

**В. К. ВОЛОСЮК, В. В. ПАВЛІКОВ, С. С. ЖИЛА, В. В. КОШАРСЬКИЙ,  
О. В. ОДОКІЄНКО, Е. О. ЦЕРНЕ**

*Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський  
авіаційний інститут», Україна*

## **ОПТИМІЗАЦІЯ СТРУКТУРИ БАГАТОКАНАЛЬНОГО БОРТОВОГО РАДАРУ З СИНТЕЗУВАННЯМ АПЕРТУРИ АНТЕНИ ТА АЛГОРИТМОМ СЕЛЕКЦІЇ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ НА ТЛІ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ**

*Задачу синтезу оптимальної обробки сигналів в радарях з синтезуванням апертури, що оснащені режимом селекції ліній електропередач, розв'язано методом максимуму функціонала правдоподібності. У якості відмінних ознак ліній електропередач від земної поверхні обрані поляризаційні та доплерівські відмінності. Корисний сигнал на виході когерентного приймача заданий в аналітичному вигляді з комплексною огинаючою та високочастотним гармонічним коливанням. Фонове випромінювання підстильної поверхні представлено у стохастичному вигляді та повністю визначене матрицею кореляційних функцій. Внутрішні шуми багатоканального приймача описані дельта-корельованим випадковим гауссівським процесом з однаковою спектральною щільністю потужності у різних каналах спостереження. У зв'язку з тим, що фонове випромінювання земної поверхні корельовано у часі та на різних поляризаціях, функціонал правдоподібності записаний з оберненою матрицею обернених кореляційних функцій. Отриманий оптимальний алгоритм полягає в придушенні пасивних завад в декорелюючих фільтрах, оптимальному когерентному накопиченні траєкторних сигналів для синтезування апертури бортової антени та їх оптимальній фільтрації в фільтрах, що узгоджені з опорним сигналом. Одночасне використання доплерівських і поляризаційних відмінностей між корисними сигналами і пасивними перешкодами дозволяє ефективно виділяти лінії електропередач на тлі відбиття від землі в багатоканальних радарях з синтезуванням апертури. Запропонована послідовність операцій над прийнятими коливаннями може бути функціональним доповненням до режимів роботи когнітивних радарів аерокосмічного базування, адаптуючись відповідно до заздалегідь відомої або вимірної в процесі дистанційних досліджень коваріаційної матриці розсіювання підстильної поверхні. На основі отриманих результатів синтезована структурна схема багатоканального бортового поляризаційного радара з синтезуванням апертури антени. Розробка такого радара актуальна для системи попередження пілотів вертольоту про зіткнення, особливо при поганих погодних умовах в будь-яку пору року, вдень і вночі.*

**Ключові слова:** метод максимальної правдоподібності; поляризаційні характеристики; синтез апертури антени; матриця кореляційних функцій.

### **Вступ**

Для вирішення задачі селекції цілей на тлі пасивних завад необхідно визначити ті відмінності в відображених коливаннях від цілей і джерел перешкод, які можна ефективно використовувати для виділення корисних сигналів і придушення завад.

До таких відмінностей зазвичай відносять доплерівські відмінності, просторові відмінності, наприклад, відмінності в кутових положеннях цілей і джерел перешкод, відмінності за часом приходу відбитих сигналів, за інтенсивністю сигналів, текстурні відмінності, поляризаційні відмінності та інші.

Суттєвого підвищення ефективності селекції можна досягти лише при використанні цих відмінностей в різних комбінаціях або повністю всіх відмінностей.

**Мета роботи** полягає в оптимізації алгоритмів селекції ліній електропередач (ЛЕП) на тлі земної поверхні за рахунок використання їх поляризаційних відмінностей від фонового випромінювання в вертолітних радіотехнічних системах з синтезуванням апертури антени (РСА). Отримані результати будуть актуальні для забезпечення безпечних польотів вертольотів при поганих погодних умовах: дощ, туман, хуртовина, піщані бурі та інше.

### **Постановка задачі**

Рівняння спостереження представимо адитивною сумішшю корисних сигналів, фонового завадового випромінювання від земної поверхні і внутрішніх білих шумів приймачів

$$\bar{u}(t) = \bar{s}(t, \vec{\lambda}) + \bar{n}(t) + \bar{\xi}(t), \quad t \in (0, T), \quad (1)$$

$$\bar{u}(t) = \|u_k(t)\|, \quad \bar{s}(t, \bar{\lambda}) = \|s_k(t, \bar{\lambda})\|, \quad (2)$$

$$\bar{n}(t) = \|n_k(t, \bar{\lambda})\|, \quad \bar{\xi}(t) = \|\xi_k(t)\|, \quad k = (\text{BB}, \text{ГГ}) = \overline{1, 2}. \quad (3)$$

Індекс "k" відповідає виду поляризації прийнятих коливань. Для простоти розрахунків будемо вважати, що ми випромінюємо вертикальну поляризацію і приймаємо вертикальну (BB), а також випромінюємо горизонтальну і приймаємо горизонтальну (ГГ), перехресні компоненти враховуватися не будуть.

Корисний сигнал має таку структуру

$$s_k(t, \bar{\lambda}) = \text{Re} \dot{S}_{0k}(t, \bar{\lambda}) e^{j\omega_0 t}, \quad (4)$$

де  $\dot{S}_{0k}(t, \bar{\lambda})$  – огибаюча, що у даному вигляді представляє широкий клас сигналів з модуляцією, неперервних і імпульсних, та включає квадратичний набір фази в ближній зоні Френеля при синтезуванні апертури антени. Векторний параметр  $\bar{\lambda}$  містить в собі набір параметрів, що характеризують умови спостереження та стан об'єкта: дальність до ЛЕП, доплерівський зсув за рахунок коливань, кутові координати, поляризаційні ознаки.

Пасивні завади, обумовлені відображеннями від земної поверхні можна представити наступним виразом [1-2]

$$n_k(t) = \text{Re} \int_D \dot{F}_k(\vec{r}, t) \dot{S}_{0\ell} [t - t_3(\vec{r}, t)] \times \exp\{j\omega_0 [t - t_3(\vec{r}, t)]\} d\vec{r}, \quad (5)$$

де  $\dot{F}_k$  – питомий комплексний коефіцієнт відбиття хвиль від елемента поверхні  $d\vec{r} = dx dy$ ,  $\ell = (\text{B}, \text{Г})$  – індекс, що відповідає поляризації зондуючого сигналу. Огибаюча  $\dot{S}_{0\ell}$  визначається огибаючою зондуючого сигналу, а також у якості співмножника містить добуток діаграм спрямованості на передачу і прийом. Надалі будемо вважати, що форма зондуючих коливань на обох поляризаціях однакова, тобто  $\dot{S}_{0\ell} = \dot{S}_0$ .

Кореляційну матрицю перешкоди (5) визначимо в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} \underline{R}_n(t_1, t_2) &= \|R_{n_{ki}}(t_1, t_2)\| = \\ &= \left\| \begin{array}{cc} \langle n_{\text{BB}}(t_1) n_{\text{BB}}(t_2) \rangle & \langle n_{\text{BB}}(t_1) n_{\text{ГГ}}(t_2) \rangle \\ \langle n_{\text{ГГ}}(t_1) n_{\text{BB}}(t_2) \rangle & \langle n_{\text{ГГ}}(t_1) n_{\text{ГГ}}(t_2) \rangle \end{array} \right\|, \quad (6) \\ R_{n_{kj}}(t_1 - t_2) &= 0, 5 \rho_{kj}(t_1 - t_2) \text{Re} e^{j\omega_0(t_1 - t_2)} \times \\ &\times \int_D \sigma_{kj}^0(\vec{r}) \dot{S}_0 [t_1 - t_3(\vec{r})] \dot{S}_0 [t_2 - t_3(\vec{r})] d\vec{r}, \quad (7) \end{aligned}$$

де

$$\sigma_{kj}^0(\vec{r}) \rho_{kj}(t_1 - t_2) = \int_D \langle \dot{F}_k(\vec{r}, t_1) \dot{F}_k^*(\vec{r} + \Delta\vec{r}, t_1) \rangle e^{j\bar{q}_1 \Delta\vec{r}} d\Delta\vec{r}, \quad (8)$$

$$\Delta\vec{r} = \vec{r}_1 - \vec{r}_2 = \|x_1 - x_2, y_1 - y_2\|, \quad j = (\text{BB}, \text{ГГ}), \quad (9)$$

$\rho_{kj}(t_1 - t_2)$  – нормований коефіцієнт кореляції,

$\sigma_{kj}^0$  – елемент коваріаційної матриці розсіювання, на головній діагоналі якої розташовані питомі ефективні площі розсіювання (ЕПР) поверхні [3];  $\bar{q}_1$  – горизонтальна проекція вектору розсіювання [4].

Для більшості типів земних поверхонь нормована кореляційна функція  $\rho_{kj}(t_1 - t_2)$  практично не залежить від виду поляризації. Інтенсивності віддзеркалених сигналів від рослинних покривів на різних поляризаціях також суттєво не відрізняються. В той самий час, ЛЕП мають значно більші геометричні розміри в горизонтальній площині на відміну від вертикальної. Це призведе до збільшення інтенсивності сигналів на горизонтальній поляризації в порівнянні з вертикальною. Ці обставини є сприятливими для використання поляризаційних відмінностей при селекції ЛЕП на радіолокаційних зображеннях земної поверхні.

## Синтез оптимального алгоритму

Оптимальний алгоритм комплексування сигналів у багатоканальному РСА знайдемо в результаті пошуку максимуму функціоналу правдоподібності [5]

$$P[\bar{u} | \bar{s}(t, \bar{\lambda})] = k \exp \left\{ -\frac{1}{2} \int_0^T \int_0^T [\bar{u}^T(t_1) - \bar{s}^T(t, \bar{\lambda})] \underline{W}(t_1, t_2) \times \right. \\ \left. \times [\bar{u}(t_2) - \bar{s}(t, \bar{\lambda})] dt_1 dt_2 \right\} = \max, \quad (10)$$

де  $\underline{W}(t_1, t_2)$  – зворотна матриця зворотних кореляційних функцій, що знаходиться з рівняння

$$\int_0^T \underline{W}(t_1, t_2) \underline{R}(t_2, t_3) dt_2 = \underline{I} \delta(t_1 - t_2). \quad (11)$$

В формулі (11)  $(\cdot)^T$  – індекс транспонування,

$\underline{I}$  – одинична матриця.

Функціонал густини ймовірності (10) є монотонною функцією інтеграла

$$Y(\bar{\lambda}) = \int_0^T \int_0^T \bar{u}^T(t_1) \underline{W}(t_1, t_2) \bar{s}(t_2, \bar{\lambda}) dt_1 dt_2. \quad (12)$$

Достатнім алгоритмом обробки при вирішенні завдання селекції ЛЕП і оцінки неенергетичних параметрів сигналу (просторового положення) є формування цього інтеграла і пошук його максимуму на наборі параметрів  $\bar{\lambda}$ .

Перед тим як знайти зворотну матрицю  $\underline{W}(t_1, t_2)$ , спростимо вираз для кореляційної матриці  $\underline{R}(t_1, t_2)$ . Будемо вважати, що  $\sigma_{kj}^0 = \text{const}$ . Тоді

$$R_{n_{kj}}(t_1, t_2) = \sigma_{kj}^0 \rho(t_1 - t_2) \Psi(t_1 - t_2), \quad (13)$$

$$\text{де } \Psi(t_1 - t_2) = \text{Re} \int_D \dot{S}_0[t_1 - t_3(\bar{r})] \dot{S}_0^*[t_2 - t_3(\bar{r})] d\bar{r}. \quad (14)$$

Кореляційну матрицю білих шумів  $\bar{\xi}(t)$  вважаємо діагональною (внутрішні шуми в прийомних каналах вертикальної і горизонтальної поляризації вважаємо незалежними між собою)

$$\underline{R}_{\xi}(t_1, t_2) = \frac{N_{0\xi}}{2} \delta(t_1 - t_2) = \text{diag} \left( \frac{N_{0BB}}{2}, \frac{N_{0\Gamma\Gamma}}{2} \right) \delta(t_1 - t_2). \quad (15)$$

Процеси  $\bar{n}(t)$  і  $\bar{\xi}(t)$  також вважаємо між собою незалежними. Тоді сумарна кореляційна функція перешкод буде дорівнювати

$$\underline{R}_{n\Sigma}(t_1, t_2) = \underline{R}_n(t_1, t_2) + \underline{R}_{\xi}(t_1, t_2). \quad (16)$$

Вважаючи, що інтервал кореляції перешкод значно менше інтервалу спостереження  $(0, T)$  знаходимо зворотну матрицю  $\underline{W}(t_1, t_2)$  методом перетворень Фур'є

$$\underline{W}(t_1, t_2) = F^{-1} \{ G_{n\Sigma}^{-1}(\omega) \},$$

$$G_{n\Sigma}(\omega) = F \{ R_{n\Sigma}(t_1 - t_2) \} = \underline{\sigma}^0 G(\omega) + 0,5 N_{0\xi},$$

де

$$\underline{\sigma}^0 = \begin{Bmatrix} \sigma_{11}^0 & \sigma_{12}^0 \\ \sigma_{21}^0 & \sigma_{22}^0 \end{Bmatrix}, \quad G(\omega) = G_p(\omega) \otimes |\dot{S}_0(j\omega)|^2,$$

$\dot{S}_0(j\omega) = F \{ \dot{S}_0(t) \}$ , 11=BB BB, 12=BB ГГ, 21=ГГ BB, 22=ГГ ГГ,  $F\{\cdot\}$  – оператор перетворення Фур'є.

Якщо часові флуктуації поверхні пов'язані тільки з рухом її нерівностей, то коефіцієнт відбиття  $\dot{F}_k$  має таку ж структуру як і для малих нерівностей [6], що знаходяться в дальній зоні Фраунгофера. Тоді  $\sigma_{21}^0 = \sigma_{12}^0 = \sqrt{\sigma_{11}^0 \sigma_{22}^0}$  і  $n_1(t) = \sqrt{\sigma_{11}^0} v(t)$ ,  $n_2(t) = \sqrt{\sigma_{22}^0} v(t)$ . При цьому матриця  $G_{n\Sigma}^{-1}(\omega)$  прийме наступний вигляд

$$\underline{G}_{n\Sigma}^{-1}(\omega) = \underline{G}_W(\omega) = \begin{Bmatrix} \sigma_{11}^0 G(\omega) + 0,5 N_{011} & \sqrt{\sigma_{11}^0 \sigma_{22}^0} G(\omega) \\ \sqrt{\sigma_{11}^0 \sigma_{22}^0} G(\omega) & \sigma_{22}^0 G(\omega) + 0,5 N_{022} \end{Bmatrix}^{-1} = \frac{1}{\Delta} \begin{Bmatrix} \sigma_{22}^0 G(\omega) + 0,5 N_{022} & -\sqrt{\sigma_{11}^0 \sigma_{22}^0} G(\omega) \\ -\sqrt{\sigma_{11}^0 \sigma_{22}^0} G(\omega) & \sigma_{11}^0 G(\omega) + 0,5 N_{011} \end{Bmatrix} = \|G_{Wij}(\omega)\|, \quad (17)$$

$$\Delta = \left( \sigma_{22}^0 \frac{N_{011}}{2} + \sigma_{11}^0 \frac{N_{022}}{2} \right) G(\omega) + \frac{N_{011} N_{022}}{4}, \quad i = \overline{1, 2}, \quad j = \overline{1, 2}.$$

Запишемо інтеграл (12) в спектральній формі

$$Y(j\omega, \bar{\lambda}) = \bar{u}^T(j\omega) \underline{G}_W(\omega) \bar{S}^*(j\omega) =$$

$$\begin{aligned} &= \| \bar{u}_{BB}(j\omega) \quad \bar{u}_{\Gamma\Gamma}(j\omega) \| \begin{Bmatrix} G_{W11}(\omega) & G_{W12}(\omega) \\ G_{W21}(\omega) & G_{W22}(\omega) \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{S}_{BB}^*(j\omega) \\ \dot{S}_{\Gamma\Gamma}^*(j\omega) \end{Bmatrix} = \\ &= \bar{u}_{BB} G_{W11} \dot{S}_{BB}^* + \bar{u}_{BB} G_{W12} \dot{S}_{\Gamma\Gamma}^* + \\ &+ \bar{u}_{\Gamma\Gamma} G_{W21} \dot{S}_{BB}^* + \bar{u}_{\Gamma\Gamma} G_{W22} \dot{S}_{\Gamma\Gamma}^*. \quad (18) \end{aligned}$$

Структурна схема пристрою, що реалізує цей алгоритм приведена на рисунку 1.

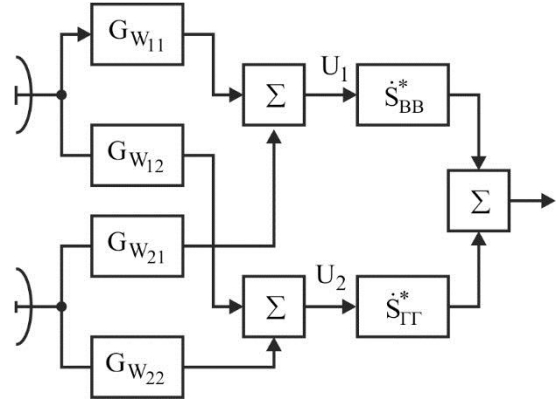


Рис. 1. Структурна схема бортового поляриметричного PCA з селекцією ЛЕП на тлі земної поверхні

У цьому пристрої в фільтрах  $G_{Wij}$  відбувається подавлення пасивних завад, а в фільтрах  $\dot{S}_k(j\omega)$  оптимальне когерентне накопичення траєкторних сигналів PCA і їх узгоджена фільтрація.

Операція подавлення пасивних завад в фільтрах  $G_{Wij}$  схожа з доплерівськими системами селекції рухомих цілей. Для того, щоб розібратися в механізмі селекції ЛЕП за рахунок використання поляризаційних відмінностей розглянемо проходження через цю систему лише пасивної перешкоди.

Припустимо, що поляризаційні канали ідентичні, тобто  $0,5 N_{0BB} = 0,5 N_{0\Gamma\Gamma} = 0,5 N_0$ , а також, що об'єкт має кругову симетрію і  $\dot{S}_{BB} = \dot{S}_{\Gamma\Gamma} = \dot{S}$ . Тоді складова пасивної завади на виході пристрою запишеться в такому вигляді

$$\dot{Y}_{\text{перешкод}}(j\omega) = \{ n_{BB}(j\omega)[G_{W11}(\omega) + G_{W12}(\omega)] + n_{\Gamma\Gamma}(j\omega)[G_{W21}(\omega) + G_{W22}(\omega)] \} \dot{S}^*(j\omega). \quad (19)$$

На виходах кожного з суматорів завадові складові мають такий вигляд

$$\begin{aligned} u_1(j\omega) &= n_{BB}(j\omega) G_{W11}(\omega) + n_{\Gamma\Gamma}(j\omega) G_{W21}(\omega) = \\ &= \frac{1}{\Delta} (n_{BB}(j\omega) \sigma_{22}^0 G(\omega) + 0,5 N_0 - n_{\Gamma\Gamma}(j\omega) \sqrt{\sigma_{11}^0 \sigma_{22}^0} G(\omega)). \quad (18) \end{aligned}$$

Припустимо  $0,5N_0 = 0$ , тоді враховуючи, що

$n_{\text{ВВ}}(j\omega) = \sqrt{\sigma_{11}^0} v(j\omega)$  і  $n_{\text{ГГ}}(j\omega) = \sqrt{\sigma_{22}^0} v(j\omega)$ ,  
отримаємо

$$u_1(j\omega) = \frac{1}{\Delta} \left( \sqrt{\sigma_{11}^0} \sigma_{22}^0 - \sqrt{\sigma_{22}^0} \sqrt{\sigma_{11}^0 \sigma_{22}^0} \right) v(j\omega) G(\omega) = 0. \quad (20)$$

Слід зауважити, якщо  $\sigma_{12}^0 = \sigma_{21}^0 = \sqrt{\sigma_{11}^0 \sigma_{22}^0}$ , то коефіцієнти кореляції перешкод різних поляризацій  $\gamma = \sigma_{21}^0 / \sqrt{\sigma_{11}^0 \sigma_{22}^0}$  рівні одиниці. Це найбільш сприятливий випадок для вирішення задачі подавлення завад за рахунок використання поляризаційних відмінностей.

Аналогічно, отримаємо, що при  $0,5N_0 = 0$ ,  $u_1(j\omega) = 0$ . Таким чином, стає зрозумілим механізм компенсації пасивних перешкод. Їх віднімання при ваговому додаванні вихідних сигналів поляризаційних каналів буде більш ефективним, при більшому коефіцієнт кореляції  $\gamma$  і низькому рівні внутрішніх шумів.

Запропонований алгоритм і структурна схема, що реалізує одночасне використання доплерівських і поляризаційних відмінностей між корисними сигналами і пасивними перешкодами дозволяє ефективно виділяти ЛЕП на тлі відбиття від землі в багатоканальних РСА. Отримані алгоритми адаптивні і синхронно міняють параметри фільтрів  $G_{Wij}$  зі зміною коваріаційної матриці розсіяння підстильної поверхні та можуть бути застосовані в перспективних когнітивних радарх вертолітного базування.

## Висновок

В роботі синтезовані алгоритми оптимальної селекції ЛЕП на тлі земної поверхні в бортових вертолітних радарх з синтезуванням апертури. У якості відмінних ознак були використані поляризаційні характеристики розсіяних сигналів на ЛЕП та земній поверхні. На основі отриманих результатів розроблена структурна схема бортового поляриметричного РСА з адаптивними декорелюючими фільтрами, що змінюють свої параметри відповідно до коваріаційної матриці розсіювання.

## Література

1. Volosyuk, V. K. *Statistical Theory of Radio-Engineering Systems of Remote Sensing and Radar [Text]* / V. K. Volosyuk, V. F. Kravchenko. – M. : Fizmatlit, 2008. – 740 p.

2. *Multiple Bands Dual Polarization Antenna System for Ground Surface State Estimation [Text]* / I. A. Kuzmin, D. V. Prihodko, I. V. Efremov, V. I. Oreshkin, A. I. Maksimovskaya // 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus) : Materials of the intern. conf., 28-31 Jan. 2019 Saint Petersburg and Moscow, Russia, 2019. – P. 2014-2017.

3. *UAV synthetic aperture radar system for control of vegetation and soil moisture [Text]* / K. S. Lyalin, A. A. Biryuk, A. Y. Sheremet, V. K. Tsvetkov and D. V. Prikhodko // 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus) : Materials of the intern. conf., 29 Jan.-1 Feb. 2018. – Moscow, Russia, 2018. – P. 1673-1675.

4. Huang, H. *Full Wave Solutions of Multiple Scattering Using Vector Spheroidal Waves and Addition Theorem [Text]* / H. Huang, L. Tsang, K. Ding // 2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting : Materials of the intern. symp., 8-13 July 2018. – Boston, USA, 2018. – P. 1753-1754.

5. *Spectral Aperture Synthesis Method [Text]* / V. Pavlikov, S. Zhyla, N. V. Huu // 2019 IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T) : Materials of the intern. conf., 8 Oct.- 11 Oct. 2019. – Kyiv, Ukraine, 2019. – P. 625-630.

6. Popov, A. *Polarization transfer functions of remote sensing objects [Text]* / A. Popov, M. Bortsova // 2016 9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW) : Materials of the intern. symp., 20-24 June 2016. – Kharkiv, 2016. – P. 1-4.

7. Popov, A. *Experimental Research of Polarization Transfer Functions of Mobile Ground Objects [Text]* / A. Popov, M. Bortsova // 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON) : Materials of the intern. conf., 2 July-6 July 2019. – Lviv, Ukraine, 2019. – P. 119-122.

8. Cloude, S. R. *Polarisation: applications in remote sensing [Text]* / S. R. Cloude, – Oxford : Oxford University Press, 2009. – 352 p.

9. Cloude, S. R. *A review of target decomposition theorems in radar polarimetry [Text]* / S. R. Cloude, E. Pottier // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1996. – No. 2. – P. 498-518.

## References

1. Volosyuk, V. K., Kravchenko, V. F. *Statisticheskaya teoriya radiotekhnicheskikh sistem dstantsionnogo zondirovaniya i radiolokatsii [Statistical Theory of Radio-Engineering Systems of Remote Sensing and Radar]*, Moscow, Fizmatlit Publ., 2008. 740 p.

2. Kuzmin, I. A., Prihodko, D. V., Efremov, I. V., Oreshkin, V. I., Maksimovskaya, A. I. *Multiple Bands Dual Polarization Antenna System for Ground Surface*

State Estimation. *2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, 28-31 Jan. 2019, Saint Petersburg and Moscow, Russia, 2019, pp. 2014-2017.

3. Lyalin, K. S., Biryuk, A. A., Sheremet, A. Y., Tsvetkov, V. K. and Prikhodko, D. V. UAV synthetic aperture radar system for control of vegetation and soil moisture. *2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, 29 Jan.-1 Feb. 2018, Moscow, Russia, 2018, pp. 1673-1675.

4. Huang, H., Tsang, L., Ding, K., Full Wave Solutions of Multiple Scattering Using Vector Spheroidal Waves and Addition Theorem. *2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, 8 July-13 July 2018, Boston, USA, 2018, pp. 1753-1754.

5. Pavlikov, V., Zhyla, S., Huu, N. V. Spectral Aperture Synthesis Method. *2019 IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of*

*Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T)*, 8-11 Oct. 2019, Kyiv, Ukraine, 2019, pp. 625-630.

6. Popov, A. Bortsova, M. Polarization transfer functions of remote sensing objects *2016 9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW)*, 20-24 June 2016, Kharkiv, 2016, pp. 1-4.

7. Popov, A. Bortsova, M. Experimental Research of Polarization Transfer Functions of Mobile Ground Objects *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, 2 July-6 July 2019, Lviv, Ukraine, 2019, pp. 119-122.

8. Cloude, S. R. *Polarisation: applications in remote sensing Oxford*. Oxford University Press, 2009. 352 p.

9. Cloude, S. R., Pottier, E. A review of target decomposition theorems in radar polarimetry *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, no. 2, pp. 498-518.

*Надійшла до редакції 15.06.2020, розглянуто на редколегії 15.08.2020*

### **ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ МНОГОКАНАЛЬНОГО БОРТОВОГО РАДАР С СИНТЕЗИРОВАНИЕМ АПЕРТУРЫ АНТЕННЫ И АЛГОРИТМОМ СЕЛЕКЦИИ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ НА ФОНЕ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

***В. К. Волосяк, В. В. Павликов, С. С. Жила,  
В. В. Кошарский, А. В. Одокиенко, Э. А. Цернэ***

Задачу синтеза оптимальной обработки сигналов в радарх с синтезированием апертуры, оснащенных режимом селекции линий электропередач, решено методом максимума функционала правдоподобия. В качестве отличительных признаков линий электропередач от земной поверхности выбраны поляризационные и доплеровские различия. Полезный сигнал на выходе когерентного приемника заданный в аналитическом виде с комплексной огибающей и высокочастотным гармоничным колебанием. Фоновое излучение подстилающей поверхности представлено в стохастической виде и полностью определено матрицей корреляционных функций. Внутренние шумы многоканального приемника описаны дельта-коррелированным случайным гауссовским процессом с одинаковой спектральной плотностью мощности в различных каналах наблюдения. В связи с тем, что фоновое излучение земной поверхности коррелировано во времени и на разных поляризациях, функционал правдоподобия записанный с обратной матрицей обратных корреляционных функций. Полученный оптимальный алгоритм заключается в подавлении пассивных помех в декорелирующих фильтрах, оптимальном когерентном накоплении траекторных сигналов для синтеза апертуры бортовой антенны и их оптимальной фильтрации в фильтрах, согласованные с опорным сигналом. Одновременное использование доплеровских и поляризационных различий между полезными сигналами и пассивными помехами позволяет эффективно выделять линии электропередач на фоне отражений от земли в многоканальных радарх с синтезированием апертуры. Предложенная последовательность операций над принятыми колебаниями может быть функциональным дополнением к режимам работы когнитивных радаров аэрокосмического базирования, адаптируясь в соответствии с заранее известной или измеренной в процессе дистанционных исследований ковариационной матрицы рассеяния подстилающей поверхности. На основе полученных результатов синтезирована структурная схема многоканального бортового поляризационного радара с синтезированием апертуры антенны. Разработка такого радара актуальна для системы предупреждения пилотов вертолета о столкновении, особенно при плохих погодных условиях в любое время года, днем и ночью.

**Ключевые слова:** метод максимального правдоподобия; поляризационные характеристики; синтез апертуры антенны; матрица корреляционных функций.

### **OPTIMIZATION OF THE STRUCTURE A MULTI-CHANNEL ON-BOARD RADAR WITH ANTENNA APERTURE SYNTHESIS AND ALGORITHM FOR POWER LINE SELECTION ON THE BACKGROUND OF THE EARTH SURFACE**

***V. Volosyuk, V. Pavlikov, S. Zhyla, V. Kosharskyi, O. Odokienko, E. Tserne***

The task of synthesizing optimal signal processing in synthetic aperture radars equipped with a selection mode of power lines was solved by the maximum likelihood method. The distinguishing features of power lines from the earth's surface selected polarization and Doppler differences. The useful signal at the output of the coherent receiver specified in an analytical form with a complex envelope and high-frequency harmonic oscillations. The background radiation of the underlying surface is presented in a stochastic form and is completely determined by the matrix of correlation functions. The internal noise of a multichannel receiver is described by a delta-correlated random Gaussian process with the same power spectral density in different observation channels. Since the background radiation of the earth's surface is correlated in time and at different polarizations functional likelihood recorded with the inverse matrix inverse correlation functions. The obtained optimal algorithm consists of suppression of passive interference in decorrelating filters, optimal coherent accumulation of trajectory signals for synthesizing the on-board antenna aperture, and their optimal filtering in filters matched with the reference signal. Simultaneous use of Doppler and polarization differences between wanted signals and passive interference allows you to effectively allocate power lines against the background of reflections from the ground in multichannel synthetic aperture radars. The proposed sequence of operations on the received oscillations can be a functional addition to the operating modes of aerospace-based cognitive radars, adapting by the covariance scattering matrix of the underlying surface known in advance or measured during remote sensing. The block diagram of a multichannel onboard polarization radar with a synthesized antenna aperture is synthesized based on the obtained results. The development of such a radar is relevant for a collision warning system for helicopter pilots, especially in bad weather conditions at any time of the year, day and night.

**Keywords:** maximum likelihood method; polarization characteristics; antenna aperture synthesis; matrix of correlation functions.

**Волосяк Валерій Костянтинович** – д-р техн. наук, проф., проф. каф. аерокосмічних радіоелектронних систем, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

**Павліков Володимир Володимирович** – д-р техн. наук., проректор з наукової роботи, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

**Жила Семен Сергійович** – канд. техн. наук, зав. каф. аерокосмічних радіоелектронних систем, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

**Кошарський Володимир Віталійович** – інж. каф. аерокосмічних радіоелектронних систем, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

**Одокієнко Олексій Володимирович** – канд. техн. наук, декан факультету радіоелектроніки, комп'ютерних систем та інфокомунікацій, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

**Церне Едуард Олексійович** – інж. каф. аерокосмічних радіоелектронних систем, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

**Valerii Volosyuk** – Doctor of Technical Science, professor, professor at the department of aerospace radio-electronic systems, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: valeriy\_volosyuk@mail.ru, ORCID Author ID: 0000-0002-1442-6235, Scopus Author ID: 7003358846, ResearcherID: A-2021-2019.

**Vladimir Pavlikov** – Doctor of Technical Science, vice rector for science, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: v.pavlikov@khai.edu, ORCID Author ID: 0000-0002-6370-1758, Scopus Author ID: 23397933100, ResearcherID: W-5274-2018.

**Simeon Zhyla** – Candidate of Technical Science, head of the department of aerospace radio-electronic systems, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: simeon.zhyla@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0003-2989-8988, Scopus Author ID: 35106469000, ResearcherID: A-1907-2019, Scopus Author ID: 57207914339.

**Volodymyr Kosharskyi** – Engineer at the department of aerospace radio-electronic systems, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: v.kosharsky@khai.edu, ORCID Author ID: 0000-0002-8569-2047.

**Oleksii Odokienko** – Candidate of Technical Science, dean of the faculty of radio-electronics, computer systems and infocommunications, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: o.odokienko@khai.edu, ORCID Author ID: 0000-0002-5227-1000, ResearcherID: G-4996-2018, Scopus Author ID: 56784405500.

**Tserne Eduard** – Engineer of the department of aerospace radio-electronic systems, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: e.tserne@khai.edu, ORCID Author ID: 0000-0003-0709-2238.