

РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 621.396.96

В.Б. Бзот, ад'юнкт

Є.Л. Казаков, д.т.н., проф.

Харківський військовий університет

І.О. Коваленко, к.т.н., доц.

Д.М. Шостачук, асист.

Житомирський інженерно-технологічний інститут

УДОСКОНАЛЕНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОПИСАННЯ ВІДБИВАЛЬНИХ
ВЛАСТИВОСТЕЙ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ ЦІЛІ

Запропонована математична модель радіолокаційної цілі, яка описує відбивальні властивості цілі при збільшенні числа відбивачів на ній і скороченню різниці відстаней між ними.

Методи побудови математичних моделей радіолокаційних цілей можуть бути різними в залежності від того, у якому діапазоні довжин хвиль ця модель повинна описувати відбивальні властивості цілей і наскільки повно здійснюється це описання.

Аналіз існуючих методів, проведений докладно в [1], визначає побудову математичної моделі радіолокаційної цілі у вигляді об'єкта, що складається з деякого числа відбивачів.

Даний метод покладено в основу створюваної математичної моделі цілі. Використання такої моделі дозволяє виявити основні закономірності кореляційної обробки та одержати результати в наочній формі.

Допустимо, що ціль, яку спостерігає радіолокаційна станція (РЛС), складається з $N \geq 2$ відбиваючих елементів, розміщених у об'ємі, який займає сам об'єкт [2]. Розсіювальні властивості кожного з них характеризує його \dot{S}_i – комплексний коефіцієнт відбиття:

$$\dot{S}_i(t) = |\dot{S}_i(t)| e^{j\varphi(t)}. \quad (1)$$

Припустимо, що за тривалістю випроміненого сигналу розрізнення окремих відбивачів не відбувається і при відбитті від різних елементів огинаючі амплітуд одиночних радіоімпульсів практично не змінюються. Тоді миттєве комплексне значення амплітуди відбитих від цілі сигналів для РЛС можуть бути записані у вигляді:

$$\dot{E}_0(t) = \sum_{i=1}^N \dot{S}_i(t) U(t-t_0) e^{j\omega t} e^{-j2m[r_0(t)+x_i(t)]}, \quad (2)$$

де t_0 – час запізнювання сигналу при поширенні радіохвиль від передавальної антени РЛС до умовного центра цілі і зворотно;

$U(t)$ – огинаюча амплітуд випромінених коливань;

$x_i(t)$ – відстань від умовного центра цілі до i -го елемента, що відбиває, у момент часу t , уздовж лінії візування;

N – кількість відбиваючих елементів цілі, які спостерігаються в приймальному пункті;

$m = \frac{2\pi}{\lambda}$ – хвильове число.

Вираз (2) справедливий тільки тоді, коли всі відстані l_i між відбиваючими елементами цілі значно перевищують (на порядок) максимальну довжину хвилі РЛС:

$$l_i \gg \lambda.$$

Визначимо імовірність виконання цієї умови для будь-якої пари відбиваючих елементів цілі, випадково розміщених на її поверхні в інтервалі $(0 \div L)$, де L – розмір цілі. Як показано в [3], для N відбиваючих елементів цілі ця імовірність може бути визначена за формулою:

$$P(l_i > a) = \left[1 - \frac{(N-1)a}{L} \right]^N, \quad (3)$$

де $a < \frac{L}{N-1}$ – позитивна величина, що вибирається більшою, ніж довжина хвилі РЛС.

У таблиці, як приклад, наведені розрахунки щодо виразу (3) значень імовірності того, що всі відстані між відбиваючими елементами цілі більше довжини хвилі РЛС у 5 разів ($a = 0,3 \text{ м}$, $L = 20 \text{ м}$):

Таблиця

N	3	4	5	6	7	10	12
---	---	---	---	---	---	----	----

P	0.913	0.832	0.734	0.626	0.517	0.234	0.137
---	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

З наведених у таблиці результатів можна зробити висновок про те, що високі імовірності $P(l_i > a)$ характерні тільки для тих цілей, на яких невелика кількість відбиваючих елементів. При збільшенні числа відбивачів ця імовірність різко зменшується. На реальних аеродинамічних цілях кількість відбиваючих елементів може бути більше п'яти. Найчастіше їхня кількість становить $N = 10 \dots 12$.

Цей факт призводить до зменшення відстаней між окремими відбивачами. У зв'язку з цим необхідно вводити додаткові вимоги до математичної (статистичної) моделі цілі на той випадок, якщо деякі відстані між відбиваючими елементами стануть порівняними з довжиною хвилі РЛС.

Використовуючи (2), інтенсивність відбитого сигналу можна записати у вигляді:

$$\dot{E}^2(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^N \dot{S}_i(t) U^2(t-t_0) \dot{S}_l^* \times e^{-j2m[x_i(t)-x_l(t)]}, \tag{4}$$

де \dot{S}_i^* – комплексно-спряжений коефіцієнт відбиття;

$x_i(t)$ – координата l-го відбивача уздовж лінії візування РЛС.

У виразі (4) подвійну суму можна виразити через суму нерівних індексів:

$$E^2(t) = \sum_{i=1}^N \dot{S}_i^2(t) U^2(t-t_0) + \sum_{\substack{i=1, l=1 \\ i \neq l}}^N \dot{S}_i(t) \dot{S}_l^*(t) U^2(t-t_0) \times e^{-j2m[x_i(t)-x_l(t)]}.$$

Вираз для середнього значення інтенсивності відбитого сигналу при усередненні в деякому ракурсі кутів спостереження має вигляд:

$$\overline{E^2(t)} = \sum_{i=1}^N \overline{\dot{S}_i^2(t) U^2(t-t_0)} + \sum_{\substack{i=1, l=1 \\ i \neq l}}^N \overline{\dot{S}_i(t) \dot{S}_l^*(t) U^2(t-t_0) e^{-j2m[x_i(t)-x_l(t)]}}, \tag{5}$$

де "....." – знак усереднення за часом.

Припустимо, що зміна кута спостереження радіолокаційної цілі являє собою стаціонарний ергодичний випадковий процес. Тоді при визначенні середнього значення інтенсивності відбитого сигналу можна перейти від усереднення за часом до статистичного усереднення. При цьому кожен член другої суми виразу (5) розділиться на два співмножники, тому що значення \dot{S}_i визначають властивості окремих відбивачів, а експоненціальні співмножники – розміщення відбивачів у просторі. Середнє значення інтенсивності відбитого сигналу в цьому випадку, виражене у значеннях ефективної відбиваючої поверхні цілі, має вигляд:

$$\langle S^2(t) \rangle = \sum_{i=1}^N \langle S_i^2(t) \rangle + \sum_{\substack{i=1, l=1 \\ i \neq l}}^N \langle \dot{S}_i(t) \dot{S}_l^*(t) \rangle \times \langle e^{-j2m[x_i(t)-x_l(t)]} \rangle, \tag{6}$$

де $\langle \rangle$ – знак статистичного усереднення.

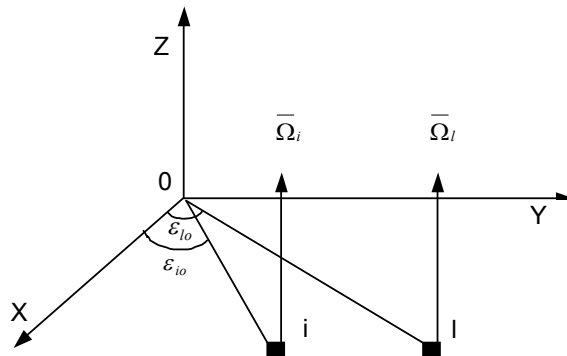


Рис. 1

Вираз (6) відрізняється від тих, які звичайно наводяться в літературі, наприклад [2], наявністю другої суми. Отримаємо в явному вигляді залежність показника експоненти від кута повороту цілі. Нехай обертання цілі відбувається у площині XOY (рис. 1) і швидкості обертання всіх елементів, що відбивають, цілі однакові $\Omega_i = \Omega_l = \Omega$. Тоді, якщо сектор кутів спостереження невеликий і обертання починається з моменту часу, що характеризується кутами $\epsilon_{i0}, \epsilon_{l0}$, то

$$x_i(t) - x_l(t) = \rho_{ei} \cos(\epsilon_{i0} + \Omega t) - \rho_{el} \cos(\epsilon_{l0} + \Omega t). \tag{7}$$

Виконуючи перетворення цього виразу, отримаємо:

$$x_i(t) - x_i(t) = \Delta x_{lio} \cos \Omega t + \Delta y_{lio} \sin \Omega t, \tag{8}$$

де $\Delta x_{lio}, \Delta y_{lio}$ – відстані між l-м і i-м відбивачами цілі в початковий момент часу вздовж осей X та Y системи координат.

Для невеликого сектора кутів спостереження вираз (8) можна записати у вигляді:

$$x_i(t) - x_i(t) = \Delta x_{lio} \sqrt{1 - \gamma^2} + \Delta y_{lio} \gamma, \tag{9}$$

де $\gamma = \Omega t$.

Підставляючи (9) у (6), отримаємо:

$$\langle S^2(t) \rangle = \sum_{i=1}^N \langle \dot{S}_i(t) \cdot \dot{S}_i^*(t) \rangle \cdot \left\langle e^{j \frac{4\pi}{\lambda} (\Delta x_{lio} \sqrt{1 - \gamma^2} + \Delta y_{lio} \gamma)} \right\rangle = J \left[\frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{1 - \gamma^2} \right] \cdot J \left[\frac{4\pi}{\lambda} \gamma \right], \tag{10}$$

де $J[\dots]$ – характеристичні функції різниці координат між парами відбиваючих елементів по осях X і Y.

При незалежності різниці координат у початковий момент часу і нормальних законів розподілу координат елементів, що відбивають, по осях X та Y з нульовими середніми значеннями і дисперсіями $\sigma_{xio}, \sigma_{xlo}, \sigma_{yio}, \sigma_{ylo}$ маємо:

$$J = \exp \left\{ -\frac{8\pi^2(1 - \gamma^2)}{\lambda^2} (\sigma_{xio}^2 - 2r_{xioxlo} \sigma_{xio} \sigma_{xlo} + \sigma_{xlo}^2) \right\} \times \tag{11}$$

$$\times \exp \left\{ -\frac{8\pi^2\gamma^2}{\lambda^2} (\sigma_{yio}^2 - 2r_{yioylo} \sigma_{yio} \sigma_{ylo} + \sigma_{ylo}^2) \right\}$$

Розглянемо фізичний зміст коефіцієнтів кореляції між координатами відбивачів r_{xioxlo} (r_{yioylo}).

Вираз (11) наближається до нуля, якщо показники експоненти збільшуються. У цьому випадку (6) зводиться до відомого, тобто математична модель, на підставі якої отримано вираз для відбитого сигналу, буде справедлива. Для збільшення показника експоненти у виразі (11) треба визначити r_{xioxlo} (r_{yioylo}) = 1. Тоді вираз (11) перетвориться до виду:

$$J = \exp \left\{ -8\pi^2(1 - \gamma^2) \cdot \left(\frac{\sigma_{xio} - \sigma_{xlo}}{\lambda} \right) \right\} \cdot \exp \left\{ -8\pi^2\gamma^2 \left(\frac{\sigma_{yio} - \sigma_{ylo}}{\lambda} \right)^2 \right\}. \tag{12}$$

При виконанні умов:

$$\left| \frac{\sigma_{xio} - \sigma_{xlo}}{\lambda} \right| \gg 1, \quad \left| \frac{\sigma_{yio} - \sigma_{ylo}}{\lambda} \right| \gg 1,$$

(відстані між координатами пар відбиваючих елементів цілі значно більші довжини хвилі РЛС) вираз (11) наближається до нуля, а відповідно вираз (6) перетвориться до вигляду:

$$\langle S^2(t) \rangle = \sum_{i=1}^N \langle S_i^2(t) \rangle. \tag{13}$$

Отже, якщо коефіцієнт кореляції між координатами пар відбиваючих елементів цілі дорівнює одиниці, то для використання запропонованої моделі радіолокаційної цілі необхідно, щоб відстані між координатами відбивачів значно перевищували довжину хвилі РЛС. Щоб звести до нуля другу суму в (6), коли відстані між відбивачами зменшуються, але ще перевищують довжину хвилі РЛС, значення коефіцієнта кореляції між координатами пар відбивачів у (11) повинне змінюватися від 1 до -1.

Ця додаткова умова дозволить розширити межі використання запропонованої математичної моделі. Конкретні значення коефіцієнтів кореляції між координатами відбиваючих елементів цілі вибираються для кожної пари відбивачів, виходячи з фізичних умов спостереження тієї чи іншої цілі.

Таким чином, введення в математичну модель радіолокаційних цілей коефіцієнтів кореляції між координатами пар відбиваючих елементів, значення яких зменшується від 1 до -1 в залежності від скорочення відстані між відбивачами (наближення цього значення до довжини хвилі РЛС), дозволяє й у цьому випадку використовувати описану математичну модель для аналізу розсіювальних властивостей цілей.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Казаков Е.Л. Статистическая модель радиолокационной цели в сантиметровом диапазоне волн с учетом поляризационных свойств цели на многих частотах // Радиотехника. – М.: Радиотехника, 1976. – Т. 31. – № 4. – С. 3.

2. Теоретические основы радиолокации / Под редакцией Я.Д. Ширмана. – М.: Сов. радио, 1970. – 560 с.
3. Z.A. Melzak. Quarterly of Applied Mathematik'', V. 20, № 2. 1962.
4. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Ч.1. – М.: Сов. радио, 1969. – 728 с.

БЗОТ Володимир Броніславович – ад'юнкт Наукового Центру Військ ППО при Харківському військовому університеті.

Наукові інтереси:

– теорія розпізнавання радіолокаційних цілей.

КАЗАКОВ Євгеній Леонідович – доктор технічних наук, професор, головний науковий співробітник Наукового Центру Військ ППО при Харківському військовому університеті.

Наукові інтереси:

– теорія розпізнавання радіолокаційних цілей.

КОВАЛЕНКО Іван Олексійович – доцент Житомирського інженерно-технологічного інституту.

Наукові інтереси:

– кібернетика.

ШОСТАЧУК Дмитро Миколайович – асистент кафедри АіКТ Житомирського інженерно-технологічного інституту.

Наукові інтереси:

– магнітометричні датчики систем орієнтації;

– методи оптимізації.

Подано 10.09.2001