

УДК 621.396.962.

ВАРІАНТИ ПРАВИЛ ВИЯВЛЕННЯ РАДІОМЕТРИЧНОГО СИГНАЛУ ПРИ ОДНОКАНАЛЬНОМУ ПРИЙОМІ

В.Є. Кудряшов, С.М. Тамаш, Д.С. Шмаков

*Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба,
факультет протиповітряної оборони Сухопутних військ,
вул. Сумська 77/79, Харків, 61023, Україна, тел. 704-96-01
Поступила до редакції 1 грудня 2017 р.*

На основі методу відношення правдоподібності знайдено правило виявлення радіометричного сигналу, розподіленого за вінеровським процесом. Представлено хід здобуття правил виявлення нестационарного корисного сигналу на фоні нестационарних коливань, що заважають, включаючи шум радіометра. Перший варіант правила виявлення радіометричного сигналу отримано при використанні похідних вхідних процесів. Другий варіант правила виявлення заснований на процесах з незалежними приращеннями, для яких різниці мають нормальне розподілення з означеними параметрами. Введені фізично існуючі незначні спрощення. По правилах виявлення радіометричного сигналу з врахуванням рівня порогу складені схеми, що технічно реалізуються.

КЛЮЧЕВІ СЛОВА: радіометричний сигнал, одноканальний прийом, нестационарний випадковий процес, правило виявлення, відношення правдоподібності, радіометр

На основе метода отношения правдоподобия найдено правило обнаружения радиометрического сигнала, распределенного как винеровский процесс. Представлен ход получения правил обнаружения нестационарного полезного сигнала на фоне нестационарных мешающих колебаний, включая шум радиометра. Первый вариант правила обнаружения радиометрического сигнала получен при использовании производных входных процессов. Второй вариант правила обнаружения основан на процессах с независимыми приращениями, для которых разности имеют нормальное распределение с определенными параметрами. Введены физически существующие незначительные упрощения. По правилам обнаружения радиометрического с учетом порогового уровня составлены схемы, которые технически реализуются.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: радиометрический сигнал, одноканальный прием, нестационарный винеровский процесс, правило обнаружения, отношение правдоподобия, радиометр

The Wiener-distributed radiometric signal detection rule is obtained based on the maximum likelihood estimation method. The obtainment of the detection rules is presented for the non-stationary signal against the non-stationary interfering background signals and the noise of radiometer. The first version of the radiometric signal detection rule is obtained using the derivatives of the input processes. The second version of the detection rule is based on the processes with independent increments, for which the differences have a normal distribution with the certain parameters. Physically existing minor simplifications have been introduced. The technically feasible block diagrams are given for these detection rules of radiometric signal accounting the threshold level.

KEYWORDS: radiometric signal, single-channel reception, non-stationary Wiener process, detection rule, likelihood ratio, radiometer.

ВСТУП

Постановка задачі. Вінеровський процес описує броунівський рух часток, які здійснюють хаотичні переміщення [1], що є джерелом радіометричного (РМ) випромінювання [2]. Заради побудови якісних РМ зображень необхідно мати правило виявлення даних сигналів. На основі правила виявлення формується схема одноканального радіометра, яка повинна бути відповідно простою та реалізуємою технічно. Тому визначення правила виявлення РМ сигналу на фоні нестационарних коливань та формування схеми одноканальних радіометрів є важливим і актуальним завданням [3-6].

Аналіз публікацій за темою статті показує [4,5] що є структурні схеми пристроїв виявлення (радіометрів), які можуть забезпечити картографування. Також недоліком публікацій [3-9] є відсутність схем пристрою виявлення, побудованого за правилом виявлення за вінеровським процесом з врахуванням рівня порогу.

Метою статті є представлення варіантів правил виявлення нестационарного РМ сигналу та формування схеми реалізації одноканального радіометра з врахуванням коливань, які заважають, та рівня порогу.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Нехай об'єкт картографування випромінює РМ коливання у вигляді випадкового нестационарного процесу. Дані коливання мають достатньо широкий спектр частот [3,4]. В антенній решітці (АР) і приймальному тракту спектр частот обмежується смугою пропускання АР і приймального тракту.

Враховуємо, що закон розподілення миттєвих значень сигналів, що обробляються, є вінеровським процесом [1,6,10].

Знайдемо процедуру обробки при виявленні нестационарного вінеровського процесу на фоні нестационарного вінеровського шуму [3,4]. Даний шум (завада) існує з спектральною щільністю N_0 у межах смуг пропускання АР та приймального тракту Π . Прийняті коливання мають вид [3,7,11]:

$$u(t) = As(t) + n(t) + c(t), \quad 0 < t < T, \quad (1)$$

де $s(t), n(t), c(t)$ – реалізації незалежних нестационарних вінеровських процесів з нульовим середнім значенням РМ корисного сигналу, шуму приймального тракту АР та шуму, коливання якого заважають відповідно; A – випадковий множник рівний нулю ($A=0$) при відсутності корисного сигналу $s(t)$ та одиниці ($A=1$) при його наявності; T – інтервал спостереження (накопичення).

Означимо $\sigma_s^2 = \overline{s^2(t)}$, $\sigma_n^2 = \overline{n^2(t)}$ та $\sigma_c^2 = \overline{c^2(t)}$, де $\overline{[\]}$ означає статистичне усереднення по сукупності реалізацій.

Прийняте РМ коливання розкладемо у ряд Котельникова [4,7,11], так:

$$u(t) = \sum_{i=1}^k u_i \frac{\sin \pi(t-i\Delta t)\Pi}{\pi(t-i\Delta t)\Pi}, \quad (2)$$

де $u_i = u(i\Delta t)$, $\Delta t = 1/(2\Pi)$, $k = T/\Delta t = 2\Pi T$.

Процес $u(t)$ можливо представити у однозначній відповідності векторів $\vec{U} = \{u_1, u_2, \dots, u_k\}$, складові якого являються коефіцієнтами розкладу (2). На основі класичної процедури рішення задачі виявлення сигналу [3,4] знайдемо відношення правдоподібності. Для цього використовуємо щільності розподілення складових вектора \vec{U} при умовах $A=1$ и $A=0$. Оскільки $s(t), n(t), c(t)$, а також окремі складові вектора \vec{U} незалежні та розподілені за законом Вина [1,10] то:

$$p(\vec{U}/A=1) = \prod_{i=1}^k \frac{1}{u_{si} \sqrt{2\pi t_i}} \exp \left\{ -\frac{\Delta u_{si}^2}{2u_{si}^2 t_i} \right\}, \quad (3)$$

де $t_i = \Delta t$, $t_i = t_1 - t_0, t_2 - t_1, \dots$ і $u_{si} = \sigma_{si} + \sigma_{ni} + \sigma_{ci}$ та прирощення РМ сигналу картографування, яке має розподілення за нормальним законом [1], так $\Delta u_{si}^2 = (u_i - u_{i-1})^2 = (\sigma_{si}^2 - \sigma_{s\ i-1}^2) + (\sigma_{ni}^2 - \sigma_{n\ i-1}^2) + (\sigma_{ci}^2 - \sigma_{c\ i-1}^2) = \Delta \sigma_{si}^2 + \Delta \sigma_{ni}^2 + \Delta \sigma_{ci}^2$.

Коли $A=0$ здобули наступне:

$$p(\vec{U}/A=0) = \prod_{i=1}^k \frac{1}{u_{zi} \sqrt{2\pi t_i}} \exp \left\{ -\frac{\Delta u_{zi}^2}{2u_{zi}^2 t_i} \right\}, \quad (4)$$

де $u_{zi} = \sigma_{ni} + \sigma_{ci}$ та прирощення коливань, що заважають $\Delta u_{zi}^2 = (u_i - u_{i-1})^2 = (\sigma_{ni}^2 - \sigma_{n\ i-1}^2) + (\sigma_{ci}^2 - \sigma_{c\ i-1}^2) = \Delta \sigma_{ni}^2 + \Delta \sigma_{ci}^2$.

Відношення правдоподібності визначається як ділення похідної (3), яка відповідає випадку наявності сигналу і шуму каналу та шуму коливань, які заважають (завади) до похідної (4) – випадок наявності лише однієї завади. Похідні дорівнюють:

$$\frac{d}{dt} p(\vec{U}/A=1) = \frac{(\Delta u_{si}^2 - t_i u_{si}^2) \sum_{i=1}^k \exp \left\{ -\frac{k \Delta u_{si}^2}{2u_{si}^2 t_i} \right\}}{2t^{[0,5(k+2)]} u_{si}^2 t_i (u_{si} \sqrt{2\pi})^k}, \quad (5)$$

$$\frac{d}{dt} p(\vec{U}/A=0) = \frac{(\Delta u_{zi}^2 - t_i u_{zi}^2) \sum_{i=1}^k \exp \left\{ -\frac{k \Delta u_{zi}^2}{2u_{zi}^2 t_i} \right\}}{2t^{[0,5(k+2)]} u_{zi}^2 t_i (u_{zi} \sqrt{2\pi})^k}. \quad (6)$$

Позначимо відношення сигнал-завада через q , де $q = \sigma_s / (\sigma_n + \sigma_c)$ та прирощення відношення сигнал-завада Δq , так $\Delta q = \Delta \sigma_s / (\Delta \sigma_n + \Delta \sigma_c)$. Для спрощення задачі вносимо допущення, які маютьс

декілька загрублюють результат, але дозволяють знайти правило виявлення. Так, якщо $t_i \rightarrow \min$, то відношення правдоподібності $\ell(\bar{U})$ за першим варіантом має наступний вид:

$$\ell(\bar{U}) = \frac{d}{dt} p(\bar{U}/A=1) / \frac{d}{dt} p(\bar{U}/A=0) = \frac{1 + \Delta q^2}{(1+q)^k (1+q^2)} \exp \frac{1}{2t} \sum_{i=1}^k \left[\frac{\Delta u_{3i}^2}{u_{3i}^2} - \frac{\Delta u_{ci}^2}{u_{ci}^2} \right]. \quad (7)$$

Більш зручним для аналізу є логарифм відношення правдоподібності:

$$\ln \ell(\bar{U}) = \ln \left[\frac{1 + \Delta q^2}{(1+q)^k (1+q^2)} \right] + \frac{1}{2t} \sum_{i=1}^k \left[\frac{\Delta u_{3i}^2}{u_{3i}^2} - \frac{\Delta u_{si}^2}{u_{si}^2} \right]. \quad (8)$$

Перший доданок у (8) не залежить від $u(t)$ (1) та визначає рівень порогу P_{Π} . Відношення правдоподібності визначається лише другим доданком (8). У підсумку одноканальний радіометр повинен вираховувати та порівнювати з порогом величину:

$$Z = \frac{1}{2t} \sum_{i=1}^k \left[\frac{\Delta u_{3i}^2}{u_{3i}^2} - \frac{\Delta u_{si}^2}{u_{si}^2} \right]. \quad (9)$$

Величини u_{3i} (або σ_{ni}, σ_{ci}) визначаються коли є просторові (частотні) відмінності між корисним сигналом та коливаннями завод. Наприклад застосування двох додаткових антен реалізують вказані просторові відмінності, рис. 1. Прийом корисних сигналів здійснюється головною пелюсткою діаграми спрямованості (ДС) основної антени $\Theta(\beta)$, яка позначена безперервною кривою. Додаткові антени $\Theta_1(\beta)$

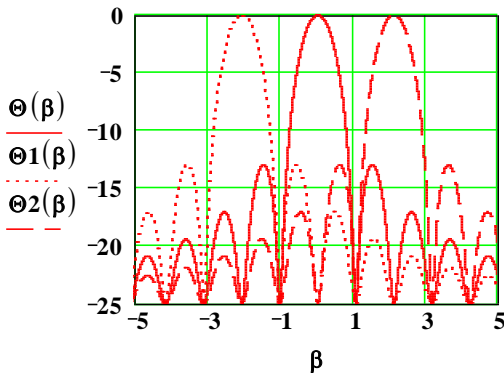


Рис. 1. Діаграми спрямованості основної антени $\Theta(\beta)$ і додаткових антен $\Theta_1(\beta)$ та $\Theta_2(\beta)$ в азимутальній площині огляду β

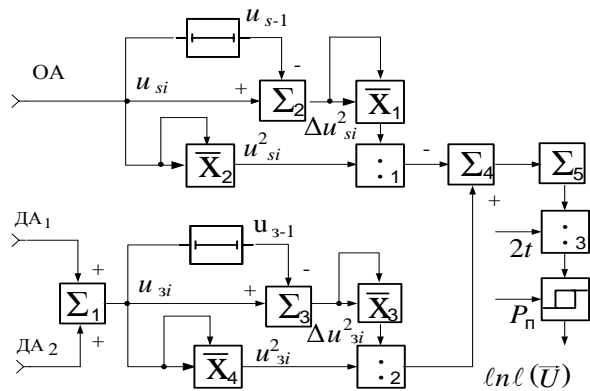


Рис. 2. Схема виявлення радіометричного сигналу при одноканальному прийомі за першим варіантом побудови

(крапки) та $\Theta_2(\beta)$ (тире) на рис. 1 забезпечують прийом коливань завод. Додаткові антени прикривають негативний прийом за боковими пелюстками ДС основної антени. Наявність бокових пелюсток $\Theta_1(\beta)$, $\Theta_2(\beta)$ у головній пелюстці $\Theta(\beta)$ приводе до втрат енергії корисних сигналів [12].

Об'єднання прийнятих коливань додаткових антен проводиться на першому суматорі Σ_1 , рис.2 [10]. Прирошення $\Delta u_{si}, \Delta u_{3i}$ знаходяться як різниця i та $i-1$ реалізації сигналів та завод. Дані природження визначаються за допомогою ліній затримки (ЛЗ) на Δt і суматорів Σ_2, Σ_3 . Піднесення до квадратного ступеня здійснюється множенням з фільтрацією (корелятором). На виході 1 та 2 множника формується відповідно Δu_{si}^2 та u_{si}^2 . За аналогією на виході 3 та 4 кореляторів – Δu_{3i}^2 і u_{3i}^2 . Операція ділення реалізується дільниками 1 та 2, на виході яких отримуємо $\Delta u_{si}^2/u_{si}^2, \Delta u_{3i}^2/u_{3i}^2$. Віднімання (9) проводиться у Σ_4 . П'ятий суматор Σ_5 є накопичувачем корисних сигналів. На виході третього дільника здійснюється нормування результатів накопичення на $1/(2t)$. На вихід пристрою порогів формується логарифм відношення правдоподібності $\ln \ell(\bar{U})$.

Для визначення другого варіанту правила виявлення РМ випадкового сигналу використовуємо особливості винеровського процесу [1,10]. Так, вхідні коливання мають незалежні прирощення, для яких різниці Δu_{si} (Δu_{zi}) розподілені за нормальним законом. Коливання $s(t)$, $n(t)$ і $c(t)$ та окремі складові вектора \bar{U} незалежні. Значення Δu_{si} та Δu_{zi} розподілені за нормальним законом і з врахуванням (1) - (4) здобудемо щільності імовірності при наявності та відсутності корисного сигналу

$$p(\bar{U}/A=1) = \prod_{i=1}^k \frac{1}{u_{si} \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{\Delta u_{si}^2}{2u_{si}^2}\right\}, \quad (10)$$

$$p(\bar{U}/A=0) = \prod_{i=1}^k \frac{1}{u_{zi} \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{\Delta u_{zi}^2}{2u_{zi}^2}\right\}. \quad (11)$$

Дисперсію завади u_{zi}^2 нормального закону розподілення можливо визначити при нормуванні $\Delta u_{zi}^2/\Delta t$ та фільтрації складових u_{zi}^2 . Співвідношення виразів (10), (11) надає відношення правдоподібності $\ell(\bar{U})$, так:

$$\ell(\bar{U}) = \prod_{i=1}^k \sqrt{\frac{u_{zi}^2}{u_{si}^2}} \exp\left[\frac{\Delta u_{si}^2 (\Delta u_{si}^2 - \Delta u_{zi}^2)}{2u_{si}^2 u_{zi}^2}\right]. \quad (12)$$

Якщо відношення сигнал-завада q , як і попереднє, то логарифм $\ell(\bar{U})$ реалізує другий варіант правила виявлення корисного РМ сигналу

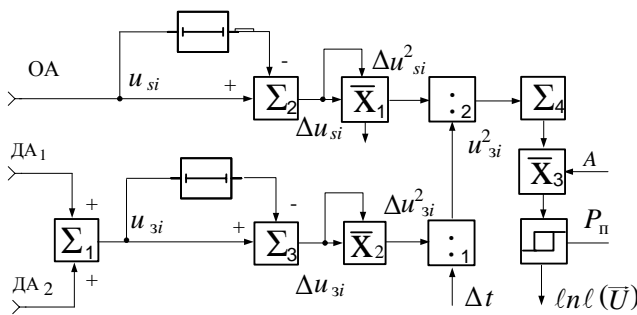
$$\ln \ell(\bar{U}) = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \ln(1+q^2) + A \sum_{i=1}^k \frac{\Delta u_{si}^2}{u_{zi}^2}, \quad (13)$$

де $A = q^2 / [2(1+q^2)]$.

Перша складова у (13) не залежить від коливань, що прийняті і визначає рівень порогу P_{Π} . Правило виявлення визначається за другою складовою. Множник перед сумою A також не залежить від вхідних коливань. У підсумку правило виявлення передбачає визначення Z та зрівняння його з P_{Π}

$$Z = A \sum_{i=1}^k \frac{\Delta u_{si}^2}{u_{zi}^2}. \quad (14)$$

На рис. 3 представлена схема виявлення за другим варіантом. Перший суматор Σ_1 здійснює підсумування коливань додаткових антен $\Theta_1(\beta)$ та $\Theta_2(\beta)$, (рис.1).



Прирощення корисних сигналів Δu_{si} та коливань завад Δu_{zi} визначаються за допомогою ЛЗ на Δt та Σ_2, Σ_3 . Множенням з фільтрацією 1, 2 знаходять значення відповідно Δu_{si}^2 та Δu_{zi}^2 [12]. Для виділення дисперсій коливань завад u_{zi}^2 проводиться нормування на Δt у

першому дільнику. Другий дільник вирішує співвідношення $\Delta u_{si}^2/u_{zi}^2$. Накопичення

корисних сигналів проводиться у суматорі Σ_4 . Помноження результату на ваговий

Рис. 3. Схема виявлення радіометричного сигналу при одноканальному прийомі за другим варіантом побудови

коефіцієнт A надає значення Z (14). Останнє поступає на пристрій порогу де і здійснюється порівняння з P_{Π} . На вихід пристрою порогів формується логарифм відношення правдоподібності $\ln \ell(\bar{U})$.

ВИСНОВКИ

Знайдено правила виявлення РМ сигналу на основі методу правдоподібності при одноканальному прийомі. При цьому враховано нестационарність корисних сигналів та завад. Сформовані схеми радіометрів з означеними рівнями порогу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. кн. 1. – М.: Сов. радио, 1969. – 752 с. ил.
2. Справочник по радиолокации. / Под ред. М. Скольника, Том. 4. Радиолокационные станции и системы. Под ред. М.М. Вейсбена - М.; Сов. радио, 1978. – 376с
3. Алмазов В.Б. Методы пассивной радиолокации. – Харьков; ВИРТА, 1974. – 86с.
4. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник. Изд. 2-е. перераб. и доп./Под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: Радиотехника, 2007.–512с.: ил.
5. Розов А.К. Обнаружение сигналов в нестационарных гидроакустических условиях. – Л.: Судостроение, 1987.– 132с.: ил.
6. Биков В.Н. Виявлення малорозмірних об'єктів радіометричною інформаційною системою мм діапазону з шумовою підсвічуванням / Биков В.Н.// *Радіоелектронні і комп'ютерні системи* 2(10). –Х.:ХАІ. - 2005. – С. 5-11.
7. Алмазов В.Б., Манжос В.М., Камчатний Н.И. Упрощенный алгоритм обнаружения шумового сигнала в двухпозиционной системе пассивной локации. – Известия высших учебных заведений. Радиотехника. –том 30. № 11.1987. – С.20–24. 23.
8. Lukin K.A., Kudriashov V.V., Vyplavin P.L., Palamarchuk V.P., Lukin S.K. 'Coherent radiometric imaging using antennas with beam synthesizing '. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 7, Spec. Iss. 3-4, pp. 453 - 458, Cambridge University Press, 2015, ISSN: 1759-0787, DOI: 10.1017/S1759078715000550. IF: 0.348.
9. Kudriashov V.V. 'A Modified Maximum Likelihood Method for Estimation of Mutual Delay and Power of Noise Signals by Bistatic Radiometer '. *Comptes Rendus - Academie Bulgare des Sciences*, 68, 5, pp. 631 - 640, Prof. Marin Drinov publishing house of Bulgarian Academy of Sciences, 2015, ISSN: 1310–1331. SJR: 0.21, ISI IF: 0.284.
10. Вентциль А.Д. Курс теории случайных процессов – М.: Наука, 1996.–400с: ил.
11. Абраменко О.О., Зарицький М.М., Шевченко А.Ф., Челпанов А.В. Система керування функціональними режимами багатofункціональної РЛС з фазованою антенною решіткою. Системи озброєння та військова техніка. - Х.: ХУПС. - 2017.- №1(49). - С. 69-72.
12. Карлов В.Д., Леонов І.Г., Присяжний А.Є., Сидоренко Д.С. Системне проектування радіоелектронних пристроїв. – Х.: ХУПС, 2017. – 80 с.