

УДК 621.396

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

імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного, Україна

## ОПТИМАЛЬНА ОЦІНКА РАДІОМЕТРИЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ У РАДІОМЕТРІ ЗІ СКАНУЮЧОЮ ДІАГРАМОЮ СПРЯМОВАНІСТІ

Синтезовано та досліджено алгоритм оптимального формування радіометричних зображень за допомогою радіометричних систем зі скануючою діаграмою спрямованості антен. Розроблено відповідну структурну схему системи. Вважаючи на складність технічної реалізації оптимального алгоритму, запропоновано перехід до квазіоптимальної обробки сигналів. Показано, що операція просторового вибілення, яка слідує безпосередньо з алгоритму обробки сигналів, дозволяє суттєво підвищити розрізняльну здатність системи по кутовим координатам. Для вирішення задачі просторового вибілення необхідно обернути функцію невизначеності системи.

**Ключові слова:** оптимальний скануючий радіометр, яскравісна температура просторово-протяжного об'єкту.

### Вступ

В сучасній науці та практиці широко використовують радіометричні системи. Такі системи можуть бути застосовані, зокрема, для оцінювання електродинамічних, фізико-хімічних та статистичних характеристик різноманітних об'єктів [1, 2]. При цьому на якість таких оцінок суттєво впливає схема реалізації самого радіометра. В більшості випадків на даний час такі системи будуються на емпіричному підході. Для синтезу оптимальних систем необхідно використання сучасної теорії оптимального оцінювання параметрів сигналів [2] та методів функціонального аналізу [3, 4]. Вагомі результати по статистичному синтезу радіометричних систем отримані в [1-5], але в цих роботах недостатньо уваги приділено оцінюванню параметрів просторово-протяжних джерел випромінювання. Такі оцінки потребують використання спеціальних алгоритмів обробки сигналів та багатопроточних або скануючих антенних систем.

В роботі виконано статистичний синтез алгоритмів оптимального та квазіоптимального оцінювання яскравісної температури просторово-розподілених об'єктів в радіометричній системі зі скануючою діаграмою спрямованості (ДС) та розробляється відповідна до них структурна схема.

### 1. Постановка задачі і вихідні дані

В скануючому радіометрі на поточний момент сканування  $t$  необхідно дати оптимальну оцінку спектрально-кутової щільності потужності  $V(f, \bar{\theta})$ , що являє собою радіометричне зображення як функцію направляючих косинусів  $\bar{\theta}$ .

Вважаємо, що положення максимуму ДС антени  $\bar{\theta}_0$  змінюється в часі, тобто  $\bar{\theta}_0(t)$ . Сигнал із виходу антени  $s(t, \bar{\theta}_0(t))$  проходить вхідні ланцюги радіометра, що характеризуються деякою частотною характеристикою  $\dot{K}(j2\pi f)$ , де змішується із внутрішніми шумами  $n(t)$ . Представимо внутрішні шуми у вигляді, перерахованому на вхід лінійної частини радіометра. Ведемо в рівняння спостереження регуляризуючу добавку – білий гаусівський шум  $n_p(t)$ , що виключає сингулярності в процесі розв'язання інтегральних рівнянь. Припустимо також, що спектральна щільність потужності (СЩП) регуляризуючого шуму суттєво менша за СЩП внутрішнього шуму.

Тоді рівняння спостереження представимо у вигляді

$$u(t, \bar{\theta}_0(t)) = [s(t, \bar{\theta}_0(t)) + n(t)] \otimes h(t) + n_p(t), \quad (1)$$

$$\begin{aligned} s(t, \bar{\theta}_0(t)) \otimes h(t) &= s_h(t, \bar{\theta}_0(t)) = \\ \text{де} \quad &= \int_{\theta} \int_{D'} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{A}(f, \bar{\theta}) \dot{I}(f, \bar{r}') \dot{K}(j2\pi f) \times \\ &\times \exp\left\{j2\pi f \left(t - \bar{r}'(\theta - \theta_0(t))c^{-1}\right)\right\} df d\bar{r}' d\theta \end{aligned}$$

корисний сигнал на виході лінійної частини радіометра;

$\dot{A}(f, \bar{\theta})$  – спектрально-кутова щільність комплексної амплітуди джерела випромінювання  $f \in (-\infty, \infty)$ ;

$\dot{I}(f, \bar{r}')$  – амплітудно-фазовий розподіл в апертурі антени;

$\vec{r}' = (x', y') \in D'$  – координати приймальної апертури;

$\dot{K}(j2\pi f)$  – частотна характеристика вхідного тракту;

$\vec{\theta}$  – вектор направляючих косинусів;

$\vec{\theta}_0(t)$  – положення максимуму ДС як функція часу  $t$ ;

$c$  – швидкість розповсюдження хвиль у вільному просторі;

$$n_h(t) = n(t) \otimes h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} n(\tau)h(t - \tau)d\tau -$$

внутрішній шум на виході лінійної частини радіометра;

$$h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \dot{K}(j2\pi f) \exp\{j2\pi f t\} df -$$

імпульсна характеристика вхідного тракту радіометра;

$\otimes$  – оператор згортки.

Усі процеси, що входять в рівняння спостереження – це взаємно-некорельовані білі гаусівські шуми із нульовим середнім. Припускаємо, що виконується умова [1]

$$\begin{aligned} \langle \dot{A}(f_1, \vec{\theta}_1) \dot{A}^*(f_2, \vec{\theta}_2) \rangle = \\ = B(f_1, \vec{\theta}_1) \delta(f_1 - f_2) \delta(\vec{\theta}_1 - \vec{\theta}_2). \end{aligned} \quad (2)$$

Тут  $\langle \cdot \rangle$  – знак статистичного усереднення. До рівняння (2) входить спектрально-кутова щільність потужності, що має бути оцінена  $B(f, \vec{\theta})$ .

При вирішенні оптимізаційних задач методом максимуму функціоналу правдоподібності необхідно знати кореляційну функцію спостереження (1). Для її обчислювання, по-перше, припускаємо, що антена частотно-незалежна ( $\dot{F}(f, \vec{\theta}) = \dot{F}(f_0, \vec{\theta})$ ). По-друге,  $B(f, \vec{\theta})$  має монотонний (по частоті) характер. Використаємо теорему про середнє та будемо розглядати значення спектральної яскравості, приведені к деякої частоті всередині полоси пропускання радіометра, тобто  $B(f, \vec{\theta}) = B(f_0, \vec{\theta})$ . Якщо також припустити, що частотна характеристика  $\dot{K}(j2\pi f)$  вхідного тракту задовольняє умові широкосмужності, перепишемо вираз (1) у вигляді ( $t_1 - t_2 = \tau$ )

$$\begin{aligned} R_u(t_1, t_1 - \tau, \lambda(\vec{\theta})) = \\ = 0,5 \left[ B_\Psi(f_0, \vec{\theta}_0(t_1)) + N_0 \right] R_h(\tau) + 0,5 N_p \delta(\tau), \end{aligned} \quad (3)$$

де  $B_\Psi(f_0, \vec{\theta}_0(t_1)) = \int_0 B(f_0, \vec{\theta}) \left| \dot{F}(f_0, \vec{\theta} - \vec{\theta}_0(t_1)) \right|^2 d\vec{\theta}$ .

Миттєва спектральна щільність потужності має такий вигляд:

$$G(f, t_1, \lambda(\vec{\theta})) =$$

$$= 0,5 \left\{ B_\Psi(f_0, \vec{\theta}_0(t_1)) + N_0 \right\} \left| \dot{K}(j2\pi f) \right|^2 + N_p \}. \quad (4)$$

## 2. Вирішення задачі

Рішення задачі отримаємо методом максимуму функціоналу правдоподібності, для чого вирішимо рівняння

$$\frac{\delta \ln p \left[ u(t, \vec{\theta}_0(t)) \mid \lambda(\vec{\theta}) \right]}{\delta \lambda(\vec{\theta})} \Bigg|_{\hat{\lambda}(\vec{\theta}) = \lambda_{opt}(\vec{\theta})} = 0, \quad (5)$$

де  $\lambda(\vec{\theta}) = B(f_0, \vec{\theta})$  – шуканий параметр, як функція кутових координат;

$\hat{\lambda}(\vec{\theta})$  и  $\lambda_{opt}(\vec{\theta})$  – оціночне та оптимальне значення параметру;

$$p \left[ u(t, \vec{\theta}_0(t)) \mid \lambda(\vec{\theta}) \right] =$$

$$= k \left( \lambda(\vec{\theta}) \right) \exp \left\{ -0,5 \int_0^t \int_0^t u(t_1, \vec{\theta}_0(t_1)) \times \right. \\ \left. \times W_u(t_1, t_2, \lambda(\vec{\theta})) u(t_2, \vec{\theta}_0(t_2)) dt_1 dt_2 \right\}$$

функціонал правдоподібності;

$W_u(t_1, t_2, \lambda(\vec{\theta}))$  – функція, зворотна до кореляційної функції  $R_u(t_1, t_2, \lambda(\vec{\theta}))$ , яка знаходиться з інтегрального рівняння обернення

$$\begin{aligned} \int R_u(t_1, t_2, \lambda(\vec{\theta})) W_u(t_2, t_3, \lambda(\vec{\theta})) dt_2 = \\ = \delta(t_1 - t_3); \end{aligned} \quad (6)$$

$k(\lambda(\vec{\theta}))$  – параметр, який залежить від  $\lambda(\vec{\theta})$ ;

$\delta/\delta\lambda(\vec{\theta})$  – оператор варіаційної похідної.

Аналітично розв'язати рівняння (6) досить важко. Виконаємо перехід до частотної області та, використовуючи методи взяття варіаційних похідних, отримаємо рішення рівняння (5) у вигляді

$$\begin{aligned} \int_0^t \int_{-\infty}^{\infty} \left| \dot{F}(f_0, \vec{\theta} - \vec{\theta}_0(t_1)) \right|^2 \left| \dot{K}(j2\pi f) \right|^2 \times \\ \times G^{-1}(f, t_1, \hat{\lambda}(\vec{\theta})) df dt_1 = \\ = \int_0^t \int_0^{t_1} \int_{-\infty}^{\infty} \left| \dot{F}(f_0, \vec{\theta} - \vec{\theta}_0(t_1)) \right|^2 \times \\ \times \left| \dot{K}(j2\pi f) \right|^2 G^{-2}(f, t_1, \hat{\lambda}(\vec{\theta})) \exp \{ j2\pi f \tau \} df d\tau dt_1. \end{aligned} \quad (7)$$

Помножимо та розділимо ліву частину виразу (7) на  $G(f, t_1, \lambda(\vec{\theta}))$ , отримаємо:

$$\begin{aligned} 0,5 \int_0 B(f_0, \vec{\theta}') \Psi_{FG}(f_0, \vec{\theta}' - \vec{\theta}, \hat{\lambda}(\vec{\theta}')) d\vec{\theta}' + \\ + N_0 C(\vec{\theta}, \hat{\lambda}(\vec{\theta})) + N_p C_W(\vec{\theta}, \hat{\lambda}(\vec{\theta})), \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \Psi_{FG}(\vec{\theta}' - \vec{\theta}, \hat{\lambda}(\vec{\theta})) = 2 \int_0^{t_1} \left| \dot{F}(f_0, \vec{\theta}' - \vec{\theta}_0(t_1)) \right|^2 \times \\ \times \left| \dot{F}(f_0, \vec{\theta} - \vec{\theta}_0(t_1)) \right|^2 \Delta F(t_1, \hat{\lambda}(\vec{\theta})) dt_1, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned}
 & 2\Delta F(t_1, \hat{\lambda}(\theta)) = \\
 & = \int_{-\infty}^{\infty} |\dot{K}(j2\pi f)|^4 G^{-2}(f, t_1, \hat{\lambda}(\theta)) df = \\
 & = \int_{-\infty}^{\infty} |\dot{K}(j2\pi f)|^2 |\dot{K}_W(j2\pi f, t_1, \hat{\lambda}(\theta))|^2 df, \\
 & \quad |\dot{K}_W(j2\pi f, t_1, \hat{\lambda}(\theta))|^2 = \\
 & = |\dot{K}(j2\pi f)|^2 G^{-2}(f, t_1, \hat{\lambda}(\theta)), \\
 & 2\Delta F_W(t_1, \hat{\lambda}(\theta)) = \\
 & = \int_{-\infty}^{\infty} |\dot{K}(j2\pi f)|^2 G^{-2}(f, t_1, \hat{\lambda}(\theta)) df = \\
 & = \int_{-\infty}^{\infty} |\dot{K}_W(j2\pi f, t_1, \hat{\lambda}(\theta))|^2 df, \\
 & C(\bar{\theta}, \hat{\lambda}(\bar{\theta})) = \\
 & = \int_0^t |\dot{F}(f_0, \bar{\theta} - \bar{\theta}_0(t_1))|^2 \Delta F(t_1, \hat{\lambda}(\bar{\theta})) dt_1, \\
 & C_W(\bar{\theta}, \hat{\lambda}(\bar{\theta})) = \\
 & = \int_0^t |\dot{F}(f_0, \bar{\theta} - \bar{\theta}_0(t_1))|^2 \Delta F_W(t_1, \hat{\lambda}(\bar{\theta})) dt_1. \quad (11)
 \end{aligned}$$

Праву частину виразу (8) запишемо у вигляді

$$\begin{aligned}
 & \int_0^t \int_0^t \int_{-\infty}^{\infty} \dot{F}(f_0, \bar{\theta} - \bar{\theta}_0(t_1)) \dot{F}^*(f_0, \bar{\theta} - \bar{\theta}_0(t_2)) \times \\
 & \times |\dot{K}(j2\pi f)|^2 G^{-2}(f, t_1, \hat{\lambda}(\bar{\theta})) u(t_2, \bar{\theta}_0(t_2)) \times \\
 & \times u(t_1, \bar{\theta}_0(t_1)) \exp\{j2\pi f(t_1 - t_2)\} df dt_1 dt_2. \quad (12)
 \end{aligned}$$

Врахуємо, що частотна характеристика вхідного тракту задовольняє вимогам широкосмужності. Тоді

$$G^2(f, t_1, \hat{\lambda}(\bar{\theta})) \approx G(f, t_1, \hat{\lambda}(\bar{\theta}))G(f, t_2, \hat{\lambda}(\bar{\theta})). \quad (13)$$

Підставимо (14) в (13) і отримаємо

$$\begin{aligned}
 & \int_{-\infty}^{\infty} |\dot{K}(j2\pi f)| \int_0^t \dot{F}(f_0, \bar{\theta} - \bar{\theta}_0(t)) G^{-1}(f, t, \hat{\lambda}(\bar{\theta})) \times \\
 & \times u(t, \bar{\theta}_0(t)) \exp\{-j2\pi f t\} dt |^2 df = \\
 & = \int_{-\infty}^{\infty} |\dot{K}(j2\pi f) \dot{U}_{tFG}(f, \bar{\theta})|^2 df = \\
 & = \int_{-\infty}^{\infty} |\dot{U}_{tFW}(f, \bar{\theta})|^2 df, \quad (14)
 \end{aligned}$$

де 
$$\dot{U}_{tFG}(f, \bar{\theta}) = \int_0^t \dot{F}(f_0, \bar{\theta} - \bar{\theta}_0(t)) G^{-1}(f, t, \hat{\lambda}(\bar{\theta})) \times \times u(t, \bar{\theta}_0(t)) \exp\{-j2\pi f t\} dt,$$

$$\dot{U}_{tFW}(f, \bar{\theta}) = \dot{K}(j2\pi f) \dot{U}_{tFG}(f, \bar{\theta}).$$

Використав теорему Парсеваля-Лапласа пере-пишемо праву частину виразу (14)

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\dot{U}_{tFW}(f, \bar{\theta})|^2 df = \int_0^t u_{Fd}^2(t, \bar{\theta}) dt, \quad (15)$$

де 
$$u_{Fd}(t, \bar{\theta}) = F[\dot{U}_{tFW}(f, \bar{\theta})], \quad (16)$$

$F[\cdot]$  – оператор перетворення Фур’є.

Підставляючи вирази (8) та (16) в (15), отримаємо оптимальний алгоритм

$$\begin{aligned}
 & 0,5 \int_0^t \hat{B}(f_0, \bar{\theta}') \Psi_{FG}(f_0, \bar{\theta}' - \theta, \hat{\lambda}(\bar{\theta}')) d\bar{\theta}' = \\
 & = \int_0^t u_{Fd}^2(t, \bar{\theta}) dt - N_0 C(\bar{\theta}, \hat{\lambda}(\bar{\theta})) - N_p C_W(\bar{\theta}, \hat{\lambda}(\bar{\theta})). \quad (17)
 \end{aligned}$$

В лівій частині вираження (17) маємо згладжену функцією невизначеності радіометра оцінку спектрально-кутової щільності потужності  $\hat{B}(f_0, \theta')$ .

Припустимо, що існує зворотна функція, що задовольняє інтегральному рівнянню спостереження

$$\begin{aligned}
 & \int \Psi_{FG}(f_0, \bar{\theta}' - \theta, \hat{\lambda}(\bar{\theta}')) \times \\
 & \times \Psi_{FG}^{-1}(f_0, \bar{\theta}'' - \theta, \hat{\lambda}(\bar{\theta}')) d\bar{\theta} = \delta(\bar{\theta}' - \bar{\theta}'').
 \end{aligned}$$

Помножимо обидві частини рівняння (17) на  $\Psi_{FG}^{-1}(f_0, \bar{\theta}'' - \theta, \hat{\lambda}(\bar{\theta}'))$  та, інтегруючи по  $\bar{\theta}$ , віднови-мо  $\hat{B}(f_0, \bar{\theta}'')$

$$\begin{aligned}
 & 0,5 \hat{B}(f_0, \bar{\theta}'') = \\
 & = \int_0^t \Psi_{FG}^{-1}(f_0, \bar{\theta}'' - \theta, \hat{\lambda}(\bar{\theta}')) \times \int_0^t u_{Fd}^2(t, \bar{\theta}) dt d\bar{\theta} - \\
 & - N_0 R(\bar{\theta}'', \hat{\lambda}(\bar{\theta}'')) - N_p R_W(\bar{\theta}'', \hat{\lambda}(\bar{\theta}'')), \quad (18)
 \end{aligned}$$

де 
$$R(\bar{\theta}'', \hat{\lambda}(\bar{\theta}'')) = \int_0^t \Psi_{FG}^{-1}(f_0, \bar{\theta}'' - \theta, \hat{\lambda}(\bar{\theta}')) C(\bar{\theta}, \hat{\lambda}(\bar{\theta})) d\bar{\theta}, \quad (19)$$

$$\begin{aligned}
 & R_W(\bar{\theta}'', \hat{\lambda}(\bar{\theta}'')) = \\
 & = \int_0^t \Psi_{FG}^{-1}(f_0, \bar{\theta}'' - \theta, \hat{\lambda}(\bar{\theta}')) C_W(\bar{\theta}, \hat{\lambda}(\bar{\theta})) d\bar{\theta}. \quad (20)
 \end{aligned}$$

Синтезований алгоритм оптимального відновлення кутової радіоскравості досить важко реалізувати. Перейдемо до квазіоптимального алгоритму та введемо допущення, яке може мати місце на практиці. Нехай ширина смуги  $\Delta F(t_1, \hat{\lambda}(\bar{\theta}))$  фіксована та залежить від деякої середньої оцінки  $\hat{\lambda}$ , тобто

$$G(f, t, \hat{\lambda}(\bar{\theta})) = G(f, \hat{\lambda})$$

та, як слідство,

$$\Delta F(t_1, \hat{\lambda}(\bar{\theta})) \approx \Delta F(\hat{\lambda}).$$

Нехай виконується умова

$$\begin{aligned}
 & \int \Psi_{FG}(\bar{\theta}' - \theta, \hat{\lambda}(\bar{\theta})) \Psi_{FG}^{-1}(\bar{\theta}'' - \theta, \hat{\lambda}(\bar{\theta})) d\bar{\theta} = \\
 & = \int \Psi_F(\bar{\theta}' - \theta, \hat{\lambda}(\bar{\theta})) \Psi_F^{-1}(\bar{\theta}'' - \theta, \hat{\lambda}(\bar{\theta})) d\bar{\theta} = \delta(\bar{\theta}' - \bar{\theta}'').
 \end{aligned}$$

Тоді оптимальний алгоритм (18) зведемо до квазіоптимального

$$\begin{aligned}
 & \hat{B}(f_0, \bar{\theta}'') = \\
 & = \Delta F^{-1}(\hat{\lambda}) \int_0^t \Psi_F^{-1}(\bar{\theta}'' - \theta, \hat{\lambda}) \int_0^t u_{Fd}^2(t, \bar{\theta}) dt d\bar{\theta} - \\
 & - 2N_0 R(\bar{\theta}'', \hat{\lambda}) - 2N_p \Delta F_W(\hat{\lambda}) \Delta F^{-1}(\hat{\lambda}) R(\bar{\theta}'', \hat{\lambda}). \quad (21)
 \end{aligned}$$

Виконаємо перехід до потужностей відповідно формулі Найквіста (помножимо (21) на  $\Delta F(\hat{\lambda})$ ) та врахуємо припущення  $P_0(\hat{\lambda}) \ll P_p(\hat{\lambda})$

$$\hat{P}(\bar{\theta}''') = \int_{\theta} \Psi_F^{-1}(\bar{\theta}'' - \bar{\theta}, \hat{\lambda}) \int_0^t u_{Fd}^2(t, \bar{\theta}) dt d\bar{\theta} - 2P_0(\hat{\lambda})R(\bar{\theta}'', \hat{\lambda}), \quad (22)$$

де  $\hat{P}(\bar{\theta}'') = \hat{B}(f_0, \bar{\theta}'')\Delta F(\hat{\lambda})$ ;

$$P_0(\hat{\lambda}) = N_0\Delta F(\hat{\lambda}); \quad P_p(\hat{\lambda}) = N_p\Delta F_W(\hat{\lambda})$$

Складемо структурну схему, що відповідає алгоритму (22). Попередньо запишемо синтезований алгоритм (22) в розгорнутому вигляді

$$\begin{aligned} \hat{P}(\bar{\theta}'') &= \int_{\theta} \Psi_F^{-1}(f_0, \bar{\theta}'' - \bar{\theta}, \hat{\lambda}) \times \\ &\times \int_{-\infty}^{\infty} |\dot{K}(j2\pi f)G^{-1}(f, \hat{\lambda}) \int_0^t \dot{F}(f_0, \bar{\theta} - \bar{\theta}_0(t)) \times \\ &\times u(t, \bar{\theta}_0(t)) \exp\{-j2\pi f t\} dt|^2 df d\bar{\theta} - P_0(\hat{\lambda}) \times \\ &\times \int_0^t \int_{\theta} \Psi_F^{-1}(f_0, \bar{\theta}'' - \bar{\theta}, \hat{\lambda}) |\dot{F}(f_0, \bar{\theta} - \bar{\theta}_0(t_1))|^2 d\bar{\theta} dt_1. \end{aligned} \quad (23)$$

Схема, яка відповідає (23) наведена на рис. 1.

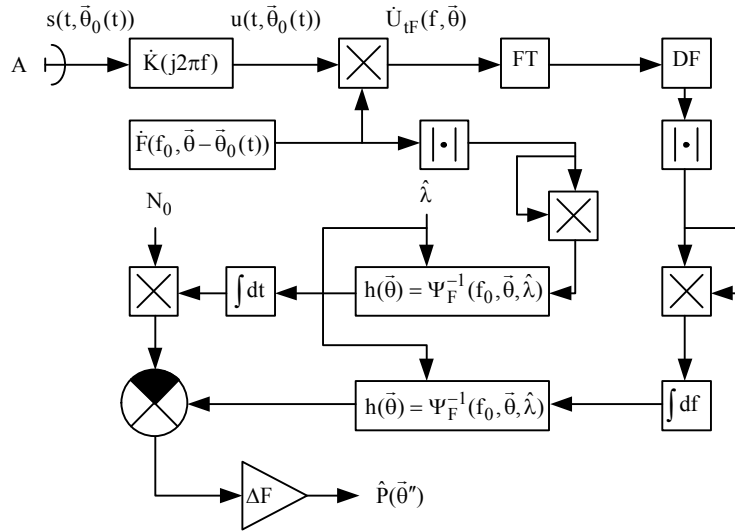


Рис. 1. Структурна схема оптимальної обробки радіометричного сигналу у скануючому радіометрі

Схема працює наступним чином: спостереження  $u(t, \bar{\theta}_0(t))$  (функція часу та напрямку) перемножується із функцією, що співпадає із комплексною діаграмою спрямованості антени  $\dot{F}(f_0, \bar{\theta} - \bar{\theta}_0(t))$ , яка орієнтована максимумом у напрямку  $\bar{\theta}_0(t)$  та далі поступає на блок виконання перетворення Фур'є (FT). Розглянута частина схеми реалізує частину оптимальної обробки, що описується виразом

$$\begin{aligned} \dot{U}_{IF}(f, \bar{\theta}) &= \\ &= \int_0^t \dot{F}(f_0, \bar{\theta} - \bar{\theta}_0(t)) u(t, \bar{\theta}_0(t)) \exp\{-j2\pi f t\} dt. \end{aligned}$$

Спектрально-кутова функція  $\dot{U}_{IF}(f, \theta)$  поступає на вибілюючий фільтр (ВФ) із амплітудно-частотною характеристикою

$$\dot{K}_W(j2\pi f, \hat{\lambda}) = \dot{K}(j2\pi f)G^{-1}(f, \hat{\lambda}),$$

де враховано допущення

$$G(f, t, \hat{\lambda}(\bar{\theta})) = G(f, \hat{\lambda}),$$

та далі на блок обчислювання модуля, квадратичний детектор та інтегратор, на виході якого отримуємо функцію куткових координат, яка відповідає згладженій функції невизначеності радіоскравості в присутності шумів

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} |\dot{U}_{IF}(f, \bar{\theta})|^2 df &= \\ &= 0,5 \int_{\theta} \dot{B}(f_0, \bar{\theta}') \Psi_{FG}(f_0, \bar{\theta}' - \bar{\theta}, \hat{\lambda}) d\bar{\theta}' + \\ &+ N_0 C(\bar{\theta}, \hat{\lambda}) + N_p C_W(\bar{\theta}, \hat{\lambda}) = \\ &= \int_0^t u_{Fd}^2(t, \bar{\theta}) dt. \end{aligned}$$

Далі сигнал поступає на вхід фільтра, імпульсна характеристика якого дорівнює функції, зворотної до радіометричної функції невизначеності, тобто

$$h(\theta) = \Psi_F^{-1}(f_0, \bar{\theta}, \hat{\lambda}),$$

$$\Psi_F(f_0, \bar{\theta}, \hat{\lambda}) =$$

$$\text{де } \int_0^t |\dot{F}(f_0, \bar{\theta} - \bar{\theta}_0(t_1))|^2 |\dot{F}(f_0, \bar{\theta}_0(t_1))|^2 dt_1.$$

Сигнал (функція куткових координат) на виході такого фільтра характеризується суттєво більш вузькою функцією автокореляції та дорівнює

$$\begin{aligned} \Delta F^{-1}(\hat{\lambda}) \int_{\theta} \Psi_F^{-1}(f_0, \bar{\theta}'' - \bar{\theta}, \hat{\lambda}) \times \\ \times \int_0^t u_{Fd}^2(t, \bar{\theta}) dt d\bar{\theta} = \hat{B}(f_0, \bar{\theta}'') + \\ + 2N_0 R(\bar{\theta}'', \hat{\lambda}) + 2N_p \Delta F_W(\hat{\lambda}) \Delta F^{-1}(\hat{\lambda}) R(\bar{\theta}'', \hat{\lambda}). \end{aligned} \quad (24)$$

Після фільтру з імпульсною характеристикою  $h(\theta) = \Psi_F^{-1}(f_0, \bar{\theta}, \hat{\lambda})$  підключено віднімаючий пристрій, на другий вхід якого подають сигнал

$$2N_0R(\bar{\theta}^n, \hat{\lambda}) = N_0 \int_0^t \int_{\theta} \Psi_F^{-1}(f_0, \bar{\theta}^n - \bar{\theta}, \hat{\lambda}) \times \\ \times \left| \dot{F}(f_0, \bar{\theta} - \bar{\theta}_0(t_1)) \right|^2 d\bar{\theta} dt_1.$$

Останньою складовою в правій частині вираження (24) нехтуємо (враховано  $N_p \ll N_0$ ).

Пропускаючи отриманий сигнал через підсилювач із коефіцієнтом посилення  $\Delta F(\hat{\lambda})$ , отримуємо на виході системи оцінку потужності, як функцію кутових координат

$$\hat{P}(\bar{\theta}^n) = \int_{\theta} \Psi_F^{-1}(f_0, \bar{\theta}^n - \bar{\theta}, \hat{\lambda}) \int_0^t u_{Fd}^2(t, \bar{\theta}) dt d\bar{\theta} - \\ - N_0 \Delta F(\hat{\lambda}) \int_0^t \int_{\theta} \Psi_F^{-1}(f_0, \bar{\theta}^n - \bar{\theta}, \hat{\lambda}) \times \\ \times \left| \dot{F}(f_0, \bar{\theta} - \bar{\theta}_0(t_1)) \right|^2 d\bar{\theta} dt_1. \quad (25)$$

## Висновки

Синтезовані алгоритми оптимальної та квазіоптимальної обробки сигналів в радіометрах зі скануючою діаграмою спрямованості.

Квазіоптимальний алгоритм (22) складається з операцій: множення спостереження на комплексну діаграму спрямованості антени, вибілення, згортки з функцією, зворотною до функції невизначеності радіометра, квадратичного детектування, інтегрування та компенсації внутрішніх шумів радіометра, вимірюваних на етапі калібрування.

Розроблена відповідно алгоритму структурна схема відрізняється від компенсаційної схеми радіометра операціями вибілення спостереження та множення на діаграму спрямованості антени.

## Список літератури

1. Review of modern algorithms for high resolution imaging with passive radar [Text] / V.K. Volosyuk, V.F. Kravchenko, B.G. Kutuza, V.V. Pavlikov // *Antenna theory and techniques. ICATT'2015: proc. of the X Intern. conf., Apr. 21-24, 2015. - Kharkiv, Ukraine, 2015. - P. 45-50.*
2. Волосюк, В.К. Статистическая теория радиотехнических систем дистанционного зондирования и радиолокации [Текст] / В.К. Волосюк, В.Ф. Кравченко. - М.: Физматлит, 2008. - 704 с.
3. Антюфеев, В.И. Оптимизация параметров радиометра компенсационно-модуляционного типа на основе системного подхода [Текст] / В.И. Антюфеев // *Радиотехника. - 1997. - № 103. - С. 115-140.*
4. Павликов, В.В. Статистический синтез оптимальной структуры сверхширокополосного радиометра модуляционно-компенсационного типа [Текст] / В.В. Павликов // *Физические основы приборостроения. Спецвыпуск. - 2011. - С. 132-142.*
5. Волосюк, В.К. Оценка параметров сигналов в сверхширокополосных радиометрических системах модуляционного типа с флуктуирующим коэффициентом усиления входного тракта [Текст] / В.К. Волосюк, В.В. Павликов, С.С. Жила // *Сборник трудов Четвертого Международного Радиотехнического Форума «Прикладная радиотехника. Состояние и перспективы развития», 18-21 октября 2011 г. - Харьков: ХНУРЕ, 2011. - С. 237-240.*

Надійшла до редколегії 30.09.2015

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

## ОПТИМАЛЬНАЯ ОЦЕНКА РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В РАДИОМЕТРЕ СО СКАНИРУЮЩЕЙ ДИАГРАММОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ

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

Синтезирован и исследован алгоритм оптимального формирования радиометрических изображений с помощью радиометрических систем со сканирующей диаграммой направленности антенны. Разработана соответствующая структурная схема системы. Учитывая сложность технической реализации оптимального алгоритма, предложен переход к квазиоптимальной обработке сигналов. Показано, что операция пространственного выбеливания, которая следует непосредственно из алгоритма обработки сигналов, позволяет существенно повысить разрешающую способность системы по угловым координатам. Для решения задачи пространственного выбеливания необходимо обратить функцию неопределенности системы.

**Ключевые слова:** оптимальный сканирующий радиометр, яркостная температура пространственно-протяженного объекта.

## RADIOMETRIC IMAGES OPTIMAL ESTIMATION IN RADIOMETERS WITH SCANNING ANTENNA PATTERN

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

The algorithm of optimal radiometric imaging in radiometric systems with the scanning antenna pattern is synthesized and investigated. The corresponding system block diagram is developed. Considering sophisticated technical realization of optimal algorithm it is proposed to use quasioptimal signal processing algorithm. It is shown that operation of spatial whitening which follows directly from the signal processing algorithm significantly increases angular resolution of the developed system. For the spatial whitening it is necessary to invert system ambiguity function.

**Keywords:** optimal scanning radiometer, brightness temperature of spatially extended object.