

УДК 621.396

К.С. КОЗЕЛКОВА

ДП «Центральний науково-дослідний інститут навігації і управління», Київ

ОПТИМАЛЬНА ОБРОБКА ПРОСТОРОВО-ЧАСОВИХ СИГНАЛІВ АНТЕНАМИ ІЗ ПЛОСКОЮ АПЕРТУРОЮ

В ряді робіт відзначені особливості просторово-часової обробки сигналів від протяжних цілей не доведені до конкретних результатів, не оцінені якісні характеристики таких систем обробки, не визначені виграші, що даються застосуванням оптимальних алгоритмів обробки сигналів протяжних цілей. Застосування неоптимальних алгоритмів обробки завжди пов'язане з енергетичними втратами й, як наслідок, з погіршенням якісних характеристик відповідної системи обробки. Таким чином, дана стаття присвячена оптимальній обробці просторово-часових сигналів антенами із плоскою апертурою.

Ключові слова: вихідний ефект, кореляційна функція, просторово-часова обробка сигналів.

Вступ

Незважаючи на досить повно розроблену в цей час теорію просторово-часової обробки сигналів, що знайшла відображення в роботах [1...7], відсутні конкретні результати по синтезу системи просторово-часової обробки сигналів при спільній оцінці кутових параметрів – кутових координат, кутових швидкостей і прискорень, вимагають так само уточнення й розвитку багатьох результатів по синтезу систем обробки просторово-часових сигналів антенами із плоскою апертурою.

Основна частина

Умови завдання сформулюємо в такий спосіб [8]. Задані інтервали простору $\vec{r} \in z$ й часу $t \in [-T; T]$, що відводяться під антенну систему й часову обробку. Під антенну систему відведемо частину площини xy , обмежену окружністю радіуса R (рис. 1). Прийняте коливання $\hat{o}(t; \vec{r})$ будемо представляти у вигляді суми

$$\hat{o}(t; \vec{r}) = S(t; \vec{r}; \beta; \nu) + n(t; \vec{r}) \quad (1)$$

адитивного поля перешкоди $n(t; \vec{r})$, що представляє собою нормальний випадковий процес із кореляційною функцією [2, 5]

$$R(t; x; y) = \frac{N_0 \lambda^2}{2\pi} \delta(t; x; y) \quad (2)$$

і поля корисного сигналу $S(t; \vec{r}; \beta; \nu)$, що має характер детермінованої функції часу t , просторових координат \vec{r} , і сукупності випадкових параметрів $\vec{\lambda} = (\beta; \nu)$. Потрібно визначити оптимальну просторово-часову систему прийнятих коливань і якісні показники цієї системи.

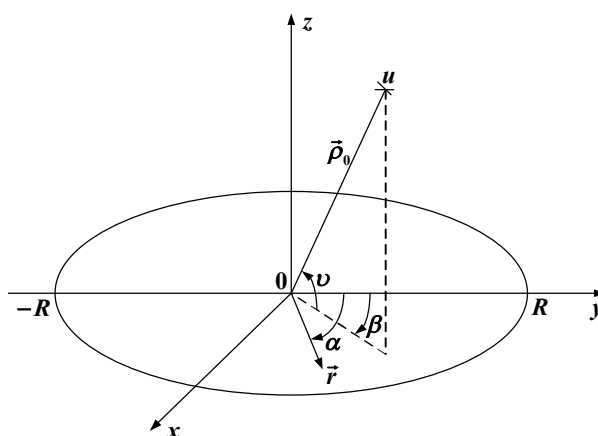


Рис. 1. Область обробки просторово-часових сигналів

Вихідний ефект оптимальної системи обробки $q(\vec{\lambda}) = q(\beta; \nu)$. Визначаючи опорний сигнал системи обробки, одержуємо

$$\theta(t_1; t_2; \vec{r}_1; \vec{r}_2) = \theta(t_1 - t_2; \vec{r}_1 - \vec{r}_2) = \left(2\pi / (N_0 \lambda^2) \right) \cdot \delta(t_1 - t_2; x_1 - x_2; y_1 - y_2); \quad (3)$$

$$q(\vec{\lambda}) = k \exp \left\{ \frac{2\pi}{N_0 \lambda^2} \int_{-T}^T \int_z y(t; \vec{r}) s(t; \vec{r}; \beta; \nu) dt d\vec{r} \right\}. \quad (4)$$

Вважаючи, що поле в розкритті антени $S(t; \vec{r}; \vec{\lambda})$ створюється точковим нерухливим джерелом випромінювання монохроматичних коливань, що перебувають у дальній зоні

$$S(t; \vec{r}; \beta; \nu) = S_0 \exp \{ j\omega_0 (t - \vec{r}\vec{\rho} / \vec{n}) \} = S_0 \exp \{ j\omega_0 (t - (r / \vec{n}) \cdot \cos \nu \cos(\alpha - \beta)) \}, \quad (5)$$

приходимо до такого запису вихідного ефекту

$$q(\vec{\lambda}) = \int_{-T}^T S_0 \exp \{ j\omega_0 t \} dt \int_z y(t; \vec{r}) \exp \left\{ -j2\pi \frac{\vec{\rho}\vec{r}}{\lambda} \right\} d\vec{r}. \quad (6)$$

Внутрішній інтеграл в (6)

$$q(\vec{\lambda}; t) = \int_z y(t; \vec{r}) \exp\left\{-j \frac{2\pi}{\lambda} \vec{\rho} \vec{r}\right\} d\vec{r}. \quad (7)$$

визначає оптимальну просторову обробку (оптимальну антену), а зовнішній – оптимальну часову обробку

$$q(\vec{\lambda}) = \int_{-T}^T q(\vec{\lambda}; t) S_0 \exp\{j\omega_0 t\} d\vec{r}. \quad (8)$$

Оптимальна просторова обробка зводиться, як випливає з (7), до “фокусування” антени на напрямки приходу сигналу $(\beta; \nu)$. Така оптимальна обробка (7) може бути здійснена обертовою плоскою круговою антеною з постійним амплітудно-фазовим розподілом на розкритті з діаграмою спрямованості

$$f(\vec{\lambda}) = \frac{1}{A} \int_z \exp\left\{j \frac{2\pi}{\lambda} \vec{\rho} \vec{r}\right\} d\vec{r}. \quad (9)$$

Нехай на напрямку $(\beta_0; \nu_0)$ є джерело випромінювання, що формує в розкритті антени поле

$$y(t; \vec{r}) = S_0 \exp\left\{j \frac{2\pi}{\lambda} \vec{\rho}_0 \vec{r}\right\} + n(t; \vec{r}). \quad (10)$$

У виразі (10) часовий множник опущений.

Тоді вихідний ефект оптимальної антени буде

$$Y_{\hat{\lambda} \hat{\nu}}(\beta; \nu) = \int_0^R \int_0^{2\pi} S_0 \exp\left\{j \frac{2\pi}{\lambda} r \left[\begin{matrix} \cos \nu_0 \cos(\alpha - \beta_0) - \\ -\cos \nu \cos(\alpha - \beta) \end{matrix} \right]\right\} r dr d\alpha + \int_{\hat{\nu}} n(t; \vec{r}) \exp\left\{j \frac{2\pi}{\lambda} \vec{\rho} \vec{r}\right\} d\vec{r}. \quad (11)$$

Запишемо вихідний ефект $Y_{\hat{\lambda} \hat{\nu}}$ обертової антени. Для цього визначимо поле сигналу на апертурі

$$\vec{r} \text{ при повороті її на кут } (\hat{\beta}; \hat{\nu}) \\ S(t; r'; \beta; \nu) = S_0 \times \exp\left\{j \frac{2\pi}{\lambda} r' \cos(\hat{\nu} - \nu_0) \cos(\alpha - \beta_0 - \hat{\beta}')\right\}. \quad (12)$$

Тоді

$$Y_{\hat{\lambda} \hat{\nu}} = \int_0^R \int_0^{2\pi} S_0 \exp\left\{j \frac{2\pi}{\lambda} r' \left[\begin{matrix} \cos(\nu_0 - \nu) \times \\ \times \cos(\alpha - \beta_0 - \hat{\beta}) \end{matrix} \right]\right\} dr' d\alpha + \int_z n(t; \vec{r}') d\vec{r}'. \quad (13)$$

r' у виразах (12) і (13) ураховує зміну апертури антени при її повороті.

Статистичні характеристики нормальних випадкових процесів, обумовлених другими доданками у виразах (12) і (13) збігаються. Практично збігаються й сигнальні складові вихідних ефектів. Це означає, що обертова (скануюча) антена із заданою діаграмою спрямованості забезпечує оптимальну просторо

ву обробку сигналів, якщо не враховувати часу на огляд простору.

Для визначення потенційних погрешностей виміру параметрів $(\beta; \nu)$ знайдемо просторово-часову кореляційну функцію сигналу по кутових координатах. По визначенню

$$\Psi(\hat{\beta}; \hat{\nu}) = C \int_t \int_z S(t; \vec{r}; \beta; \nu) S^*(t; \vec{r}; \hat{\beta} + \hat{\beta}; \nu + \hat{\nu}) dt d\vec{r}. \quad (14)$$

$$\text{Тут } S(t; \vec{r}; \beta; \nu) = S_0 \exp\left\{j 2\pi f_0 \left(t - \frac{\vec{\rho} \vec{r}}{c}\right)\right\}. \quad (15)$$

Підставимо (15) в (14)

$$\Psi(\hat{\beta}; \hat{\nu}) = C \int_t \int_z S_0^2 \exp\left\{-j 2\pi f_0 \left[t - \frac{r}{c} \cos \nu \cos(\alpha - \beta)\right]\right\} \times \exp\left\{j 2\pi f_0 \left[t - \frac{r}{c} \cos(\nu + \hat{\nu}) \cos(\alpha - \beta - \hat{\beta})\right]\right\} r dr dt d\alpha = \\ = S_0^2 2T \int_0^{R/2} \int_0^{2\pi} \exp\left\{j 2\pi \frac{r}{\lambda} \left[\begin{matrix} \cos \nu \cos(\alpha - \beta) - \\ -\cos(\nu + \hat{\nu}) \cos(\alpha - \beta - \hat{\beta}) \end{matrix} \right]\right\} r dr d\alpha. \quad (16)$$

Вводячи позначення

$$A = \cos \nu \cos \beta - \cos(\nu + \hat{\nu}) \cos(\beta + \hat{\beta});$$

$$B = \cos \nu \sin \beta - \cos(\nu + \hat{\nu}) \sin(\beta + \hat{\beta}); \quad (17)$$

$$D^2 = A^2 + B^2 = \cos^2 \nu + \cos^2(\nu + \hat{\nu}) -$$

$$-2 \cos \nu \cos(\nu + \hat{\nu}) \cos \hat{\beta}; \quad \gamma = \arctg B / A,$$

приходимо до такого запису (16)

$$\Psi(\hat{\beta}; \hat{\nu}) = S_0^2 2T \int_0^{R/2} \int_0^{2\pi} \exp\left\{j 2\pi \frac{r}{\lambda} D \cos(\alpha - \gamma)\right\} r dr d\alpha = \\ = S_0^2 2T 2\pi \int_0^R r J_0\left(2\pi \frac{r}{\lambda} D\right) dr = 2Q \frac{J_1(2\pi(R/\lambda)D)}{2\pi(R/\lambda)D}. \quad (18)$$

де $Q = S_0^2 2T \pi R^2$ – енергія сигналу; $J_0(x); J_1(x)$ – функції Бесселя.

Скориставшись розкладанням функції Бесселя $J_1(x)$ [10], одержуємо

$$\Psi(\hat{\beta}; \hat{\nu}) = 2Q \left[\frac{1}{2} - \frac{1}{16} \left(2\pi \frac{R}{\lambda} D \right)^2 \right]. \quad (19)$$

Для розрахунків теоретично граничної точності оцінок необхідно визначити інформаційну матрицю Φ . Дисперсії оцінок будуть знайдені як відповідні діагональні елементи матриці Σ , зворотної $\Phi: \Sigma = \Phi^{-1}$. Скориставшись виразом для довільного елемента матриці Φ_{ij} й виразом (3) для опорного сигналу системи обробки, одержуємо

$$\Sigma_{\hat{\beta} \hat{\nu}} = \Sigma_{\hat{\nu} \hat{\beta}} = \left\langle (\beta - \beta^*) (\nu - \nu^*) \right\rangle = 0.$$

$$\sigma_{\beta}^2 = \sum_{\beta\beta} = \left\langle (\beta - \beta^*)^2 \right\rangle = \frac{N_0}{Q(2\pi(R/\lambda))^2 \cos^2 \nu} \quad (20)$$

$$\sigma_{\nu}^2 = \sum_{\nu\nu} = \left\langle (\nu - \nu^*)^2 \right\rangle = \frac{N_0}{Q(2\pi(R/\lambda))^2 \sin^2 \nu}$$

Висновки

Як впливає з наведених співвідношень оцінки кутових координат β і ν є незалежними. Результуюча точність залежить від енергетичного відношення сигнал-перешкода й тим вище, чим більше розміри використовуваної апертури, обумовлені відношенням R/λ .

Литература

1. Ширман Я.Д. Разрешение и сжатие сигналов / Я.Д. Ширман. – М.: Сов. радио, 1974. – 360 с.
2. Фалькович С.Е. Статистическая теория измерительных радиосистем / С.Е. Фалькович, Э.Н. Хомяков. – М.: Радио и связь, 1981. – 288 с.
3. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ: учеб. для радиотехнич. спец. вузов. / Д.М. Сазонов. – М.: Высшая школа, 1988. – 432 с.

4. Malherbe J.A.G. Analysis of a liner antenna array the effects of mutual coupling / A.G.J. Malherbe // IEEE Trans. Educ., – 1989, T. 32, № 1. – P. 29–34.

5. Фалькович С.Е. О задаче определения оптимальной пространственно-временной системы обработки сигналов / С.Е. Фалькович // Радиотехника и электроника. – 1966. – Т. 11, № 5. – С. 785–792.

6. Ширман Я.Д. Статистический анализ оптимального разрешения / Я.Д. Ширман // Радиотехника и электроника. – 1961. – Т. 6, № 8. – С. 1237–1246.

7. Курикуша А.А. Об оптимальном использовании пространственно-временных сигналов / А.А. Курикуша // Радиотехника и электроника. – 1963. – Т. 8, № 4. – С. 552–563.

8. Розробка науково-методичного апарату обґрунтування створення космічних систем ДЗЗ, навігації та зв'язку в інтересах національної безпеки та оборони: звіт про НДР (проміжний): 42-70 / ДП «Центральний науково-дослідний інститут навігації і управління»; керів. Ставицький С.Д.; викон. Козелкова К.С. – К., 2008. – 73 с. – Інв. 580.

9. Пат. 51673 Україна, МПК В64G 1/24. Спосіб визначення орієнтації космічного апарата / Загорулько О.М., Козелкова К.С., Костенко Б.О., Ян Ке, Кучерук С.М.; – № и 201001242; заявл. 08.02.10; опубл. 26.07.10, Бюл. № 14. – 4 с.

Надійшла до редакції 4.06.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Л.Ф. Купченко, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

ОПТИМАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ СИГНАЛОВ АНТЕННАМИ С ПЛОСКОЙ АПЕРТУРОЙ

Е.С. Козелкова

В ряде работ отмечены особенности пространственно-временной обработки сигналов от протяженных целей, которые не доведены до конкретных результатов, не оценены качественные характеристики таких систем обработки, не определены выигрыши, которые даются применением оптимальных алгоритмов обработки сигналов протяжных целей. Применение неоптимальных алгоритмов обработки всегда связано с энергетическими потерями и, как следствие, с ухудшением качественных характеристик соответствующей системы обработки. Данная статья посвященная оптимальной обработке пространственно-временных сигналов антеннами с плоской апертурой.

Ключевые слова: исходный эффект, корреляционная функция, пространственно-временная обработка сигналов.

OPTIMUM TREATMENT OF SPATIO-TEMPORAL SIGNALS BY AERIALS WITH A FLAT APERTURE

E.S. Kozelkova

In a number of works the noted features of spatio-temporal treatment of signals from the prolonged aims are not well-proven to the concrete results, high-quality descriptions of such systems of treatment, not certain winnings which are given applications of optimum algorithms of treatment of signals of the prolonged aims, are not appraised. Application of unoptimum algorithms of treatment always pov"yazane with power losses and, as a result, with worsening of high-quality descriptions of the system of treatment. Thus the article is devoted optimum treatment of spatio-temporal signals aeralis with a flat aperture.

Key words: initial effect, cross-correlation function, spatio-temporal treatment of signals.

Козелкова Катерина Сергіївна – канд. техн. наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник ДП «Центральний науково-дослідний інститут навігації та управління», Київ.