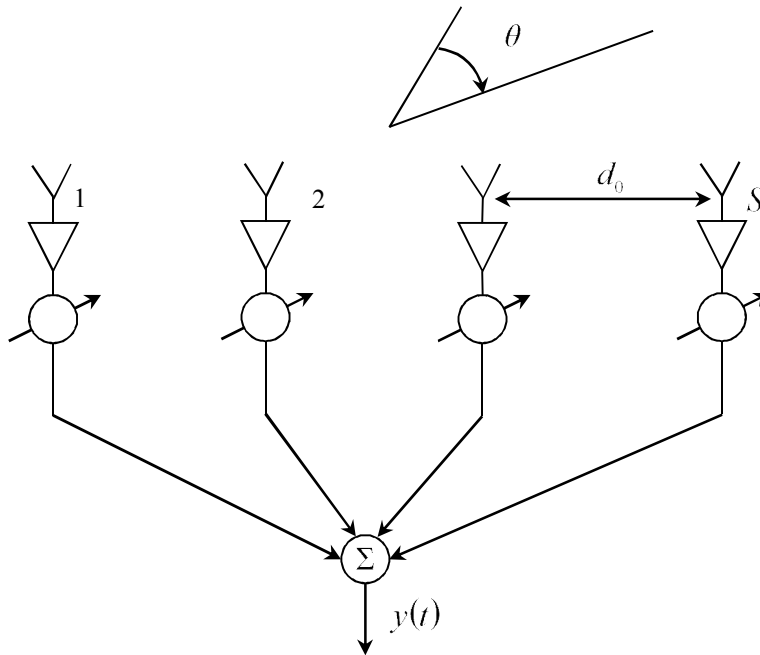


Рис. 1.

Для лінійної еквідистантної антенної решітки вираз що описує ДН приймає вигляд

$$G(\theta) = A \sum_{i=1}^N e^{j2\pi \frac{d \sin \theta (i-1)}{\lambda_0}},$$

де N – кількість елементів АФАР, що розташовані на одній відстані d .

Але з урахуванням того, що у кожному елементі АФАР (1) є фазообертач в лінійній антенній решітці сума сигналів з виходів елементів здійснюється з відповідними фазовими зсувами ψ_i , еквівалентними затримкою в часі.

Введення цих фазових зсувів призводить до зміщення максимуму ДН на кут

$$\theta_0 = \arcsin\left(\frac{1}{2\pi} \frac{\lambda_0}{d} \psi\right)$$

З урахуванням фазових зсувів в кожному елементі АФАР (1) та (2) формула для діаграми направленості приймає наступний вигляд

$$G(\theta) = A \sum_{i=1}^N e^{j\psi(i-1)} e^{j2\pi \frac{d \sin \theta (i-1)}{\lambda_0}}. \quad (3)$$

Таким чином, вираз (3) показує, що для формування головного пелюстка ДН на ретранслятор необхідно досягти високого ступеню запасу стійкості по фазі, незалежно від внутрішніх та зовнішніх збурюючих дій на САК ДН АФАР.

Обґрунтування і сутність методики підвищення швидкодії та динамічної точності САК ДН АФАР. Незважаючи на швидкий розвиток систем зв'язку із використанням АФАР, залишаються невирішеними питання підвищення їх ефективності в умовах внутрішніх та зовнішніх збурюючих дій САК ДН АФАР при збереженні керування амплітудою корисного сигналу (значення сигнал/шум). Негативний вплив збурюючих дій на САК ДН АФАР може бути значно послаблений за рахунок застосування адаптивних алгоритмів формування та обробки сигналів з використанням адаптивних антенних решіток [10...12].

Сутність розробленої методики полягає в автоматичному керуванні діаграмою направленості АФАР в залежності від напрямку на ретранслятор розміщений на літальному апараті з урахуванням обмеження положення ретранслятора та часу кореляції, за критерієм максимуму коефіцієнту направленої дії АФАР при виконанні обмежень на ймовірність помилок системи.

Постановка завдання.

Задано: параметри системи автоматичного керування ДН АФАР: $N = y$ (кількість прийомо-передавальних ППМ модулів АФАР або елементів АФАР); $k_i(p)$ – коефіцієнти підсилення САК ДН АФАР i -го елемента структурної схеми САК АФАР; T_i – сталі часу для i -ої ланки структурної схеми; $S_\beta(\omega)$ – спектральна щільність стаціонарної випадкової задаючої дії $\beta(t)$; $S_x(\omega)$ – спектральна щільність випадкової збуджуючої дії викликаної випадковим положенням полотна АФАР. Коефіцієнт підсилення системи автоматичного керування діаграмою направленості АФАР k_p по відхиленню вибирається у відповідності із методом мінімізації СКП ε_β [3,5].

Необхідно: визначити параметри САК ДН АФАР, які мінімізують СКП ε_x і квадратичну інтегральну оцінку I_x перехідних процесів, які впливають на точність встановлення головного пелюстка ДН АФАР при виконанні обмеження на значення ймовірності помилкового прийому сигналів $P_{\text{пом}} \leq P_{\text{пом доп}}$.

Обмеження: $\tau_{\text{кк}} \leq \tau_c$, де τ_c – тривалість групи сигналів; $\tau_{\text{кк}}$ – час кореляції сигналів; ймовірність помилкового прийому сигналів $P_{\text{пом}} \leq 10^{-6}$; $N = \text{const}$; $d = \text{const}$ – відстань до ретранслятора, .

Допущення: $\tau_{\text{рСАК}} \leq \tau_{G_{\text{П}}}$, час спрацювання скоректованої САК ДН ($\tau_{\text{рСАК}}$ не перевищує час якому відповідає потрібний рівень коефіцієнта підсилення АФАР $\tau_{G_{\text{П}}}$).

Завдання визначення значень параметрів САК ДН АФАР зводиться до оцінки СКП та квадратичних інтегральних оцінок системи автоматичного керування з диференціальним зворотнім зв'язком.

Система рівнянь для вирішення оптимізаційної задачі має вигляд:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = f(k_p) \rightarrow \min; \\ I_x = f(k_p) \rightarrow \min; \\ \psi_i \rightarrow \text{const}. \end{cases} \quad (4)$$

Методика підвищення динамічної точності та швидкодії системи автоматичного керування діаграмою направленості АФАР, схема алгоритму реалізації якої подана на Рис. 2, складається з наступних етапів.

Введення вихідних даних. Вводяться параметри $K_i(p)$ – передаточні функції за помилкою САК ДН АФАР i -го елемента структурної схеми САК АФАР; введення постійних часу для ланок САК T_i, c ; $G = G_{\text{П}}$.

Розрахунок показників якості САК ДН АФАР по напрямку на ретранслятор зв'язку.

1. Складання системи рівнянь що описує систему САК ДН АФАР з диференціальним зв'язком.

2. Розрахунок спектральної щільності вихідної САК ДН АФАР по задаючій і збуджуючій діях.

3. Розрахунок СКП по задаючій ε_β та збуджуючій ε_x діях системи.

4. Визначення коефіцієнта підсилення АФАР виходячи із умови мінімуму ε_β та ε_x .

5. Перевірка відповідності вимогам по критерію максимуму стабільності дискрету зміни фази сигналу ППМ АФАР $\psi_i \rightarrow \text{const}$ по результуючій КІО по задаючому впливу ($I_{\theta\beta} \rightarrow \min$) САК ДН АФАР, та перевірка його відповідності вимогам по $G = G_{\text{П}}$.

Побудова САК ДН АФАР з диференційним зв'язком у відповідності із методом оцінки показників якості САК ДН АФАР

1. Складання системи рівнянь, що описує систему САК ДН АФАР з диференційним зв'язком.
2. Перевірка тотожності складових помилки по задаючій і збурюючій діях, комбінованій САК ДН АФАР з метою визначення еквівалентності побудованої системи для безпосереднього розрахунку показників якості САК ДН.
3. Здійснення синтезу параметрів передаточних функцій ланок дифзв'язків у відповідності до умови мінімізації СКП і квадратичної інтегральної оцінки перехідної функції, викликаних задаючою дією - зміною азимута на ретранслятор.
4. Введення необхідної умови підвищення порядку астатизму.
5. Оцінка СКП та КЮ системи по випадковій задаючій дії.
6. Перевірка часу перехідних процесів САК внаслідок випадкової задаючої дії по критерію $\psi_i \rightarrow \text{const}$.
7. Оцінка СКП та КЮ системи по випадковій збурюючій дії.
8. Перевірка часу перехідних процесів САК внаслідок випадкової збурюючої дії по критерію $\psi_i \rightarrow \text{const}$.

В залежності від допустимих значень СКП САК ДН АФАР і вимог по стійкості цих систем вибираються ті або інші умови підвищення якості САК ДН АФАР [5...7]. У відповідності до вимог, що висуваються, відбувається синтез параметрів системи для оцінки та формування задаючих дій з метою забезпечення високого ступеню стабільності по критерію $\psi_i \rightarrow \text{const}$.

На Рис. 2. зображено алгоритм застосування методики підвищення швидкодії та динамічної точності САК ДН АФАР.

Початковим етапом застосування даної методики є розрахунок спектральної щільності помилок системи автоматичного керування діаграмою направленості АФАР (блок 1-2) за формулами:

$$- S_{\theta\beta}(\omega) = \left| \frac{K_{\theta\beta}(j\omega)}{j\omega} \right|^2 S_{\beta}(\omega) \text{ (по відхиленню);}$$

- $S_{\theta\chi}(\omega) = |K_{\theta\chi}(j\omega)|^2 S_{\chi}(\omega)$ (по задаючій дії, та по випадковій збурюючій дії).

Для розрахунку СКП (блок 3) використовуються формули:

$$- \varepsilon_{\beta} = \sqrt{\theta_{\beta}^{-2}} \text{ (по задаючій дії);}$$

$$- \varepsilon_{\chi} = \sqrt{\theta_{\chi}^2} \text{ (по збурюючій дії).}$$

Наступним кроком є визначення квадратичної інтегральної оцінки для задаючої і збурюючої дії за формулами:

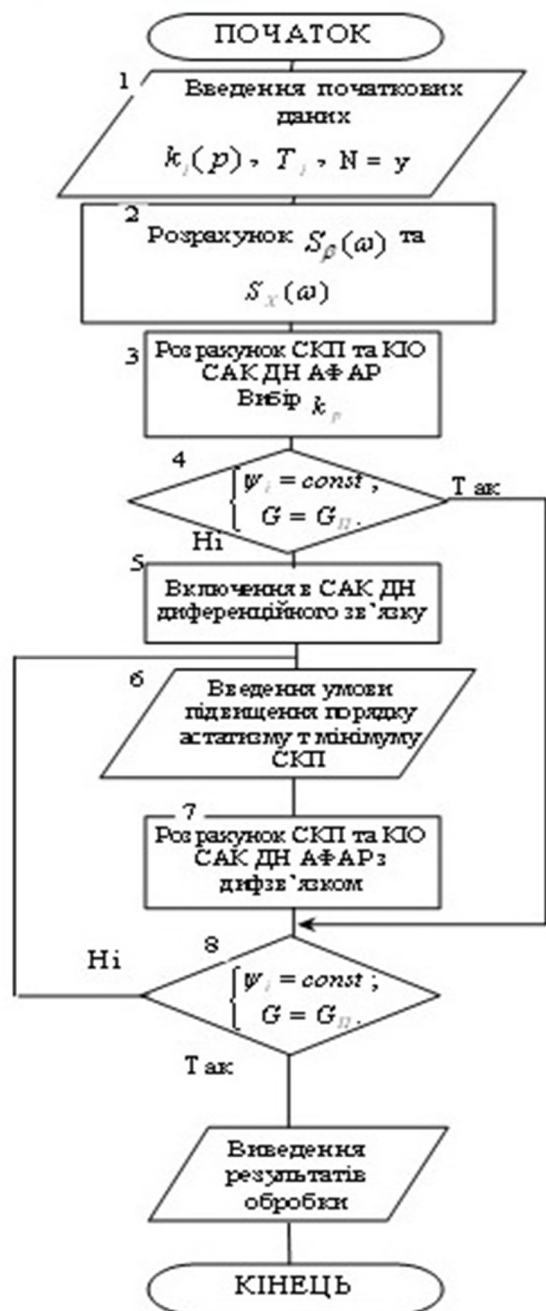


Рис. 2. Алгоритм

$$I_{\Pi\beta} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \left| K_{\theta\beta}(j\omega) \frac{1}{j\omega} \right|^2 d\omega, \quad I_{\Pi X} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \left| \frac{K_{\theta X}(j\omega) - K_{\theta X}(0)}{j\omega} \right|^2 d\omega.$$

Наступним етапом є перевірка відповідності вимогам по критерію максимуму стабільності дискрету зміни фази сигналу ППМ АФАР $\psi_i \rightarrow \text{const}$ по результируючій КІО по задаючому впливу ($I_{\theta\beta} \rightarrow \text{min}$) САК ДН АФАР, та перевірка його відповідності вимогам по $G = G_{II}$ (блок 4).

У випадку, коли компромісного вибору параметрів САК ДН АФАР не достатньо для реалізації $\psi_i \rightarrow \text{const}$, $G = G_{II}$ в систему автоматичного керування вводимо диференційний зв'язок побудований, відповідно, до методу оцінки показників якості САК ДН АФАР [5] та мінімізації СКП [6, 7], система автоматичного керування у такому випадку матиме вигляд системи автоматичного керування з диференційним зв'язком, що складається із двох ланцюгів: ділянки I (прямий ланцюг з передаточною функцією $\frac{p}{Tp+1}$) і ділянки II (позитивний зворотний зв'язок, що містить моделі ланок $K_1(p)$ і $K_3(p)$ ланка з передаточною функцією $\frac{1}{Tp+1}$), суматора $\Sigma 3$ і загального елементу з передаточною функцією $K_B(p)$. Сигнал $U_3(t)$ з виходу суматора $\Sigma 3$ через загальну коректуючу ланку $K_B(p)$ поступає на суматор $\Sigma 4$ де складається з перетвореною напругою $U_2(t)$ сигналу помилки $\theta(t)$.

Система рівнянь, що описує запропоновану структурну схему автоматичного керування діаграмою направленості АФАР, має вигляд:

$$\theta(p) = \alpha(p) - \beta(p);$$

$$U_4(p) = K_1(p)K_2(p)\theta(p) + K_1(p)\frac{p}{Tp+1}K_B(p)\theta(p) + K_3(p)K_1(p)\frac{1}{Tp+1}K_B(p)U_4(p);$$

$$\beta(p) = K_3(p)\frac{1}{p}U_4(p) - K_5(p)\frac{1}{p}X(p).$$

Розрахунок проведений з використанням [5], показав, що комбінована САК ДН АФАР еквівалентна побудованій системі з диференційним зв'язком, що дає можливість оцінити випадкові збурюючі дії, прикладені не на вхід системи.

Наступним кроком є розрахунок коефіцієнтів (сталих часу перехідних процесів) системи з диференційним зв'язком ($\tau_\beta = \tau_2/\tau_1$, $\tau_X = \tau_{0X}/\tau_{1X}$), та введення умови порядку астатизму.

$$\text{Тут } \theta_{\alpha d}(p) = \frac{1 - K_3(p)K_1(p)\frac{1}{Tp+1}K_B(p)}{1 + K_1(p)K_2(p)K_3(p)\frac{1}{p}}\alpha(p) \text{ та } \theta_{Xd}(p) = \frac{1 - K_3(p)K_1(p)\frac{1}{Tp+1}K_B(p)}{1 + K_1(p)K_2(p)K_3(p)\frac{1}{p}}K_5(p)\frac{1}{p}X(p) -$$

– складові помилки викликані задаючою $\beta(t)$ і збурюючою діями $X(t)$.

Ланки $K_B(p)$ і $1/(Tp+1)$ диференціального зв'язку не входять в характеристичне рівняння замкнутого контуру САК і тому їх можна вибирати відповідно до умови підвищення показників якості системи, зокрема з умовами мінімізації СКП і квадратичної інтегральної оцінки.

Тобто, ці ланки не впливають на стійкість замкнутого контура системи. Звідси можна зробити висновок, що система з диференційним зв'язком еквівалентна комбінованій системі з розімкненими зв'язками по задаючій дії $\beta(t)$ і збурюючій $X(t)$.

Після розрахунку СКП та КЮ комбінованої САК ДН АФАР з розімкненими зв'язками по задаючій і збудуючій дії еквівалентної САК з диференційним зв'язком знову перевіряється виконання умови стабільності фазових зсувів ($\psi_i \rightarrow \text{const}$) ППМ АФАР.

Розраховані значення показників САК зведені до Табл. 1.

Новизна розробленої методики полягає в тому, що мінімізація СКП та КЮ систем автоматичного керування ДН АФАР здійснюється завдяки принципу побудови системи автоматичного керування з диференційним зворотнім зв'язком по критерію стабільності фазових зсувів на кожному з модулів АФАР.

Розраховані значення СКП та КЮ САК ДН АФАР

Табл. 1

k_p	2	6	12	60	134	200	300	420
$\varepsilon_{\alpha\Delta}$	$1.367 \cdot 10^{-3}$	$1.367 \cdot 10^{-3}$	$1.366 \cdot 10^{-3}$	$1.371 \cdot 10^{-3}$	$1.423 \cdot 10^{-3}$	$1.5 \cdot 10^{-3}$	$1.801 \cdot 10^{-3}$	$4.031 \cdot 10^{-3}$
$\varepsilon_{\alpha} / \varepsilon_{\alpha\Delta}$	1515	513.5	257.9	51.6	22.434	14.183	7.224	1.32
$I_{\text{ПВД}}$	$42.27 \cdot 10^{-3}$	$5.069 \cdot 10^{-3}$	$5.264 \cdot 10^{-3}$	$6.224 \cdot 10^{-3}$	$9.229 \cdot 10^{-3}$	0.014	0.025	0.161
$I_{\text{ПВ}} / I_{\text{ПВД}}$	51.837	17.641	9.087	2.212	1.238	0.231	0.79	0.686
$\varepsilon_{\text{ХД}}$	$7.747 \cdot 10^{-4}$	$7.425 \cdot 10^{-4}$	$7.347 \cdot 10^{-4}$	$6.802 \cdot 10^{-4}$	$6.222 \cdot 10^{-4}$	$6.137 \cdot 10^{-4}$	$6.584 \cdot 10^{-4}$	$1.312 \cdot 10^{-3}$
$\varepsilon_{\text{Х}} / \varepsilon_{\text{ХД}}$	465.80	177.26	22.69	20.769	10.253	6.232	4.385	1.361
$I_{\text{ПВД}}$	$5.62 \cdot 10^{-7}$	$5.53 \cdot 10^{-7}$	$5.4 \cdot 10^{-7}$	$4.62 \cdot 10^{-7}$	$3.22 \cdot 10^{-7}$	$3.75 \cdot 10^{-7}$	$4.307 \cdot 10^{-7}$	$1.701 \cdot 10^{-6}$
$I_{\text{ПВ}} / I_{\text{ПВД}}$	1.621	6.25	1.22	8.30	2.068	1.156	0.72	0.68

Ефективність застосування розробленої методики оцінюється за формулою

$$\Delta P_E = \frac{P_E^* - P_E}{P_E} 100\%,$$

де P_E^* – коефіцієнт використання потужності сигналу із застосуванням запропонованої методики; P_E – коефіцієнт використання потужності сигналу без адаптивної зміни параметрів АФАР.

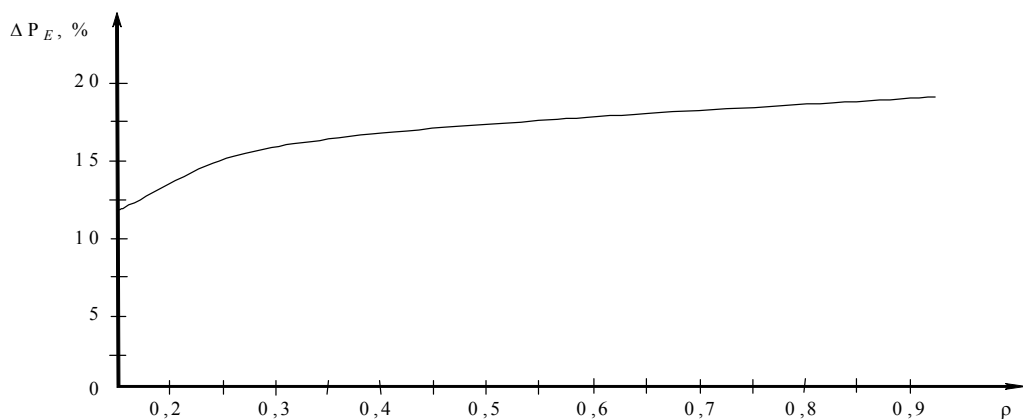


Рис. 3. Графік визначення ефективності запропонованої методики

На рис. 3 показана залежність ΔP_E від коефіцієнту $\rho = \frac{\psi_i}{\Delta\phi}$, де ψ_i – показник фазової корекції i -го елемента АФАР; $\Delta\phi$ – дискрет встановлення фази сигналу АФАР.

Результати моделювання показують, що застосування запропонованої методики дозволяє підвищити енергетичну ефективність АФАР при випадкових збурюючих діях $X(t)$ на 7-12 %.

Висновки. Для побудови багатофункціональних радіосистем з використанням активних фазованих антенних решіток, що відрізняється наявністю в кожному каналі решітки пристроїв регулювання фазового зсуву і амплітуди сигналу, тобто параметрів, що визначають напрям головного пелюстка діаграми направленості АФАР на вході випромінювачів, необхідно здійснювати керування діаграмою направленості АФАР з гранично високою точністю.

Використання традиційних систем автоматичного керування діаграмою направленості, дозволяють додатково зменшити як динамічні сталі помилки але не враховують необхідності компромісного вибору коефіцієнта підсилення, що призведе до зменшення діапазону керування діаграмою направленості на виході АФАР, та зменшення коефіцієнту корисної дії прийомо-передавального модуля АФАР.

Тому для систем автоматичного керування діаграмою направленості АФАР здійснюється за наступними критеріями керування (адаптації):

- максимальне відношення корисний сигнал/шум-перешкода;
- оптимальне подавлення перешкоди;
- найменше відхилення сигналу, що приймається, від пілот-сигналу.

Проведений аналіз сучасної системи автоматичного керування ДН АФАР по напрямку на ретранслятор зв'язку показав, що сучасна система керування параметрами складних антенних систем не завжди задовольняє вимогам по безпомилковому зв'язку, що пов'язано із стрімким розвитком новітніх засобів та мереж зв'язку в цілому.

У системі автоматичного керування діаграмою направленості АФАР з принципом керування по відхиленню, в якій випадкова задаюча і збурююча дія прикладені в різних точках системи, має місце суперечність між умовами мінімізації СКП ε_α і квадратичної інтегральної оцінки $I_{\Pi\alpha}$ перехідної функції, що викликаються задаючою дією $\alpha(t)$, а також між умовами мінімізації СКП ε_X і квадратичної інтегральної оцінки $I_{\Pi X}$ що викликаються збурюючою дією $X(t)$.

У випадках, коли не представляється можливість безпосереднього вимірювання задаючої та збурюючої дії $\alpha(t)$, $X(t)$, а вимоги по вибраним критеріям не виконуються, ситуація вимагає покращення показників якості системи автоматичного керування ДН АФАР, а використання класичної схеми САК по відхиленню стає не прийнятним. Використовуючи схему побудови комбінованої системи з розімкненими компенсаційними зв'язками по задаючій і збурюючій діям, з використанням методу компромісного вибору параметрів системи автоматичного керування (коефіцієнту підсилення та середньоквадратичних помилок системи), можливе непряме вимірювання цих дій за допомогою використання методу оцінки показників якості САК ДН АФАР.

У роботі показані нові можливості істотного підвищення точності системи автоматичного керування діаграмою направленості АФАР по азимуту на ретранслятор шляхом введення в систему диференціального зв'язку. За допомогою останньої здійснюється непряме вимірювання задаючої і збурюючої дій.

Завдяки синтезу диференціального зв'язку, виконаному відповідно до умов мінімізації середньоквадратичних помилок ε_α і ε_X і умовами мінімізації квадратичних інтегральних оцінок перехідних процесів $I_{\Pi\alpha}$ і $I_{\Pi X}$ що викликаються задаючою і збурюючою діями по критерію точності встановлення фази сигналу ψ_i вдалося:

- усунути суперечність між умовами мінімізації ε_α і $I_{\Pi\alpha}$, а також ε_X і $I_{\Pi X}$, істотно підвищити точність відтворення випадкової задаючої дії (при $k_p = 134$ $\varepsilon_\alpha/\varepsilon_{\alpha Д} = 22.434$);

- зменшити вплив збурюючої дії $X(t)$ (при $k_p = 134$ $\varepsilon_x / \varepsilon_{хд} = 10.253$);
- покращити якість перехідних функцій, що викликаються задаючою β_p і збурюючою $X(t)$ діями (при $k_p = 134$ $I_{п\alpha} / I_{п\alpha д} = 1.238$, $I_{пх} / I_{пх д} = 2.068$).

Запропонована методика підвищення швидкодії та динамічної точності системи автоматичного керування діаграмою направленості АФАР дозволяє здійснювати поетапне керування параметрами системи в залежності від ступеню задоволення потреб по максимуму відношення сигнал/шум на ретрансляторі.

Результати моделювання показали, що застосування запропонованої методики дозволяє підвищити енергетичну ефективність АФАР при випадкових збурюючих діях $X(t)$ на 7-12 %.

Література

1. Воскресенский Д. И. Активные фазированные антенные решетки / Д. И. Воскресенский. – Москва : Радиотехника, 2004. С. 24-31.
2. Зайцев Г. Ф. Минимизация среднеквадратических ошибок и квадратичных интегральных оценок следящих систем с помощью разомкнутых и дифференциальных связей / Г. Ф. Зайцев, В. Г. Кривуца, В. Л. Булгач, Г. Д. Радзивиллов. Київ : ДУІКТ, 2006. – 185 с.
3. Зайцев Г. Ф. Противоречие между условиями минимизации СКО и квадратичной интегральной оценки в следящих системах с принципом управления по отклонению / Г. Ф. Зайцев, Г. Д. Радзивиллов // Проблемы управления и информатики. – 2004. – № 1. – С. 48-59.
4. Зайцев Г.Ф. Повышение показателей качества корреляционных систем / Г. Ф. Зайцев, Л. В. Булгач, Н. В. Градобоева, А. В. Сайко // Мат. VIII наук. конф. «Сучасні тенденції розвитку технологій в комунікаціях та освіти», Київ, 24-25 листопада 2011 р. – Київ : ДУІКТ, 2011. – С. 226-231.
5. Беляков Р. О. Метод оцінки показників якості системи автоматичного керування діаграмою направленості фазованої антенної решітки / Р. О.Беляков, Г. Д. Радзівілов, О. І. Остапук [та ін.] // Збірник наукових праць ВІТІ. – 2014. – № 1. – С. 6-12.
6. Зайцев Г. Ф. Минимизация среднеквадратических ошибок в следящих системах / Г. Ф. Зайцев, Г. Д. Радзивиллов // Проблемы управления и информатики. – 2004. – № 6. – С. 62-72.
7. Кривуца В. Г. Синтез связи по задающему воздействию комбинированной следящей системы в соответствии с условиями минимизации СКО / В. Г. Кривуца, Г. Ф. Зайцев, Г. Д. Радзивиллов // Вісник Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій. – 2003. – Т1, №1. – С.9-17.
8. Вендик О. Г. Антенны с электрическим сканированием / О. Г. Вендик. Москва : САЙНС-ПРЕСС, 2002. – 48 с.
9. Хансен Р. С. Фазированные антенные решетки / Р. С. Хансен ; пер. с англ. А. И. Синани]. – Москва : Техносфера, 2013. – 23-41 с.
10. Воскресенский Д. И. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток / Д. И. Воскресенский. – Москва: Наука, 2012. – 57-86 с.
11. Krim H. Two Decades of Array Signal Processing Research / H. Krim, M. Viberg // IEEE Signal Processing Magazine. – July 1996. – P. 67-94.
12. Reed I. S. Brief history of adaptive arrays / I. S. Reed // MILCOM'85: IEEE Mil. Commun. Conf., Boston, Mass., Oct.20 23, 1985. Conf. Rec. Vol. 2-3. – New York, N.Y., 1985. – P. 515-518.

Дата надходження в редакцію: 02.04.2015 р.

Рецензент: д.т.н., проф. С. В. Толюпа