

І.Р. ПАРХОМЕЙ
Державний університет телекомунікацій
Ю. М. БОЙКО, О.І. ЄРЬОМЕНКО
Хмельницький національний університет

РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ ОБРОБКИ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ СИСТЕМ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

Розроблено структурну схему моделі обробки сигналів у радіотехнічній системі дистанційного зондування Землі. Формалізовано процес функціонування радіотехнічної системи дистанційного зондування Землі з багатопозиційним прийомом радіолокаційної інформації в операторній формі. Для аналітичного опису процесу часової та просторової обробки сигналів і просторово-часових операцій у розглянутих системах введено оператор «взаємодіючого» середовища. Аналітично досліджено процес виявлення сигналу від елемента поверхні Землі радіолокаційними засобами. Синтезовано апріорні щільності розподілу ймовірностей сигналів і шумів на входах приймачів радіолокаційної системи, які дозволяють оцінювати ефективність використаних способів і пристроїв захисту від завад.

Ключові слова: зондувальний сигнал, апертура, оператор, цільова функція виявлення.

I.R. PARHOMEY
State University of Telecommunications
J.M. BOIKO, A.I. EROMENKO
Khmelnitskyi National University

DEVELOPMENT MODELS OF SIGNAL PROCESSING RADAR REMOTE SENSING

Abstract - The block diagram model signal processing in radio systems for remote sensing. Formalized process of functioning of electronic remote sensing technique multiposition radar information in operator form. For analytical description of the process of temporal and spatial signal processing and spatial-temporal operations in the systems operator entered "interacting" environment. Analytical research process signal detection element of the Earth's surface radar means. Synthesized a priori probability distribution density signal and noise at the receiver input radar systems are used to assess the effectiveness of methods and devices of protection against noise.

Keywords: probing signal, aperture, operator, target detection function.

Вступ

В багатопозиційних радіолокаційних системах з синтезуванням апертури антени (РСА) використовується одна передавальна позиція, що рухається за обраною траєкторією і забезпечує підсвітлювання заданої зони огляду. Взаємно незалежні прийомні позиції, які використовують відбиті сигнали, формують радіолокаційні засоби (РЛЗ) об'єктів розташованих у зоні огляду. Число прийомних позицій і траєкторії їх руху визначаються специфікою завдань які слід розв'язати. При багатопозиційному режимі РСА можливе використання одночасно багатьох систем, що працюють тільки в режимі приймання, при одній передавальній позиції, яка опромінює задану зону моніторингу. Відсутність випромінювання в таких приймальних позиціях РСА підвищує скритність їх роботи. При цьому значно знижується маса і енергоспоживання прийомних позицій. Однак одночасно підвищуються вимоги до потужності випромінювання передавальної позиції, так як вона перебуває на значному віддаленні. Більша висота польоту передавальної позиції забезпечує зменшення радіолокаційних тіней [1].

Процес отримання та обробки інформації в радіотехнічних системах дистанційного зондування Землі з багатопозиційним прийомом радіолокаційної інформації (РТС ДЗЗ БПП РЛІ) в операторній формі можна представити структурною схемою, що наведена на рис. 1 [2, 3].

В схемі під багатоелементним передавачем і приймачем розуміється сукупність всіх передавальних і приймальних пристроїв РТС ДЗЗ БПП РЛІ. Управління вибором передавальної РЛС і тривалістю її роботи на випромінювання здійснюється з пункту збору та обробки радіолокаційної інформації (ПЗОРЛІ) радіокомандами управління $U(i, t_{\text{упр},k})$.

На схемі позначено: $N_0(t, D)$ – локальне джерело шуму (завад), що розташоване у точці D ; S_D – корисний сигнал, що несе інформацію про об'єкт моніторингу; S_I – сигнали і шуми (завади), що заважають; N_{cp} – шум середовища (шумове поле навколо передавача і приймачів, яке безперервне в часі і у просторі); N_p – завади, породжені сигналом; N_c – власні шуми системи; $\{u\}$ – множина типів сигналів РТС ДЗЗ БПП РЛІ; $\{f_u\}$ – множина несучих частот (літерів); $S^0(t)$ – зондувальний сигнал; $V_m(t) = S_m(t) + N(t)$ – сигнал, прийнятий m -ю приймальною РЛС; $S_m(t)N(t)$ – корисний сигнал (завади) на вході каналу обробки m -ї РЛС; n – множина прийнятих рішень.

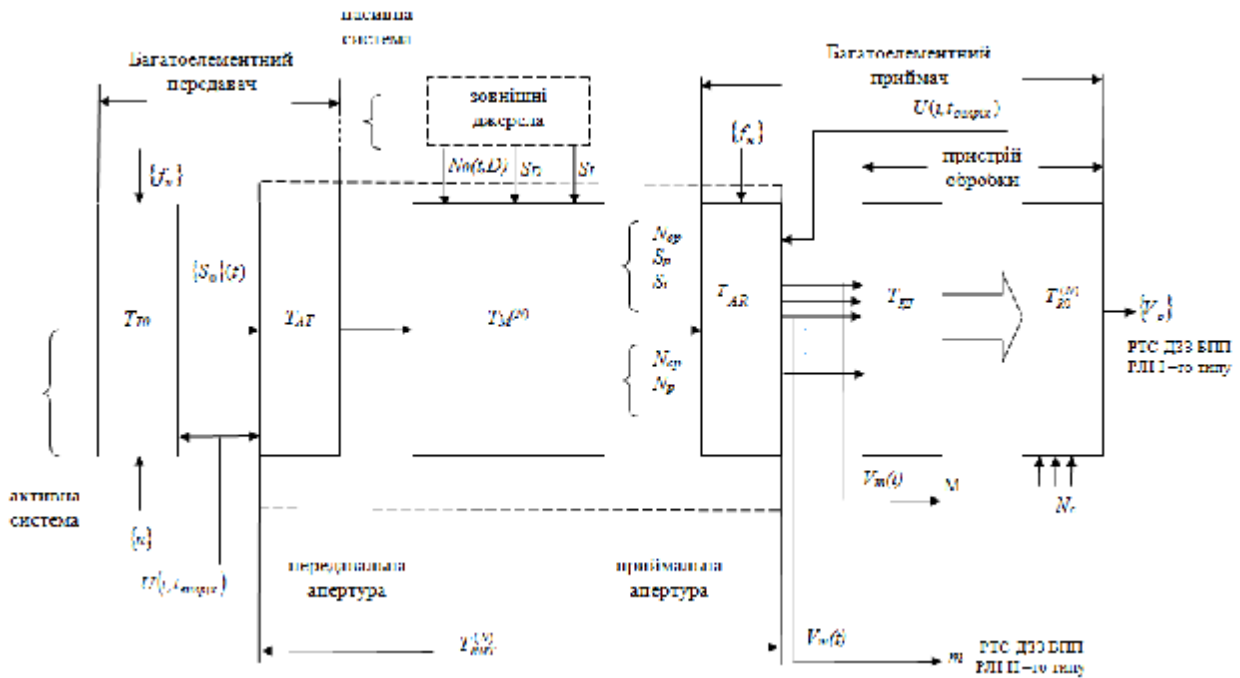


Рис. 1. Структурна схема моделі обробки сигналів у РТС ДЗЗ БПП РЛІ

Функціонування РТС ДЗЗ БПП РЛІ в операторній формі правомірно записати у вигляді:

а) якщо на передавальній позиції використовується РЛС із фазованою антенною решіткою (ФАР), а на прийомних позиціях багатопроменеві РЛС (РТС ДЗЗ БПП РЛІ І-типу), тоді отримуємо:

$$\{V_p\} = T_R^{(N)} T_M^{(N)} T_T \{u\} = T^{(N)}_{R0} T_{FD} (T_{AR} T_M^{(N)} T_{AT}) T_{T0} \{u\}, \quad (1)$$

де $T_T, T_M^{(N)}, T_R(N)$ – оператори, що описують відповідно процеси випромінювання, поширення в середовищі і прийому сигналів. Індекс (N) означає, що у відзначені частини каналу якимось чином вводиться шум; T_{m0} – оператор, що описує процес вибору випромінюваного сигналу; $T^{(N)}_{R0}$ – оператор, що описує часову обробку інформації; T_{FD} – оператор, що описує процес фокусування за дальністю сигналів, прийнятих елементами системи; T_{AR}, T_{AT} – оператори, що описують передавальну і приймальну синтезовану апертуру відповідно;

б) якщо на передавальній позиції використовується РЛС із ФАР, а на приймальних позиціях – однопроменеві РЛС (РТС ДЗЗ БПП РЛІ ІІ-типу), то отримуємо:

$$\{V_p\} = T_{Rm}^{(N)} (T_{ARm}) T_{Ti} \{u\} = T_{Rm}^{(N)} (T_{ARm} T_M^{(N)} T_{ATi}) \{u\}, \quad (2)$$

де індекс i відноситься до номеру передавальної РЛС, яка працює на випромінювання протягом інтервалу $t \in (0, t_{випр, i, \kappa})$, а індекс m відноситься до працюючих на прийом РЛС, у тому числі і до пристрою обробки сигналів передавальної РЛС.

Оскільки оператори T_{AT} і T_{AR} поєднують як часову, так і просторову обробку, то для опису всіх просторово-часових операцій у розглянутих систем можна виділити оператор «взаємодіючого» середовища:

$$T_{RMT}^{(N)} = T_{ARm} T_M^{(N)} T_{ATi}. \quad (3)$$

У випадку, коли використовуються системи зондування Землі, в структурі яких, на передавальній позиції застосовуються РЛС із фазованою антенною решіткою (ФАР), а на прийомних – багатопроменеві РЛС, найбільший інтерес представляє оператор приймальної синтезованої апертури системи:

$$\vec{T}_{AR} = \sum_{m=1}^M T_{ARm}, \quad (4)$$

що описує процес утворення в пристрої спільної обробки радіолокаційної інформації (ПЗОРЛІ) векторної суми сигналів окремих апертур відносно інтервалу випромінювання ЕМХ відповідної передавальної РЛС:

$$S(t \in (0, t_{випр, i, \kappa})) = \sum_{m=1}^M S_m(t \in (0, t_{випр, i, \kappa})). \quad (5)$$

Запам'ятовуючи на якийсь час амплітуду і фазу сигналу, прийнятого m -ю апертурою, і вводячи їх корекцію, можна одержати для кожного каналу дальності деякий синтезований розкрит приймальних антен РТС ДЗЗ БПП РЛІ. Величина затримки у формуванні синтезованого розкрит приймальних антен системи визначається часом проходження відбитого від об'єкту моніторингу сигналу до самої віддаленої РЛС і часом його передачі по лінії зв'язку в ПЗОРЛІ.

Під синтезованим розкритом приймальних антен РТС ДЗЗ БПП РЛІ розуміється такий

еквівалентний розкриття, що забезпечує формування діаграми спрямованості, яка відповідає векторній сумі сигналів (4), отриманої на виході ПЗОРЛІ для кожного каналу окремо. Основною проблемою в даному випадку є формалізація математичної моделі цифрового оброблення процесу приймання сигналів у радіотехнічних системах дистанційного зондування Землі з багатопозиційним прийомом радіолокаційної інформації. Саме вирішенню зазначеної актуальної проблеми присвячена стаття.

Аналіз останніх досліджень і публікацій та розробка питання формалізації математичної моделі цифрового оброблення процесу приймання сигналів

Фокусування сигналів за дальністю (оператор T_{FD}) еквівалентно фокусуванню синтезованого розкриття в точку знаходження виявленого об'єкта моніторингу [3].

Структура оператора T_{ARm} , що входить в (3), визначається із просторового опису радіолокаційного сигналу як хвилі на вході m -ї РЛС системи. Оскільки поляризаційна структура хвилі практично не впливає на визначення координат об'єкта [4], можна обмежитися скалярним представленням хвилі і вважати, що приймальні антени настроєні на поляризацію хвилі передавальної РЛС.

Просторові характеристики m -ї РЛС системи описуються комплексною ДСА $G(u_x, u_y)$, де u_x, u_y - направляючі косинуси кутів [4].

Для дальньої зони хвиля елементарної поверхні антени із центром у точці (x, y) описується виразом [4]

$$dS(x, y, D, t) = \sqrt{1 - u_x^2 - u_y^2} G(x, y) \frac{E_D}{4\pi D} \times \exp\left\{j2\pi\left(f \pm F_D\left(t - \frac{2D}{c}\right)\right)\right\} d_x d_y, \quad (6)$$

де $\sqrt{1 - u_x^2 - u_y^2} = u_z$ - направляючий косинус, що відлічується відносно нормалі до розкриття антени; E_D - напруженість електричного поля відбитого сигналу S_D ; $D = D_0 + \Delta D = x u_x + y u_y + x_0 u_x + y_0 u_y$ - поточна дальність до об'єкта моніторингу відносно розглянутої РЛС.

Не враховуючи шумову складову вхідного впливу ($N_{cp}(t, D)=0$) і вважаючи, що власний шум широкопasmовий і гаусівський ($N_c \neq 0$), отримуємо на виході антени m -ї РЛС сигнал, який описаний оператором T_{ARm}

$$S_m(t) = T_{AR} \{S_D\} = \frac{u_z}{4\pi D_{um}} \int_{L_{xm}} \int_{L_{ym}} d_x d_y \int_{-\infty}^{\infty} G(x, y) E_{D_{um}} \times \exp\left\{j2\pi(f_n \pm F_{Dm})(t - \tau_m)\right\} d\tau_m, \quad (7)$$

де L_x, L_y - розміри приймальної апертури m -ї РЛС по осях x і y ; $\tau_m = \frac{D_{um}}{c}$ - час затримки відбитого сигналу відносно m -ї РЛС.

Оператор фокусування за дальністю T_{FD} має вигляд

$$T_{FD} \{V_m\} = V_m \exp^{j\Delta\phi_{Fm}}, \quad (8)$$

де $\Delta\phi_{Fm}$ - фазовий зсув між сигналами, прийнятими основною і m -ю допоміжною РЛС; V_m - амплітуда сигналу на виході антени m -ї РЛС.

Оператор T_{AT} визначається на основі принципу взаємності

$$T_{AT} \{S^0\} = S_D = \frac{u_z}{4\pi D_{ui}} \int_{L_{xi}} \int_{L_{yi}} d_x d_y \int_{-\infty}^{\infty} G(x, y) E_{D_{ui}} \times \exp\left\{j2\pi f_n(t - \tau_i)\right\} d\tau_i, \quad (9)$$

де $E_{D_{ui}}^0$ - напруженість електричного поля випромінюваного i -ю передавальною РЛС сигналу $S^0 \in \{u\}$; $\tau_i = \frac{D_{ui}}{c}$ - затримка сигналу відносно i -ї передавальної РЛС.

Оператор $T_M^{(N)}$ у загальному виді визначається виразом [4]

$$T_M^{(N)} \{S\}_{Pj} = S_D = \int H_p \left\{ \frac{t - \tau_{ij}}{D_{uij}}, \frac{t - \tau_{mj}}{D_{uij}} \right\} \{S\}_{t-\tau}, \quad (10)$$

де $H\{\cdot\}$ - деякий лінійний фільтр, визначений характеристиками j -го відбивача поверхні; $D_{ui(m)j}$ -

дальність j -го об'єкта відносно i -ї (m -ї) РЛС.

Оператор $T_M^{(N)}$ може бути як детермінованим, так і описувати випадкові ефекти, наприклад, завмирання, затримки при поширенні радіохвиль і т.п.

Час перетворення (формування, генерування, прийому, обробки і прийняття рішень) кожним оператором визначає довжину відповідної дуги граф-моделі системи зондування. Показники ефективності обробки сигналів (оператори T_{R0} , T_{Rm}) в системах різних рівнів визначаються довжинами маршрутів відповідних цільових функцій виявлення (контурів графа, що не мають загальних ребер) [5–7].

Формалізація процесу виявлення сигналу від елементу поверхні Землі радіолокаційними засобами

Довжини маршрутів цільових функцій виявлення сигналів від елементів поверхонь об'єктів моніторингу $l_{\phi o}$ визначаються сумою дуг [7]:

- для основної РЛС:

$$l_{\phi o e} = e_1 + e_2 + e_3^1, \tag{11}$$

- для m -ї допоміжної РЛС:

$$l_{\phi o m} = e_1 + e_2^1 + e_c + e_4^1, \tag{12}$$

- для ПСОРЛІ:

$$l_{\phi o n} = \begin{cases} e_1 + e_2 + e_3 + e_5; \\ e_1 + e_2^1 + e_4 + e_5 + e_c; \\ e_1 + e_2 + e_3 + e_2^1 + e_4 + e_5; \end{cases} \tag{13}$$

В ідеальному випадку виявлення сигналу від елементу поверхні Землі кожною із РЛС здійснюється за одним прийнятим імпульсом. При цьому довжини дуг дорівнюють: $e_1 = e_2 = D_{цe}/3$, $e_2^1 = D_{цm}/3$, $e_3^1(e_4^1) = t_{обр}$ (час, що витрачається на обробку прийнятого сигналу і прийняття рішення), $e_5 = e_7 = t_{обр}$. Довжина дуги e_c визначається часом, що витрачається на синхронізацію РЛС. Якщо в системі здійснюється двоетапна просторово-часова синхронізація [6, 7], то за рахунок введення попередження у видачі координат і автоматичного врахування бази у цільових функціях виявлення (12) і (13) довжину дуги e_c можна прийняти рівною нулю.

Якщо в кожній РЛС здійснюється цифрова обробка, $t_{обр} \ll D_{цe(m)}/c$, то і часом $t_{обр}$ можна знехтувати.

Тоді мінімальна довжина маршрутів цільових функцій виявлення складе:

$$\begin{aligned} l_{\phi o e, \min} &= 2D_{цe} / c; \\ l_{\phi o m, \min} &= D_{цe} / c + D_{цm} / c; \\ l_{\phi o n, \min} &= D_{цe} / c + D_{цm} / c + \max\left\{\frac{d_{ne}}{c}, \frac{d_{nm}}{c}\right\}, \end{aligned}$$

де d_{ne} (d_{nm}) – змінна відстань (база) між РЛС і ПСОРЛІ.

Однак, для забезпечення необхідної ефективності виявлення $P_{виявл} > P_{виявл}^*$, необхідно здійснювати накопичення енергії декількох (K_n) відбитих імпульсів. Причому, для кожної РЛС K_n може бути різним. Це означає, що дуги, які описують випромінювання і прийом сигналів, збільшуються на величину $(K_n - 1)T_n$:

$$\begin{aligned} l_{\phi o e} &= (K_{ne} - 1)T_n + 2D_{цe} / c; \\ l_{\phi o m} &= (K_{ne} - 1)T_n + D_{цe} / c + D_{цm} / c; \\ l_{\phi o n} &= (K_{ne} - 1)T_n + D_{цe} / c + D_{цm} / c + \max\left\{\frac{d_{ne}}{c}, \frac{d_{nm}}{c}\right\}, \end{aligned}$$

де K_{ne} – кількість імпульсів, випромінюваних РЛС з імовірністю P^* .

Якщо за опорну (базову) довжину маршруту функції виявлення прийняти $l_{\phi o e}$, то тоді нормовані довжини маршрутів цільових функцій виявлення запишуться у вигляді:

$$l_{\phi o e} = 1; \tag{14}$$

$$l_{\phi o m} = \frac{(K_{ne} - 1)T_n C + D_{цe} + D_{цm}}{(K_{ne} - 1)T_n C + D_{цe}}; \tag{15}$$

$$l_{\text{фон}} = \frac{(K_{\text{не}} - 1 - K_{\text{неп}}^1)T_n C + D_{\text{цв}} + D_{\text{цт}} + \max\{d_{\text{не}}, d_{\text{цт}}\}}{(K_{\text{не}} - 1)T_n C + 2D_{\text{цв}}} \quad (16)$$

Варто врахувати, що результат накопичення $K_{\text{не}}$ відбитих імпульсів буде неоднаковим для кожної РЛС системи, оскільки через неоднакову потужність прийнятих сигналів відношення сигнал/шум на виходах їх приймачів буде різним.

Для такої геометрії системи, коли $D_{\text{цт}} < D_{\text{цв}}$, за інших рівних умов для одержання однакового значення $P_{\text{виявл}}$ m -ї РЛС найімовірніше буде потрібна менша кількість імпульсів $K_{\text{не}}$, що накопичуються. Але, оскільки при багатопозиційному прийомі радіолокаційної інформації, кількість імпульсів, що накопичуються, у кожному кутовому напрямку задається основною РЛС, то у допоміжних РЛС (ПЗОРЛІ) накопичення сигналу для одержання такого ж відношення сигнал/шум, як на основній РЛС, настає на $K_{\text{неп}}^1$ ($K_{\text{неп}}^1$) імпульсів раніше, тобто за більш короткий час:

$$l_{\text{фом}} = \frac{(K_{\text{не}} - 1 - K_{\text{неп}}^1)T_n C + D_{\text{цв}} + D_{\text{цт}}}{(K_{\text{не}} - 1)T_n C + D_{\text{цв}}}, \quad (17)$$

$$l_{\text{фон}} = \frac{(K_{\text{не}} - 1 - K_{\text{неп}}^1)T_n C + D_{\text{цв}} + D_{\text{цт}} + \max\{d_{\text{не}}, d_{\text{цт}}\}}{(K_{\text{не}} - 1)T_n C + 2D_{\text{цв}}} \quad (18)$$

Значення $K_{\text{неп}}^1$ і $K_{\text{неп}}^1$ знаходяться для конкретних вихідних даних за залежностями необхідного відношення сигнал/шум від числа проінтегрованих імпульсів.

Таким чином, розроблена модель функціонування РТС ДЗЗ БПП РЛІ для різних типів його реалізації дозволяє відокремити чисто часову обробку сигналів від просторово-часових операцій, обумовлених характеристиками антен і фізичними властивостями конкретного середовища між передавачем (основною РЛС), j -м повітряним об'єктом і M -елементним приймачем (допоміжними РЛС), і на цій основі для кожного T_n при i -му типі формувати деякий еквівалентний розкрит приймальних антен системи зондування і здійснювати його фокусування в частині зони моніторингу.

Модель дозволяє врахувати вплив різного роду завад на окремі РЛС системи, а також дозволяє оцінювати ефективність використаних способів і пристроїв захисту від завад.

Крім того, вона дозволяє встановлювати зв'язок між показниками ефективності обробки сигналів і технічними характеристиками об'єднаних у систему РЛС із заданою геометрією системи.

При застосуванні РТС ДЗЗ БПП РЛІ І-го типу зв'язок M -елементного пристрою (пункту) спільної обробки ІС із середовищем у межах області проведення спільного огляду здійснюється за допомогою M рознесених у просторі приймальних антен.

Так як вхідний сигнал кожної антени окремо впливає на пристрій спільної обробки $T_{(N)R0}$, оператор можна представити як M -мірний вектор з компонентами, пронумерованими відповідно до положення приймальних антен у просторі.

Корисний сигнал, що надходить на вхід пристрою спільної обробки $T_{(N)R0}$, можна записати у вигляді:

$$s(t) = \overset{\cdot}{T}_{AR} \{N_{cp}(t, D_D)\} = \overset{\cdot}{T}_{AR} \{T_M^{(N)} \{N_0(t, D) \otimes S_D\}\}, \quad (19)$$

де символ \otimes читається «у комбінації з...».

У загальному випадку прийнятий сигнал має вид:

$$V(t) = S(t) \otimes N(t), \quad (20)$$

де шум представимо аналітично наступним чином:

$$N(t) = \overset{\cdot}{T}_{AR} \{N_{cp}(t, D_D)\} + N_c. \quad (21)$$

Шуми системи N_c стосовно приймача m -ї РЛС виражаються через шуми антенно-хвильовідного тракту в лінійній частині приймача. Додатковий шум може виникнути в пристрої обробки, однак він малий у порівнянні з N_c і його можна не врахувати. Тому пристрій спільної обробки можна вважати безшумним і в T_{R0} індекс (N) можна опустити.

У більшості випадків, що представляють інтерес, середовище є адитивним, і операція може бути замінена сумою:

$$V(t) = \begin{cases} S(t) + N(t), & \text{якщо } S \neq 0 \\ N(t), & \text{якщо } S = 0 \end{cases} \quad (22)$$

Умовна щільність розподілу імовірності суміші сигналу із шумом, що надходить на вхід T_{R0} у припущенні, що $S(t) > 0$, записується у вигляді:

$$\omega_L(V/S) = \omega_L(V - S)_N, \quad (23)$$

де $\omega_L(\cdot)_N$ – спільна щільність розподілу ймовірності L -компонентного вектора ($L=M \times n$), для дискретизованого за часом векторного процесу N , визначеного співвідношенням (21).

$$N = [N_m(t_s)], (S = \overline{1, n}; m = \overline{1, M}). \quad (24)$$

На додаток до описаних навколишніх шумових полів і шумів системи можуть мати місце шумові поля, що породжуються сигналом (розсіювання, багатопроменеве поширення і розсіювання від однієї або декількох блискучих точок об'єкта). У випадку адитивності середовища, залежну від сигналу, частку можна представити у вигляді суми трьох складових:

$$T_{MA}^{(N)}\{j\} = T_M^{(N)}\{j\}_p + T_M^{(N)}\{j\}_{\bar{b}n} + T_M^{(N)}\{j\}_u, \quad (25)$$

де індекси $p, \bar{b}n, u$ означають частку шумів, що припадають відповідно на розсіювання, багатопроменеве поширення і відбиття від об'єктів моніторингу.

Компонента $T_M^{(N)}\{j\}_p$, яка діє на хвилю, що поширюється в середовищі, є характеристикою джерела завад.

У компоненті $T_M^{(N)}\{j\}_{\bar{b}n}$ в загальному випадку міститься корисна інформація про об'єкт, однак в існуючих РЛС вона практично не задіяна. Компонента $T_M^{(N)}\{j\}_u$ описує вхідні сигнали приймача.

Таким чином, на вході ПЗОРЛІ векторні шумові і сигнальні процеси описуються наступними виразами

$$T(t) = \dot{T}_{AR}(N_{cp}) + N_c + \dot{T}_{RMT}(S^0)_p + T_{RMT}T_{T0}(S^0)_{\bar{b}n}, \quad (26)$$

$$S(t) = T_{RMT}\dot{T}_{T0}(S^0)_u; \quad (27)$$

на вході приймача i -ї РЛС:

$$N_i(t) = \dot{T}_{ARi}\{N_{cp}\}N_i + \dot{T}_{RMTi}^{(N)}\{S^0\}_p + \dot{T}_{RMT}T_{T0i}\{S^0\}_{\bar{b}n}, \quad (28)$$

$$S_i(t) = \dot{T}_{RMTi}^{(N)}T_{T0i}\{S^0\}_u, \quad (29)$$

де N_i – шум антенно-хвильоводної і лінійної частини приймача i -ї РЛС.

$$N_m(t) = \dot{T}_{ARm}\{N_{cp}\} + N_m + \dot{T}_{RMTim}^{(N)}\{S^0\}_p + \dot{T}_{RMTim}T_{T0i}\{S^0\}_{\bar{b}n}; \quad (30)$$

$$S_i(t) = \dot{T}_{RMTim}^{(N)}T_{T0i}\{S^0\}_u, \quad (31)$$

де N_m – шуми антенно-хвильовідної і лінійної частини приймача m -ї РЛС.

Апріорні щільності розподілу ймовірностей сигналів і шумів на входах приймачів РЛС системи записуються у вигляді:

а) для шуму:

$$\omega_{Nm} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{Nm}}} \exp(-N_m^2 / 2\sigma_{Nm}^2), \quad (32)$$

де $N_m = [N_{mj}]$ – вектор напруги шуму на вході приймача m -ї РЛС, вимірюваного в j -ї ($j = \overline{1, Z}$)

моменти часу $t_j \in (0, t_{\text{випрп.к}} + T_n)$; σ_{Nm} – дисперсія шуму на вході приймача m -ї РЛС ($m = \overline{1, M}$);

б) для суміші сигналу із шумом для основної РЛС:

$$\omega_{Vi} = \frac{1}{\sqrt{2p\sigma_{Ni}}} \exp\left(-\frac{(V_i - \bar{S}_i)^2}{2\sigma_{Ni}^2}\right), \quad (33)$$

де σ_{Ni}^2 – дисперсія шуму на вході приймача i -ї РЛС; \bar{S}_i – середнє значення очікуваного сигналу на вході приймача i -ї РЛС, яке визначають з рівняння дальності для сполучених систем [7];

в) для приймальної РЛС:

$$\omega_{Vm} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{Nm}}} \exp\left(-\frac{(V_{mi} - \bar{S}_{mi})^2}{2\sigma_{Nm}^2}\right), \quad (34)$$

де V_{mi} – суміш шуму із сигналом i -ї РЛС, відбитим від j -го елемента поверхні об'єкту моніторингу; \bar{S}_{mi} – середнє значення очікуваного сигналу на вході приймача m -ї РЛС при опроміненні j -го об'єкта i -ю передавальною РЛС, яке визначається з рівняння дальності для рознесеної радіолокації.

Висновки

Отже, підсумовуючи викладене, варто відмітити наступні результати досліджень:

1. Розроблено модель функціонування РТС ДЗЗ БПП РЛІ для різних типів його реалізації, яка дозволяє відокремити чисто часову обробку сигналів від просторово-часових операцій, обумовлених характеристиками антен і фізичними властивостями конкретного середовища.

2. Розроблена модель функціонування РТС ДЗЗ БПП РЛІ дозволяє враховувати вплив різного роду завад на окремі РЛС системи, а також дозволяє оцінювати ефективність використовуваних способів і пристроїв захисту від завад.

3. Отримана модель (17), (18) обробки радіолокаційних сигналів дозволяє встановлювати зв'язок між показниками ефективності обробки сигналів і технічними характеристиками об'єднаних у систему РЛС із заданою геометрією системи.

4. Отримана формалізація щільностей розподілу ймовірностей сигналів і шумів (завад) достатня для статистичного моделювання процесів формування радіолокаційної інформації для РТС ДЗЗ БПП РЛП розглянутих типів у будь-якій комбінації «*i*-а передавальна - *m*-а приймальна РЛС» для використаних типів сигналів, значень носійних частот, діапазонів швидкостей польоту носіїв РЛС і тривалості опромінення *j*-го об'єкта поверхні моніторингу *i*-ю РЛС.

5. Синтезовані апіорні щільності розподілу ймовірностей сигналів і шумів на входах приймачів РЛС (32 - 34) дозволяють провести опис шумових параметрів сигналів в залежності від типу РЛС.

Література

1. Пархомей І.Р. Особливості функціонування радіолокаційних систем локації об'єктів з низькою поверхнею віддзеркалення / І.Р. Пархомей, Ю.М. Бойко // Вісник Хмельницького національного університету. – 2015. – № 5. – С. 194–201.

2. Кондратенков Г.С. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. Учебное пособие для вузов / Г.С. Кондратенков, А.Ю. Фролов ; под ред. Г. С. Кондратенкова. – М. : «Радиотехника», 2005. – 368 с.

3. Радиолокационные станции обзора Земли / Г.С. Кондратенков, В.А. Потехин, А.П. Реутов, Ю.А. Феоктистов ; под. ред. Г.С. Кондратенкова. – М. : Радио и связь, 1983. – 272 с.

4. Саблин В.Н. Разведывательно-ударные комплексы и радиолокационные системы наблюдения земной поверхности / В.Н.Саблин – М. : Радиотехника, 2002. – 250 с.

5. Harger R.O. Synthetic aperture radar system. New-York, London, Academic Press, 1970. 316 p.

6. Богданович В.Ю. Пути повышения живучести зенитных средств современной противовоздушной обороны в условиях применения противником самонаводящегося на источник электромагнитного излучения оружия / Богданович В.Ю. – К. : ВПЦ «Тираж», 2004. – 116 с.

7. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход / Кристофидес Н. ; под. ред. Г. П. Гаврилова. – М. : Мир, 1976. – 204 с.

Рецензія/Peer review : 18.1.2016 р.

Надрукована/Printed : 11.2.2016 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Мартинюк В.В.