

УДК.621.396.988

В.А. Дорошук, О.П. Кулик, О.В. Нікітін, І.В. Тітов

*Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків*

## КУТОМІРНА РАДІОНАВІГАЦІЙНА СИСТЕМА “ПАР-АРК” НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ ШИРОКОСМУГОВИХ СИГНАЛІВ

*В статті розглянуті питання підвищення завадостійкості кутомірної радіонавігаційної системи “ПАР – АРК” на основі використання широкосмугових сигналів та оптимальних методів обробки. Розроблено структурну схему комплексу бортового та наземного обладнання системи “ПАР – АРК”, який має краєву потенційну точність, скритність та завадостійкість при використанні кореляційних методів обробки сигналів.*

**Ключові слова:** кутомірна радіонавігаційна система, завадостійкість, широкосмуговий сигнал, база сигналу.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Розширення та ускладнення кола задач, що вирішуються авіацією, значний обсяг інформації, зростання часу, необхідного для аналізу та прийняття рішень пілотам, зростання вимог до безпеки польотів, призводить до необхідності удосконалення засобів радіосвітлотехнічного забезпечення (РТЗ) польотів авіації на всіх етапах польоту літальних апаратів (ЛА).

Основними радіотехнічними засобами РТЗ польотів авіації, що розміщуються на аеродромі, є: приводні аеродромні радіостанції (ПАР); автоматичний радіопеленгатор (АРП); азимутально-далекомірний радіомаяк радіотехнічної системи ближньої навігації (РСБН); радіомаячна система інструментального заходу ЛА на посадку (дециметрового та/або метрового діапазонів радіохвиль); маркерні радіомаяки; радіолокаційна система посадки ЛА (або аеродромні оглядовий, вторинний та посадковий радіолокатори); обладнання пунктів управління повітряним рухом у районі аеродрому; обладнання зв'язку; обладнання об'єктивного контролю.

Приводна аеродромна радіостанція, що є всеспрямованим радіомаяком (РМ), у сукупності з автоматичним радіокомпасом (АРК) утворює кутомірну радіонавігаційну систему (КРНС) “ПАР-АРК”. Вона призначена для автоматичного вимірювання на борту ЛА курсового кута радіостанції (ККР) з метою вирішення ряду навігаційних задач (навігації та посадки ЛА). РСБН, ПРМГ, РСП та АРП, які разом з бортовим радіоелектронним обладнанням відповідно утворюють кутомірно-далекомірну та кутомірну радіонавігаційні системи (РНС), мають кращі у порівнянні з РНС “ПАР-АРК” точнісні характеристики. Але ця обставина не знижує ролі КРНС “ПАР-АРК” в забезпеченні польотів авіації через наступні чинники:

– дублювання радіонавігаційних систем підвищує надійність і живучість засобів радіосвітлотехнічного забезпечення в цілому;

– робота КРНС “ПАР-АРК” у середньохвильовому діапазоні (РСБН, ПРМГ, РСП працюють у де-

циметровому діапазоні хвиль) надає можливість одержувати навігаційну інформацію в умовах сильної іонізації атмосфери, відсутності візуального контакту між екіпажами ЛА і радіонавігаційним пунктом (РНП), а також при польотах ЛА на малих висотах;

– достатня мобільність ПАР і необов'язковість точної топогеодезичної прив'язки при розгортанні на позиції після перебазування, дозволяє у короткий час забезпечити перебазування авіаційної частини з одного аеродрому на інший.

Водночас КРНС “ПАР-АРК” має і суттєві недоліки – низьку завадостійкість та недостатню прихованість роботи. Це впливає на зменшення дальності дії і точнісні характеристики при зростанні рівня завад, або ж призводить до зриву спостереження АРК за напрямком прийому сигналу від всеспрямованого радіомаяка.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій.

В [1, 2] запропоновані методи застосування шумоподібних сигналів (ШПС), що дозволяють досягнути високої завадозахищеності та прихованості радіоліній, отримати ефективне використання ШПС у визначеному частотному діапазоні. Але в літературі недостатньо висвітлені технічні аспекти реалізації ШПС, зокрема в кутомірних радіонавігаційних системах.

**Формулювання мети статті.** Стаття має на меті висвітлення одного з можливих варіантів підвищення завадостійкості кутомірної радіонавігаційної системи “ПАР – АРК” на основі використання ШСС та оптимальних методів їх обробки.

### Викладення основного матеріалу

Підвищення завадостійкості та прихованості роботи КРНС “ПАР-АРК” вбачається можливим завдяки використанню складних широкосмугових сигналів. Завдяки використанню даних сигналів і сучасної елементної бази з'являється можливість покращення таких технічних характеристик КРНС “ПАР-АРК” як завадостійкість, прихованість (за рахунок зниження потужності випромінювання пе-

редавача), обсяг інформації, що передається на борт ЛА (передавання додаткової інформації), вагогабаритні показники (значне зниження їх).

Завадостійкість ШСС визначається співвідношенням, яке зв'язує відношення сигнал - завада на виході приймача  $q^2$  з відношенням сигнал-завада на вході приймача  $\rho^2$  радіолінії:

$$q^2 = 2V\rho^2, \quad (1)$$

де  $\rho^2 = P_c/P_3$ ,  $P_c$ ,  $P_3$  – потужність ШСС сигналу і завади;  $q^2 = 2E/N_3$ , а  $E$  – енергія ШСС;  $N_3$  – спектральна щільність завади в смузі ШСС.

Відношення сигнал/завада  $q^2$  визначає робочі характеристики прийому ШСС, а відношення  $\rho^2$  енергетику сигналу та завади. Велике  $q^2$  може бути отримане виходячи відповідно до вимог, що пред'являються до КРНС (10...30 дБ), адже якщо  $\rho^2 \ll 1$  можливо вибрати ШСС з необхідною базою. Як видно із співвідношення (1), прийом ШСС з використанням узгодженої фільтрації або кореляційної обробки сигналів супроводжується підсиленням сигналу у  $2V$  разів. Тому співвідношення (2) називають коефіцієнтом підсилення при обробці сигналу:

$$K_{\text{шсс}} = q^2/\rho^2. \quad (2)$$

Всі ці співвідношення дійсні для завади, яка має вигляд випадкового гаусівського процесу з рівномірною спектральною щільністю потужності.

Таким чином, основним призначенням КРНС з ШСС є забезпечення надійного прийому інформації при дії потужних завад, коли співвідношення сигнал-завада  $\rho^2$  на вході приймача АРК може бути значно меншим за одиницю.

Існує значна кількість видів ШСС, які поділяються на частотно-модульовані (ЧМ) сигнали, багаточастотні сигнали, фазоманіпульовані (ФМ<sub>н</sub>) сигнали і дискретні частотні сигнали.

Найбільш перспективними для радіоліній з ШСС є ФМ<sub>н</sub> та ДЧ сигнали [2], але дискретні частотні сигнали мають суттєвий недолік – значну кількість частотних каналів ( $10^2 - 10^3$  для  $V=10^4 \dots 10^8$ ), які забезпечують отримання однакової інформації в КРНС, що не дозволяє широко застосувати цей вид ШСС.

База фазоманіпульованого сигналу буде дорівнювати:

$$V = FT = N, \quad (3)$$

де  $T$  – довжина всього сигналу;  $N$  – кількість елементів у сигналі.

Слід зазначити, що використання ФМ<sub>н</sub> сигналів в якості ШСС з великими базами  $V=10^4 \dots 10^6$  обмежене у зв'язку зі складністю апаратури обробки. При використанні узгоджених фільтрів, можлива побудова оптимального приймача ФМ<sub>н</sub> сигналів з базою від  $V=1000 \dots 2000$ .

Структурна схема КРНС “ПАР-АРК” з ШСС показана на рис. 1.

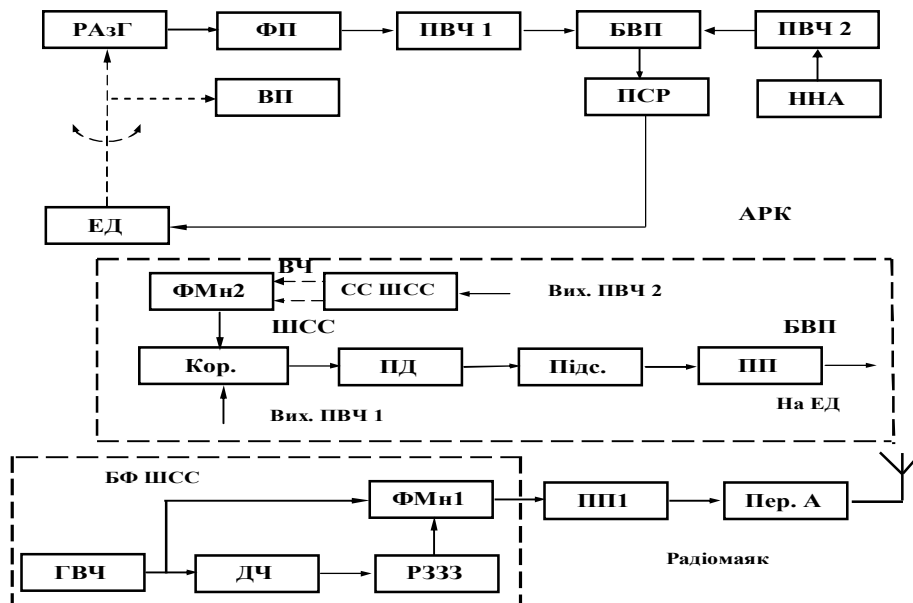


Рис. 1. Структурна схема системи “ПАР – АРК” з ФМ<sub>н</sub> широкосмуговим сигналом

Генератором високої частоти (ГВЧ) блоку формування ШСС (БФ ШСС) виробляється ВЧ коливання вигляду:

$$U(t) = U_0 \cos(\omega_0 t + \phi_0), \quad (4)$$

де  $U_0$  – амплітуда сигналу;  $\omega_0$  – кругова частота, яка дорівнює  $\omega_0 = 2\pi f_0$ ;  $f_0$  – частота сигналу, що

лежить у діапазоні середніх хвиль;  $\phi_0$  – випадкова початкова фаза, рівномірно розподілена в інтервалі  $\phi_0 = [0, 2\pi]$ .

Ця напруга подається на дільник частоти (ДЧ) і другий вхід фазового маніпулятора (ФМ<sub>н</sub>). Дільник частоти формує тактову частоту напруги, яка пода-

ється на синхровходи регістру зсуву зі зворотними зв'язками (РЗЗ), і має коефіцієнт ділення рівний:

$$K_0 = f_0 / f_T,$$

де  $f_T$  – тактова частота регістра зсуву. Для задовільного формування прямокутної огинаючої ФМ<sub>н</sub> сигналу потрібно, щоб за час  $T_k = 1/f_T$  укладалося не менше 150 періодів ВЧ коливань.

Тому можна записати наступний вираз:

$$K_0 \leq f_0 / 150. \quad (5)$$

В генераторі, який формує М-послідовність (псевдовипадкова послідовність – ПВП) [1 – 3], тривалість елемента М-послідовності повинна бути обрана з (5), а усієї послідовності, крім того, повинна задовольняти темпу відновлення інформації на об'єкті навігації. Виходячи з вищезгаданих умов і з огляду на мінімально необхідну частоту відновлення інформації на високодинамічних об'єктах (літальних апаратах), тривалість (період) М-послідовності може скласти  $T = 2 \cdot 10^{-1}$  с, а елементу цієї послідовності  $\tau = 2 \cdot 10^{-4}$  с. Розрядність РЗЗ у цьому випадку буде дорівнювати 10, а база шумоподібного сигналу

$$B = FT \approx \frac{2 \cdot 10^{-1}}{2 \cdot 10^{-4}} = 1000, \quad (6)$$

де  $F = 1/\tau$  – ширина спектра ШСС;  $T$  – період ПВП.

З виходу РЗЗ ПВП надходить на перший вхід ФМ<sub>н</sub>, де здійснюється фазова маніпуляція на  $\pi$  ( $180^\circ$ ) несучого коливання відповідно до закону зміни ПВП. У результаті на виході ФМ<sub>н</sub> формується когерентна напруга вигляду:

$$S(t) = f(t) \cos(\omega_0 t + \phi_0), \quad (7)$$

де  $f(t) = \sum_{M=1}^L a_m F[t - (m-1)\tau]$  – послідовність  $L$  елементів  $M$  коду;  $a_m = \{1, -1\}$ ,  $F[\cdot]$  – огинаюча елементу  $M$ -коду.

З виходу ФМ<sub>н</sub> сигнал подається для посилення на підсилювач потужності (ППП) і далі на передавальну неспрямовану антену.

Задача ідентифікації РМ КРНС на ЛА в цьому випадку може вирішуватися за рахунок вибору на передавальній стороні (ПАР) різних модулюючих М-послідовностей однакової тривалості шляхом комутації зворотних зв'язків у РЗЗ.

Так, для десятирозрядного РЗЗ існує близько 60-ти характеристичних багаточленів, які породжують М-послідовності.

На прийомній стороні на виході підсилювача високої частоти (ПВЧ2) АРК сигнал (7) представляє собою адитивну суміш корисного сигналу та шуму:

$$\xi(t) = S_H(t, \tau) + n(t), \quad (8)$$

де  $\xi(t)$  – напруга на другому вході блоку вимірювача

пеленгу (БВП);  $n(t)$  – адитивний шум, який апроксимується "білим" гаусовським шумом із нульовим математичним очікуванням і дисперсією [4]:

$$\sigma_n^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_n(\omega) d\omega;$$

$$S_H(t, \tau) = f(t - \tau) \cos[\omega_0 t + \phi(t)], \quad (9)$$

де  $\tau = R/C$ ;  $\phi(t) = -\omega_0 \tau + \phi_0$  – фаза сигналу з урахуванням наявності твердого зв'язку огинаючої і високочастотного заповнення.

При прийомі високочастотних коливань рамковою антеною з гоніометром (РАЗГ) АРК в роторній катушці гоніометру (на виході рамкової антени) виникає напруга

$$\xi_P(t) = [S_P(t, \tau) + n(t)] \sin \gamma, \quad (10)$$

де  $S_P(t, \tau) = f(t - \tau) \sin[\omega_0 t + \phi(t)]$  – сигнал на виході гоніометра;  $\gamma = (\Theta - \alpha)$  – кут неузгодженості між пеленгом [ККР( $\Theta$ )] і кутовим положенням роторної катушки гоніометра ( $\alpha$ ).

Після повороту фази на  $90^\circ$  фазуючим пристроєм (ФП) і підсилення в першому ПВЧ (ПВЧ1), на перший вхід БВП подається напруга виду:

$$\xi_P(t) = \{f(t - \tau) \cos[\omega_0 t + \phi(t)] + n(t)\} \sin \gamma. \quad (11)$$

У блоці БВП, що наведений на рисунку 2, субблоком синхронізації з ШСС (СС ШСС) формуються дві напруги:

– високочастотне коливання, яке синхронне з несучим коливанням на виході ПВЧ2;

– низькочастотне коливання, яке повторює ШСС.

Після їх подачі на фазовий маніпулятор (ФМн2) утворюється опорна ФМн ВЧ напруга, необхідна для роботи аналогового корелятору (Кор.)

$$\xi_{OP}(t) = S_{OP}(t, \tau) + \varepsilon(t), \quad (12)$$

де  $S_{OP}(t, \tau) = f_{OP}(t - \tau) \cos[\omega_0 t + \phi(t)]$  – опорний сигнал, а  $\tau$  і  $\phi$  – оцінки затримки і фази;  $\varepsilon(t)$  – шумова складова похибки синхронізації.

Аналоговим корелятором на виході формується напруга, що дорівнює значенню кореляційного інтегралу:

$$Z = \int_0^T \xi_P(t) \xi_{OP}(t) dt. \quad (13)$$

При синхронних напругах  $S_P(t, \tau)$  і  $S_{OP}(t, \tau)$  і малих шумах спостереження та оцінки  $n(t)$ ,  $\varepsilon(t)$  вираз (14) є функцією кута неузгодженості  $\gamma$ :

$$Z = \sin \int_0^T S_P(t, \tau) \cdot S(t, \tau) dt + \rho(n, \varepsilon), \quad (14)$$

$$\rho(n, \varepsilon) \sin \gamma \times$$

де  $\int_0^T [S_{OP}(t, \tau) n(t) + S_P(t, \tau) \varepsilon(t) + n(t) \varepsilon(t)] dt$  – випад-

кова завадова складова з нульовим середнім і дисперсією, яка не перевищує

$$\sigma^2 = \sin \gamma / 4B, \quad (15)$$

так, що  $\rho \ll Z$ .

Отже, максимальна величина середньоквадратичної похибки відносно  $Z_{\max}$  буде при  $\gamma = 90^\circ$  і складає [6]

$$S_{\max} = 1/2\sqrt{B}. \quad (16)$$

Величину  $S_{\max}$  теоретично треба розглядати як поріг, з яким слід порівнюватися напруги на виході корелятора.

Підсилена напруга  $Z$  є напругою неузгодженості, яка впливає на керований електродвигун (ЕД) АРК та повертає ротор РАЗГ на кут  $\alpha = \Theta$ . Процес відстеження мінімумом діаграми спрямованості рамкової антени напрямку приходу сигналу (пеленга) продовжується доти поки  $Z$  не стане менше  $S_{\max}$ . Алгоритм виміру і спостереження за пеленгом, крім того, повинен враховувати реальність появи неузгодженості по  $\tau$  і  $\phi$ , що приводять до росту бічних піків взаємкореляційної функції до 10 – 15 % від її абсолютного максимуму.

З виходу аналогового корелятора, напруга  $Z$  у вигляді періодичної послідовності імпульсів подається на вхід пікового детектору (ПД), який запам'ятовує рівень  $Z_{\max}$  і виконує роль фільтра нижніх частот, що необхідно для плавного зменшення сигналу неузгодженості. Періодичність  $Z_{\max}$  дорівнює періоду сформованої ПВП. Підсилювач з постійним коефіцієнтом підсилення (Підс.) в колі спостереження за пеленгом необхідний для зменшення похибок у роботі порогового пристрою корелятора, але при цьому і рівень порогової напруги повинний бути збільшений у стільки ж разів, у скільки підсилюється сигнал  $Z$ . Обертання ротора гоніометра РАЗГ в

колi спостереження за пеленгом у залежності від полярності сигналу неузгодженості здійснюється в обидва боки, причому при позитивній полярності – за годинною стрілкою, а негативної – проти. Це дозволяє мати тільки одну точку стійкої рівноваги на пеленгаційній характеристиці і виключає можливість неоднозначного визначення пеленгу.

## Висновки

Розглянута структурна схема КРНС "ПАР-АРК" є спрощеним варіантом, який показує принципovu можливість використання ШСС у РНС з підвищеною завадостійкістю.

Вона може бути доповнена спеціальними пристроями, які дають можливість зберегти спадкоємність старого і нового обладнання, знизити вагобаритні показники обладнання та передавати на борт літального апарата додаткову інформацію в цифровій формі.

## Список літератури

1. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами / Л.Е. Варакин – М.: Радио и связь, 1985. – 384с.
2. Чердынцев В.А. Радиотехнические системы / Чердынцев В.А. – Минск: Высшая школа, 1988. – 369 с. – (Учебник для вузов).
3. Радиотехнические системы : учебн. [для вузов по спец. "Радиотехника"] / [Ю.П. Гришин, В.П. Ипатов, Ю.М. Казаринов и др.]; под ред. Ю.М. Казаринова. – М.: Высш.шк., 1990. – 496 с.
4. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов / В.И. Тихонов – М.: Радио и связь, 1983. – 320 с.

Надійшла до редколегії 11.07.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. П.Ю. Костенко, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

### УГЛОМЕРНАЯ РАДИОНАВИГАЦИОННАЯ СИСТЕМА "ПАР-АРК" НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ

В.А. Дорошук, А.П. Кулик, О.В. Никитин, И.В. Титов

*В статье рассмотрены вопросы повышения помехозащищенности угломерной радионавигационной системы "ПАР – АРК" на основе использования широкополосных сигналов и оптимальных методов обработки. Разработана структурная схема комплекса бортового и наземного оборудования системы "ПАР – АРК", который имеет лучшую потенциальную точность, скрытность и помехоустойчивость при использовании корреляционных методов обработки сигналов.*

**Ключевые слова:** угломерная радионавигационная система, помехоустойчивость, широкополосный сигнал, база сигнала.

### GONOMETRIC RADIO-NAVIGATION SYSTEM "DAR-ADF" USING THE BROADBAND SIGNAL

V.A. Doroschuk, A.P. Kulik, A.V. Nikitin, I.V. Titov

*The paper deals with improving immunity to interference goniometer radio-navigation system "DAR - ADF" through the use of broadband signals and the optimal processing methods. A block diagram of the complex airborne and ground equipment systems "DAR - ADF", which has the best potential accuracy, secrecy and immunity from the use of correlation methods for signal processing.*

**Keywords:** goniometric radio-navigation system, noise immunity, broadband signal, bandwidth-duration product.