

УДК 621.396.96.095.4:528.8.04-047.27

В.К. Волосяк<sup>1</sup>, В.В. Павліков<sup>1</sup>, К.М. Нежальська<sup>1</sup>, О.М. Тимошук<sup>2</sup><sup>1</sup> Національний аерокосмічний університет імені М.Є. Жуковського «ХАІ», Харків<sup>2</sup> Київська державна академія водного транспорту

імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного, Київ

## РАДІОМЕТРИЧНИЙ ПРИСТРІЙ НУЛЬОВОГО ТИПУ ЗІ СКАНУЮЧОЮ ДІАГРАМОЮ СПРЯМОВАНОСТІ

Синтезовано та досліджено алгоритм оптимального формування радіометричних зображень за допомогою радіометричних пристроїв модуляційного типу. Найвища точність оцінювання досягається за рахунок забезпечення нульового типу прийому, який безпосередньо слідує з аналізу оптимального алгоритму обробки сигналів. Такий тип приймача дозволяє отримати незміщену оцінку радіозображення – радіояскравості як функції кутових координат. Відповідно алгоритму розроблена структурна схема радіометра, визначена гранична погрішність оцінювання зображення та потенційна флуктуаційна чутливість приймача.

**Ключові слова:** нульовий радіометр, радіометричне зображення, гранична погрішність, декореляція.

### Вступ

В дистанційному зондуванні, медицині, пасивній радіолокації широко використовуються радіометри. При цьому точність оцінювання різноманітних параметрів поверхонь визначається якістю вимірювальної апаратури. Найпростішим радіометром є компенсаційний, але в такому пристрої результати вимірювань зміщені через флуктуації коефіцієнту посилення вхідного тракту приймача. Цей недолік може бути усунено в таких радіометрах, як нульовий, адитивно-шумовий, модуляційний.

Цікавий підхід, який дозволяє знизити нестабільність вхідного тракту приймача, реалізовано в нульових радіометрах. В них за рахунок зрівнювання потужності вхідного та опорного сигналів досягається нульовий баланс. Однак, раніше, наприклад, в роботах [1 – 3], при вирішенні задачі оптимального синтезу алгоритмів обробки сигналів в нульових радіометрах, не враховувалося сканування діаграми спрямованості антени.

В даній роботі виконано статистичний синтез алгоритмів побудування радіометричних зображень в скануючих радіометрах з нульовим прийомом, розробка структурних схем та аналіз граничних погрішностей оцінювання та потенційної точності флуктуаційної чутливості.

### 1. Постановка оптимізаційної задачі

Розглянемо скануючий радіометр з нестабільною передаточною характеристикою вхідного тракту, який виконано за модуляційною схемою з керуванням джерелом опорного сигналу.

Необхідно оцінити радіояскравість просторово-протяжного об'єкту  $V(f_0, \bar{\theta})$  в присутності внутрі-

шніх шумів за період часу спостереження  $(0, T)$ . Рівняння спостереження за умови введення моделюючої функції з періодом модуляції  $T_m$

$$m(t) = \begin{cases} 1, & nT_m \leq t < (n + 1/2)T_m; \\ 0, & (n + 1/2)T_m \leq t < (n + 1)T_m, \end{cases} \quad (1)$$

можна записати так

$$u(t, \bar{\theta}_0(t)) = m(t)s(t, \bar{\theta}_0(t)) + [1 - m(t)]s_{RG}(t) + n(t) + n_r(t), \quad (2)$$

де  $s(t, \bar{\theta}_0(t))$ ,  $s_{RG}(t)$ ,  $n(t)$  – процеси  $\xi(t, \bar{\theta}_0(t))$ ,  $\xi_{RG}(t)$  та  $\eta(t)$ , які пройшли лінійну частину приймача з нестабільною передаточною характеристикою  $\dot{K}(j2\pi f, \zeta)$ ;

$n_r(t)$  – регуляризуюча добавка у вигляді білого гаусівського шуму з нульовим середнім та спектральною щільністю потужності  $N_{0r}$ , що виключає сингулярності в процесі вирішення інтегральних рівнянь.

### 2. Розв'язання оптимізаційної задачі

Оптимальний алгоритм отримаємо при розв'язанні системи рівнянь із часткових похідних функціоналу правдоподібності для стохастичних гаусівських процесів за шуканими параметрами [4, 5].

Для вирішення цієї системи знайдемо кореляційну функцію  $R_u(t_1, t_2, \bar{\lambda})$ . При розрахунках будемо користуватися припущенням, що  $s(t, \bar{\theta}_0)$ ,  $s_{RG}(t)$ ,  $n(t)$  та  $n_r(t)$  – статистично незалежні гаусівські випадкові процеси із нульовим середнім, а істинне значення  $N_{RG}$  невідомо.

Також врахуємо, що двосторонні спектральні щільності потужності відповідних процесів та шумів  $N_{0s}(f, \bar{\vartheta}_0(t)) / 2$ ,  $N_{RG} / 2$ ,  $N_{0n} / 2$  постійні в полосі частот, що приймаються радіометром та потужність регуляризуючої добавки на виході радіометра суттєво менша за потужність внутрішніх шумів радіометра  $N_{0r} \ll N_{0n}$ .

Кореляційна функція  $R_u(t_1, t_2, \bar{\lambda})$  при вищеведених допущеннях прийме вид

$$\begin{aligned} R_u(t_1, t_2, \bar{\lambda}) &= \langle u(t_1)u(t_2) \rangle \approx \\ &\approx \frac{m^2(t_1)}{2} \frac{c^2}{f_0^2} B_F(f_0, \bar{\vartheta}_0(t_1)) \{1 + \\ &+ \int_{-\infty}^{\infty} h_{\zeta}(t_1 - \tau)h_{\zeta}(t_2 - \tau)d\tau\} \times \\ &\times \int_{-\infty}^{\infty} h(t_1 - \tau)h(t_2 - \tau)d\tau + 0,5N_{RG} \times \\ &\times \left\{ 1 + \int_{-\infty}^{\infty} h_{\zeta}(t_1 - \tau)h_{\zeta}(t_2 - \tau)d\tau \right\} [1 - m(t_1)]^2 \times \\ &\times \int_{-\infty}^{\infty} h(t_1 - \tau)h(t_2 - \tau)d\tau + \frac{N_{0n}}{2} \{1 + \\ &+ \int_{-\infty}^{\infty} h_{\zeta}(t_1 - \tau)h_{\zeta}(t_2 - \tau)d\tau\} \times \\ &\times \int_{-\infty}^{\infty} h(t_1 - \tau)h(t_2 - \tau)d\tau + 0,5N_{0r}\delta(t_1 - t_2), \end{aligned} \quad (3)$$

де  $c$  – швидкість розповсюдження електромагнітних хвиль;

$f_0$  – центральна частота настройки вхідного тракту радіометра;

$N_{RG}$ ,  $N_{0n}$ ,  $N_{0r}$  – спектральні щільності потужності опорного сигналу, внутрішнього шуму та регуляризуючої добавки;

$h(\tau)$  – імпульсна характеристика стабільної складової до детекторної частини радіометра;

$h_{\zeta}(\tau)$  – імпульсна характеристика формуючого фільтра першого порядку, що визначає СЩП  $\zeta(t)$ .

З урахуванням усіх обчислень система функціоналів правдоподібності прийме вигляд

$$\left\{ \begin{aligned} &\Delta F(N_{RG}) \times \\ &\times \int_{\Theta} B(f_0, \bar{\vartheta}) \Psi_m(f_0, \bar{\vartheta}' - \bar{\vartheta}) d\bar{\vartheta} + \\ &+ N_{0n} \Delta F(N_{RG}) \times \\ &\times \int_0^T c^2 f_0^{-2} \eta_A \left| \dot{F}_N(\bar{\vartheta}' - \bar{\vartheta}_0(t_1)) \right|^2 m^2(t_1) dt_1 = \\ &= \int_0^T \int_0^{t_1} \int_{-\infty}^{\infty} c^2 f_0^{-2} \eta_A \left| \dot{F}_N(\bar{\vartheta} - \bar{\vartheta}_0(t_1)) \right|^2 m^2(t_1) \times \\ &\times u(t_1, \bar{\vartheta}_0(t_1)) u(t_1 - \tau, \bar{\vartheta}_0(t_1 - \tau)) \times \\ &\times \left| \dot{K}_W(j2\pi f, N_{RG}) \right|^2 \exp\{j2\pi f\tau\} df d\tau dt_1; \end{aligned} \right. \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{aligned} &N_{RG} \Delta F(N_{RG}) \times \\ &\times \int_0^T [1 - m(t_1)]^4 dt_1 + \\ &+ N_{0n} \Delta F(N_{RG}) \int_0^T [1 - m(t_1)]^2 dt_1 = \\ &= \int_0^T \int_0^{t_1} \int_{-\infty}^{\infty} [1 - m(t_1)]^2 \left| \dot{K}_W(j2\pi f, N_{RG}) \right|^2 \times \\ &\times u(t_1, \bar{\vartheta}_0(t_1)) u(t_1 - \tau, \bar{\vartheta}_0(t_1 - \tau)) \times \\ &\times \exp\{j2\pi f\tau\} df d\tau dt_1, \end{aligned} \right.$$

де  $\Psi_m(f_0, \bar{\vartheta}' - \bar{\vartheta})$  – ширина полоси вхідного тракту після декорелюючого фільтру;

$2\Delta F(N_{RG})$  – ширина полоси декорелюючого фільтру;

$\left| \dot{K}_W(j2\pi f, N_{RG}) \right|^2$  – квадрат модулю частотної характеристики декорелюючого фільтру.

Для отримання нульового радіометру віднімо перше рівняння системи (4) із другого та використаємо теорему Парсеваля

$$\begin{aligned} &\Delta F(N_{RG}) \times \\ &\times \int_0^T \frac{c^2}{f_0^2} \left| \dot{F}_N(\bar{\vartheta}' - \bar{\vartheta}_0(t_1)) \right|^2 B_F(f, \bar{\vartheta}_0(t)) dt_1 - \\ &- N_{RG} \Delta F(N_{RG}) \times \\ &\times \int_0^T \frac{c^2}{f_0^2} \eta_A \left| \dot{F}_N(\bar{\vartheta}' - \bar{\vartheta}_0(t_1)) \right|^2 [1 - m(t_1)]^4 dt_1 = \\ &= \int_0^T u_{WFm}^2(t, \bar{\vartheta}) dt - \int_0^T u_{WF[1-m]}^2(t) dt, \end{aligned} \quad (5)$$

де інтеграл, який містить тільки модулюючу функцію дорівнює половині часу спостереження

$$\int_0^T [1 - m(t_1)]^4 dt_1 = T / 2,$$

$$\begin{aligned} &B_F(f, \bar{\vartheta}_0(t)) = \\ &= \int_{\Theta} k_p \eta_A \left| \dot{F}_N(f, \bar{\vartheta} - \bar{\vartheta}_0(t)) \right|^2 B(f, \bar{\vartheta}) d\bar{\vartheta}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &u_{WFm[1-m]}(t, \bar{\vartheta}) = \\ &= F^{-1}[\dot{U}_{WFm[1-m]}(j2\pi f, \bar{\vartheta})] \end{aligned}$$

декорельоване спостереження, синхронно помножене на модулюючу функцію та модуль діаграми спрямованості.

При виконанні рівності  $N_{RG} = B_F(f, \bar{\vartheta}_0(t))$  рівняння (5) прийме вигляд

$$\int_0^T u_{WFm}^2(t, \bar{\vartheta}) dt - \int_0^T u_{WF[1-m]}^2(t) dt = 0.$$

Радіояскравість залежить від кутових координат, тому період модуляції та відповідно перебудови опорного генератора повинен відповідати умові

$$\lll \int_{-\infty}^{\infty} \left| \int_{\Theta} \dot{F}_N(f, \bar{\vartheta} - \bar{\vartheta}_0(t_1)) \dot{F}_N^*(f, \bar{\vartheta} - \bar{\vartheta}_0(t_2)) d\bar{\vartheta} \right| dt. \quad (6)$$

На рис. 1 показана структурна схема, яка реалізує алгоритм (4).

Сигнали  $\xi(t, \bar{\vartheta}_0(t))$  та  $\xi_{RG}(t)$  по черзі (відповідно значенню моделюючої функції  $m(t)$ , яка генерується модуляційним генератором) за допомогою керованого ключа поступають до лінійної частини приймача. Далі сигнали проходять декорелю-

ючий фільтр, помножуються на функцію, що співпадає з нормованою діаграмою спрямованості антени  $\dot{F}_N(\bar{\vartheta} - \bar{\vartheta}_0(t_1))$  та детектуються. Для обчислення різниці інтенсивностей вхідного та опірного сигналів сигнали детектуються у синхронному детекторі, який містить інтегратор та помножувач на функцію  $[2m(t) - 1]$ . Оцінку радіояскравості  $B_F(f, \bar{\vartheta}_0(t))$  формує розв'язувальний пристрій, на входи якого подаються сигнали з перестроюваного генератора та синхронного детектора. Сигнал з виходу радіометра керує роботою опірного генератора.

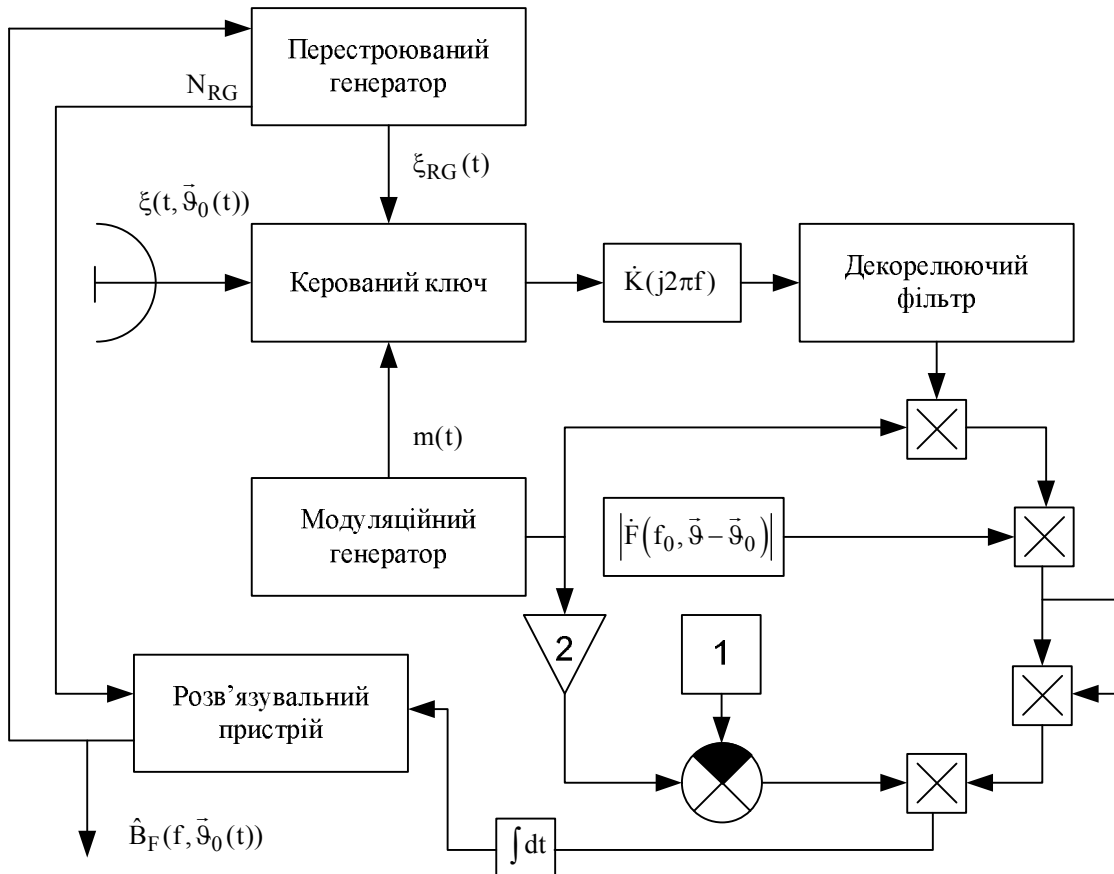


Рис. 1. Схема оптимального алгоритму

### 3. Граничні погрішності

Граничну погрішність оцінювання отримаємо оберненням інформаційної матриці Фішера, елементи якої визначаються вираженням

$$\Phi_{\mu\nu} = - \left\langle \frac{\delta^2 \ln P[u(t, \bar{\vartheta}_0(t)) | \bar{\lambda}]}{\delta \lambda_\mu \delta \lambda_\nu} \right\rangle_{\bar{\lambda}=\bar{\lambda}}. \quad (6)$$

Двічі продиференціював функціонал правдоподібності  $p[u(t, \bar{\vartheta}_0(t)) | \bar{\lambda}]$  по радіояскравості як функції кутових координат та обернув отриманий вираз [4], отримаємо

$$\sigma_{B_F}^2 = 4B_F^2(f_0, \bar{\vartheta}_0(t_1)) \times \left\{ 1 + \frac{N_{0n}}{2 \frac{c^2}{f_0^2} B_F(f_0, \bar{\vartheta}_0(t_1)) m^2(t_1)} \right\}^2 \times \frac{1}{\Delta F(N_{RG}) T_{eff}}, \quad (7)$$

де  $T_{eff}$  – ефективний час спостереження джерела випромінювання.

Використав узагальнене визначення [4], знайдемо потенційну флуктуаційну чутливість

$$\Delta B_F = 2\sqrt{2}B_F(f_0, \bar{g}_0(t_1)) \times \left\{ 1 + \frac{N_{0n}}{2 \frac{c^2}{f_0^2} B_F(f_0, \bar{g}_0(t_1)) m^2(t_1)} \right\} \times \sqrt{\Delta F(N_{RG}) T_{\text{eff}}} \quad (8)$$

### Висновки

В роботі синтезовано алгоритм оптимального відновлення РМЗ в скануючих радіометричних пристроях із нульовим прийомом та флюктууючою передаточною характеристикою вхідного тракту.

Синтезований алгоритм містить наступні операції: модуляція та помноження спостереження на функцію, що співпадає з нормованою діаграмою спрямованості антени

$$\dot{F}_N(\bar{g} - \bar{g}_0(t_1));$$

декореляція з наступним квадратичним детектуванням; обчислювання різності інтенсивностей вхідного та опорного сигналів, які вимірювані на сусідніх полу інтервалах.

Відповідно розробленому алгоритму, побудовано структурну схему радіометра. Визначені граничні погрішності оцінювання та потенційна флюктуаційна чутливість радіометра, які залежать від співвідношення сигнал/шум, полоси частот вхідного тракту та ефективного часу спостереження.

### РАДИОМЕТРИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО НУЛЕВОГО ТИПА СО СКАНИРУЮЩЕЙ ДИАГРАММОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ

В.К. Волосяк, В.В. Павликов, К.Н. Нежальская, Е.Н. Тимошчук

Синтезирован и исследован алгоритм оптимального формирования радиометрических изображений с помощью радиометрических устройств модуляционного типа. Самая высокая точность оценивания достигается за счет обеспечения нулевого типа приема, который непосредственно следует из анализа оптимального алгоритма обработки сигналов. Такой тип приемника позволяет получить несмещенную оценку радиоизображения – радиояркостности как функции угловых координат. В соответствии с алгоритмом разработана структурная схема радиометра, определена потенциальная точность оценивания изображения и потенциальная флюктуационная чувствительность приемника.

**Ключевые слова:** нулевой радиометр, радиометрическое изображение, предельная погрешность, декорреляция.

### ZERO-BALANCE RADIOMETRIC DEVICE WITH SCANNING ANTENNA PATTERN

V.K. Volosyuk, V.V. Pavlikov, K.M. Nezhalska, O.M. Tymoshchuk

The optimal algorithm of radiometric imaging in chopper radiometric devices is synthesized and investigated. The highest accuracy of the estimation is reached due to zero type receiving which directly follows from the analysis of signal processing optimal algorithm. Such type of the receiver allows to obtain unbiased estimate of radio image (radio brightness as functions of angular coordinates). According to the algorithm the block diagram of a radiometer is developed, the potential accuracy of the image estimation and receiver potential fluctuation sensitivity are derived.

**Keywords:** zero-balance radiometer, radiometric image, limit accuracy, decorrelation.

### Список літератури

1. Kravchenko V.F. Statistical Synthesis of Optimal and Quasi-optimal Chopper Radiometers [Electronic resource] / V.F. Kravchenko, V.K. Volosyuk, V.V. Pavlikov // Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings. PIERS-2012, Aug. 19–23, 2012, Moscow, Russia. – [S. l.], 2012. – P. 50–54. – Режим доступа: <http://piers.org/piersproceedings/piers2012Proc.php>. – 26.02.2013.
2. Волосяк В.К. Статистический синтез радиометрических систем модуляционного типа [Текст] / В.К. Волосяк, В.Ф. Кравченко, В.В. Павликов, В.И. Пустовойт // Докл. АН РАН. – 2013. – Т. 448, № 3. – С. 289-292.
3. Волосяк В.К., Статистический синтез радиометра нулевого типа [Текст] / В.К. Волосяк, В.Ф. Кравченко, В.В. Павликов // Труды конференции Радиолокация и связь, Москва, Россия, Ноябрь 19-22, 2012. – С. 45-38.
4. Волосяк В.К. Оптимальное восстановление радиометрического изображения в сканирующем радиометре с нестабильным коэффициентом усиления входного тракта [Текст] / В.К. Волосяк, В.В. Павликов, С.С. Жила // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2013. – № 1 (10). – С. 79-83. – ISSN 2223-456X.
5. Волосяк В.К. Статистическая теория широкополосных радиометрических устройств и систем / В.К. Волосяк, В.Ф. Кравченко, Б.Г. Кутуза, В.В. Павликов, В.И. Пустовойт // Физические основы приборостроения. – 2014. – Т.3, № 3. – С. 5–65.

Надійшла до редколегії 15.12.2015

**Рецензент:** д-р техн. наук проф. І.В. Баришев, Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», Харків.