

УДК 621. 396.96

ФЕДОТОВ Б. М., старший науковий співробітник, кандидат технічних наук,
доцент

ОЦІНКА ВПЛИВУ НЕТОЧНОСТЕЙ КОМПЕНСАЦІЇ СФЕРИЧНОСТІ ФРОНТУ ХВИЛІ В РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СТАНЦІЯХ НАДВИСОКОГО РОЗРІЗНЕННЯ

*Отримано оцінку впливу неточності
штучного формування плоского фронту
хвилі на погіршення розрізняльної
здатності*

В теперішній час практично досягнута розрізнявальна здатність в радіолокаційних станціях із синтезованою апертурою антени (РСА) складає одиниці і доли метра. Наприклад, у кращому з відомих зразків РСА „Lynx” вона складає 0,3 ... 3м в смуговому режимі синтезування [1]. Зміна на порядок розрізняльної здатності пояснюється, мабуть, обмеженнями на дальність дії притаманними класичній структурі РСА, що пов'язані із сферичністю фронту хвилі сигналу зондування.

В той же час актуальною науковою задачею є розробка РСА надвисокого розрізнення з дальністю дії в десятки кілометрів і розрізненням в доли метра. Для вирішення цієї задачі необхідно перебороти структурне протиріччя між розрізнявальною здатністю за шляховою дальністю і дальністю дії класичної структури РСА, яке пов'язане із сферичністю фронту хвилі (обмеженням на добуток розрізнявальних координат) [2].

Вирішення цього протиріччя запропоновано в вітчизняному патенті №92116 [3], де пропонуються алгоритми додаткової обробки для штучного формування квазіплоского фронту хвилі сигналу зондування.

Слід відзначити, що коли проектується РСА надвисокого розрізнення йде боротьба за кожний сантиметр розрізнявальної здатності. Тому питання кількісної оцінки погіршення основних характеристик станції достатньо актуальні.

Дана стаття присвячена кількісній оцінці впливу нерівномірності величини сигналу відбиття від елемента розрізнення $\delta r_i \times \delta x_i$, яке виникає в процесі обробки та пов'язане з особливостями штучного формування квазіплоского фронту хвилі сигналу зондування, сформованого згідно критерію Лейта [4].

В відомому технічному рішенні [3] квазіплоский фронт створюється шляхом розділення за допомогою цифрових фільтрів відбитого сигналу від елементів кожного каналу похилої дальності, їх запам'ятовування і компоновки з відфільтрованих сигналів сусідніх каналів похилої дальності сигналів, відбитих від ділянок земної поверхні, яка має геометричну форму близькою до прямокутної (див. рис. 1).

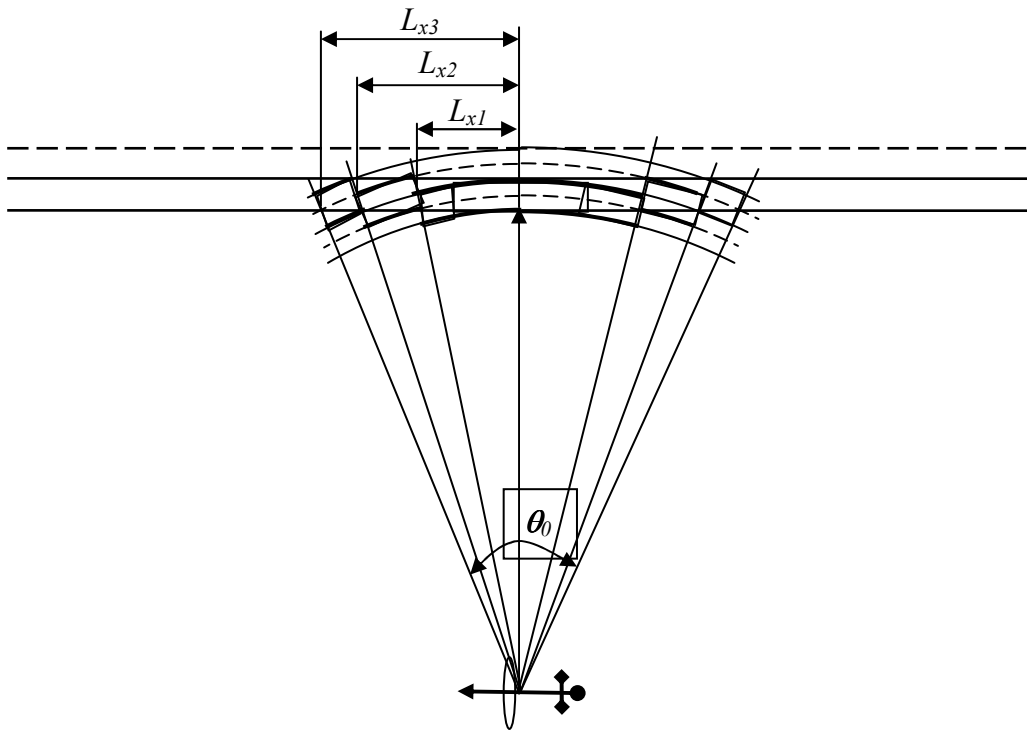


Рис. 1. Принцип створення квазіплоского фронту

Квазіплоский фронт утворюється з сукупності елементів поверхонь різних розмірів і різної кривизни. Кривизна сферичних елементів поверхонь, що стикуються та утворюють квазіплоский фронт, відрізняється на половину розрізнявальної здатності за похилою дальністю – $\delta r/2$. Кутівий (азимутальний) розмір сферичного елемента визначається гранично припустимим добутком розрізнявальних координат (критерій Лейта [4]), що відповідає відхиленню краю сферичного елемента від площини плоского фронту на $\delta r/2$ (половина ширини каналу похилої дальності). На рис. 1 для прикладу показано квазіплоский фронт хвилі, сформованої шляхом розділення відбитого сигналу за допомогою трьох фільтрів та його компоновки.

Визначимо інтенсивність відбитого сигналу по розкритті синтезованої апертури для цього квазіплоского фронту хвилі. Застосуємо модель відбиття, яка заснована на використанні поняття питомої ефективної поверхні, що відбиває. При цьому в процесі узгодженої фільтрації енергія сигналу від елемента розрізнення $\delta r \times \delta x$ в каналі дальності пропорційна площині кільцевого сектора, що знаходиться усередині каналу.

Енергетичні втрати складають

$$\frac{1}{2} \left\{ \frac{\delta r}{2} [L_{x1} + (L_{x2} - L_{x1}) + (L_{x3} - L_{x2})] \right\} = \frac{1}{4} \delta r \cdot L_{x3} \cdot \quad (1)$$

Тобто при обраному алгоритмі створення квазіплоского фронту зондувального сигналу в процесі узгодженої фільтрації втрачається чверть енергії за рахунок погрішності в імітації плоского фронту хвилі.

Визначимо розподіл інтенсивності сигналу від елементу розрізнення на інтервалі синтезування апертури $2L_{x3}=L_c$. Сигнал від елементів $\delta r \times R d\theta$ кільцевого сектора, які виділяє фільтр нижніх частот, в процесі узгодженої фільтрації пропорційний площі, яку вони займають в прямокутному елементі каналу похилої дальності (рис. 2).

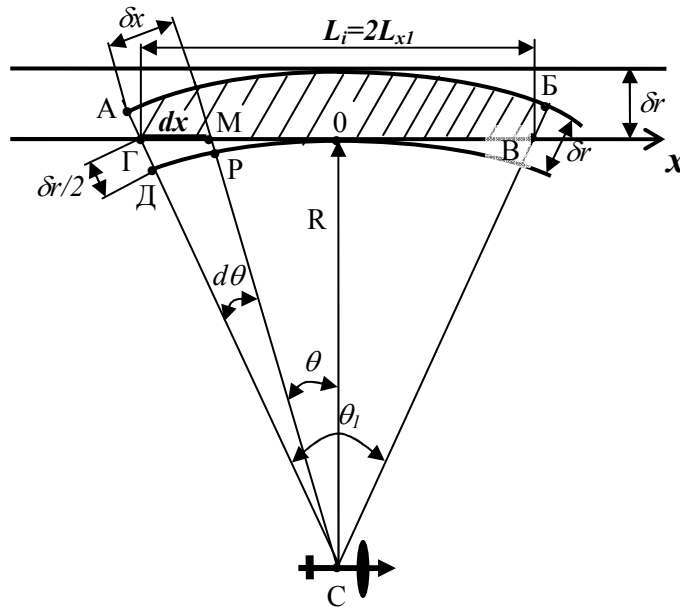


Рис. 2. До визначення розподілу інтенсивності сигналу по розкритті синтезованої апертури

Ця площа дорівнює

$$R d\theta \cdot \delta r - \frac{1}{2}(\Gamma D + MP)R d\theta. \tag{2}$$

Зменшуючи кут $d\theta$ до величини нескінченно малій вищого рівня малості по відношенню до dx , отримуємо

$$\delta r \cdot dx - \frac{1}{2} \left[\frac{x^2}{2R} + \frac{(x+dx)^2}{2R} \right] dx. \tag{3}$$

Нормоване значення виразу (3) є функцією розподілу амплітуди поля на частині розкритті синтезованої апертури, сигнал від якої отримано шляхом застосування цифрового фільтру нижніх частот з частотою зрізу, що дорівнює L_{x1} рад/сек [3].

Вона дорівнює

$$F_1(x) = 1 - \frac{1}{2\delta r} \left[\frac{x^2}{R} + \frac{x dx}{R} + \frac{(dx)^2}{2R} \right]. \quad (4)$$

Нехтуючи величинами вищого рівня малості, отримуємо

$$F_1(x) = 1 - \frac{x^2}{2R\delta r} = 1 - \frac{x^2}{2L_{x1}^2}. \quad (5)$$

Функція $F_1(x)$ визначається при $-L_{x1} < x < L_{x1}$. При інших значеннях x функція $F_1(x) = 0$.

Для сигналів відбиття, що виділяє смуговий фільтр №2 $F_2(x) = F_2'(x) + F_2''(x)$, де

$$F_2'(x) = 1 - \frac{(x - L_{x1})^2}{2(R + \delta r / 2)\delta r} \cong 1 - \frac{(x - L_{x1})^2}{2L_{x1}^2} \quad (6)$$

при $L_{x1} < x < L_{x2}$ та $F_2'(x) = 0$ при інших значеннях x .

$$F_2''(x) = 1 - \frac{(x + L_{x1})^2}{2\left(R + \frac{\delta r}{2}\right)\delta r} \cong 1 - \frac{(x + L_{x1})^2}{2L_{x1}^2} \quad (7)$$

при $-L_{x2} < x < -L_{x1}$ та $F_2''(x) = 0$ при інших значеннях x .

У співвідношеннях (5), (6), (7)

$$L_{x1} = \sqrt{R\delta r}; \quad L_{x2} = \sqrt{2R\delta r} \quad [3]. \quad (8)$$

Розподіл інтенсивності поля по розкриттю антени та її діаграма спрямованості (ДС) зв'язані за допомогою прямого і зворотного перетворення Фур'є.

Визначимо ДС синтезованої антени в горизонтальній площині за допомогою відомої методики аналізу та проектування антен [5, 6].

Поле в далекій зоні, що створюється елементом синтезованої антени $\delta r \times dx$ визначається виразом

$$dE = \frac{2}{L} F\left(\frac{2x}{L}\right) \frac{1}{R} \exp\left[j\omega\left(t - \frac{R - x \sin \theta}{c}\right)\right] dx \delta r, \quad (9)$$

де c – швидкість світла; ω – кутова частота; $F(2x/L)$ – функція розподілу амплітуди напруженості поля по розкриттю синтезованої антени РСА.

Функція $F(2x/L)$ зменшується від значення 1 в центрі синтезованої апертури до значення 0,5 на відстані L_{x1} від центру. Далі на відстані L_{x1} від центру вона стрибком збільшується до 1, а потім знову зменшується до значення 0,5 на відстані L_{x2} від центру синтезованої апертури і т. д. В залежності від кількості фільтрів, що використовуються.

Для аналітичного визначення ДС синтезованої апертури при штучно створеному квазіплоскому фронті зондувального сигналу складові функції розподілу поля в розкриві зручно апроксимувати функцією $\cos^2(b_i x)$.

Функція розподілу поля по розкриву синтезованої апертури при використанні двох фільтрів для створення плоского фронту хвилі дорівнює

$$F(x) = F_1(x) + F_2(x) = \cos^2\left(\frac{\pi}{4} \cdot \frac{1}{L_{x1}} x\right)_{x \in (-L_{x1} \div L_{x1})} + \cos^2\left[\frac{\pi}{4} \cdot \frac{1}{L_{x2} - L_{x1}} (x - L_{x1})\right]_{x \in (L_{x1} \div L_{x2})} + \cos^2\left[\frac{\pi}{4} \cdot \frac{1}{L_{x2} - L_{x1}} (x + L_{x1})\right]_{x \in (-L_{x2} \div -L_{x1})}. \quad (10)$$

А діаграма спрямованості синтезованої апертури

$$D_C(\theta) = \frac{j}{\lambda R} \delta r \left\{ \int_{-L_{x1}}^{L_{x1}} \cos^2\left(\frac{\pi}{4L_{x1}} x\right) \cdot e^{jkx \sin \theta} dx \right\} + \frac{j}{\lambda R} \delta r \left\{ \int_{L_{x1}}^{L_{x2}} \cos^2\left[\frac{\pi}{4} \cdot \frac{1}{L_{x2} - L_{x1}} (x - L_{x1})\right] \cdot e^{jkx \sin \theta} dx \right\} + \frac{j}{\lambda R} \delta r \left\{ \int_{-L_{x2}}^{-L_{x1}} \cos^2\left[\frac{\pi}{4} \cdot \frac{1}{L_{x2} - L_{x1}} (x + L_{x1})\right] \cdot e^{jkx \sin \theta} dx \right\}. \quad (11)$$

Перетворимо другий і третій доданок (11). Для цього введемо нові змінні $y = x - L_{x1}$; $z = x + L_{x1}$.

Тоді

$$D_C(\theta) = \frac{j}{\lambda R} \delta r \left\{ \int_{-L_{x1}}^{L_{x1}} \cos^2\left(\frac{\pi}{4L_{x1}} x\right) \cdot e^{jkx \sin \theta} dx \right\} + \frac{j}{\lambda R} \delta r \left\{ e^{jkL_{x1} \sin \theta} \int_0^{\Delta L_1} \cos^2\left[\frac{\pi}{4} \cdot \frac{1}{\Delta L_1} y\right] \cdot e^{jky \sin \theta} dy \right\} + \frac{j}{\lambda R} \delta r \left\{ e^{-jkL_{x1} \sin \theta} \int_{-\Delta L_1}^0 \cos^2\left[\frac{\pi}{4} \cdot \frac{1}{\Delta L_1} z\right] \cdot e^{jkz \sin \theta} dz \right\}, \quad (12)$$

де $\Delta L_1 = L_{x2} - L_{x1}$.

Сума другого і третього доданка (12) без множника $\frac{j}{\lambda R} \delta r$ дорівнює

$$\begin{aligned} & \frac{e^{jkL_{x1}\sin\theta} + e^{-jkL_{x1}\sin\theta}}{2} \times \int_{-\Delta L_1}^{\Delta L_1} \cos^2\left(\frac{\pi}{4\Delta L_1}y\right) e^{jkys\sin\theta} dy = \\ & = \cos(kL_{x1}\sin\theta) \times \int_{-\Delta L_1}^{\Delta L_1} \cos^2\left(\frac{\pi}{4\Delta L_1}y\right) e^{jkys\sin\theta} dy . \end{aligned} \quad (13)$$

В співвідношенні (12) при нормуванні діаграми спрямованості множники, які стоять перед фігурними дужками можна не рахувати.

Введемо узагальнюючі координати

$$\mu = \frac{2\pi L_{x1}}{\lambda} \sin\theta; \quad \nu = \frac{x}{L_{x1}}; \quad \xi = \frac{2\pi\Delta L_1}{\lambda} \sin\theta; \quad \eta = \frac{y}{\Delta L_1} .$$

Тоді

$$D_C(\mu, \xi) = L_{x1} \int_{-1}^1 \cos^2\left(\frac{\pi}{4}\mu\right) e^{j\mu\nu} d\nu + \Delta L_1 \cos(kL_{x1}\sin\theta) \int_{-1}^1 \cos^2\left(\frac{\pi}{4}\xi\right) e^{j\xi\eta} d\eta . \quad (14)$$

Рішення інтегралів виду

$$D_C(p) = \int_{-1}^1 \cos^2(aq) e^{jpq} dq , \quad (15)$$

що входять до співвідношення (14) дорівнює [7]

$$D_C(\theta) = 0,5 \frac{\sin(p-2a)}{p-2a} + \frac{\sin p}{p} + 0,5 \frac{\sin(p+2a)}{p+2a} . \quad (16)$$

З урахуванням (16) діаграма спрямованості синтезованої апертури при використанні двох фільтрів для створення плоского фронту хвилі дорівнює

$$\begin{aligned} D_C(\mu, \xi) = & L_{x1} \left[0,5 \frac{\sin(\mu-0,5\pi)}{\mu-0,5\pi} + \frac{\sin \mu}{\mu} + 0,5 \frac{\sin(\mu+0,5\pi)}{\mu+0,5\pi} \right] + \\ & + \Delta L_1 \cos(kL_{x1}\sin\theta) \left[0,5 \frac{\sin(\xi-0,5\pi)}{\xi-0,5\pi} + \frac{\sin \xi}{\xi} + 0,5 \frac{\sin(\xi+0,5\pi)}{\xi+0,5\pi} \right] . \end{aligned} \quad (17)$$

Діаграму спрямованості $D_C(\mu, \xi) = D_C(\theta)$ необхідно привести до одного аргументу з ДС синтезованої апертури, яка отримана для рівномірного розподілу амплітуди поля по розкритті синтезованої апертури.

Введемо узагальнюючий для всіх доданків синтезованої ДС аргумент

$$p = \frac{2\pi L_{x1}}{\lambda} \sin \theta = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{R\delta r} \cdot \sin \theta . \quad (18)$$

Тоді ДС синтезована з використанням N фільтрів для формування квазіплоского фронту хвилі сигналу зондування згідно [3] дорівнює

$$\begin{aligned} D_{CN}(p) = & \sum_{n=1}^N \cos(p\sqrt{n-1}) \cdot (\sqrt{n} - \sqrt{n-1}) \sqrt{R\delta r} \cdot 0,5 \frac{\sin\left[\frac{(\sqrt{n} - \sqrt{n-1})p - 0,5\pi}{(\sqrt{n} - \sqrt{n-1})}\right]}{(\sqrt{n} - \sqrt{n-1})} + \\ & + \sum_{n=1}^N \cos(p\sqrt{n-1}) \cdot (\sqrt{n} - \sqrt{n-1}) \sqrt{R\delta r} \cdot \frac{\sin\left[\frac{(\sqrt{n} - \sqrt{n-1})p}{(\sqrt{n} - \sqrt{n-1})}\right]}{(\sqrt{n} - \sqrt{n-1})} + \\ & + \sum_{n=1}^N \cos(p\sqrt{n-1}) \cdot (\sqrt{n} - \sqrt{n-1}) \sqrt{R\delta r} \cdot 0,5 \frac{\sin\left[\frac{(\sqrt{n} - \sqrt{n-1})p + 0,5\pi}{(\sqrt{n} - \sqrt{n-1})}\right]}{(\sqrt{n} - \sqrt{n-1})} . \end{aligned} \quad (19)$$

Фрагмент діаграми спрямованості, розрахованої згідно співвідношення (19) для 4-х фільтрів ($N=4$), що використовуються при формуванні квазіплоского фронту хвилі, наведена на рис. 3. Розрахунки виконано для дальності $R = 40$ км, $\delta r = 1$ м і $\lambda = 4$ см.

Діаграми спрямованості РСА без та з випрямленням фронту хвилі



Рис. 3. Діаграми спрямованості для сферичного і квазіплоского фронту, сформованого за допомогою 4-х фільтрів:

- ряд 1 – ДС РСА з урахуванням втрат за рахунок сферичності фронту хвилі;
- ряд 2 – ДС РСА з урахуванням обмежень на добуток розрізнявальних координат без урахування втрат при узгодженій фільтрації;
- ряд 3 – ДС РСА при формуванні квазіплоского фронту хвилі;
- ряд 4 – ДС РСА при формуванні квазіплоского фронту хвилі без урахування втрат при узгодженій фільтрації.

Приведений фрагмент синтезованої діаграми спрямованості дозволяє визначити відносне розширення головної пелюстки синтезованої антени смугової РСА. Для цього на рис. 3 наведені фрагменти функцій $\frac{\sin kp}{kp}$ (криві 2 і 4), які відповідають рівномірному розподілу енергії сигналу від елементів розрізнення при обробці на інтервалі синтезування апертури.

Одиниця при вимірюванні узагальненої змінної відповідає масштабу 10:1. Тобто одиниця по осі p (вісі азимутального кута) відповідає значенню $p = 0,1$ радіана.

Аналіз наведених на рис. 3 кривих дозволяє розрахувати відносне розширення діаграми спрямованості синтезованої антени, що обумовлено неточностями штучного формування плоского фронту хвилі зондувального сигналу. Це розширення не перевищує 10% при вимірі ширини діаграми спрямованості на рівні 0,7 від її максимального значення. Крім того, необхідно відмітити, що, по-перше, неточність при формуванні плоского фронту хвилі на чверть зменшується відношення сигнал/шум в елементах радіолокаційного зображення. По-друге, за рахунок втрат при узгодженій фільтрації зменшується рівень першої бокової пелюстки з 0,22 до 0,13 від максимального значення головної пелюстки. Все це необхідно враховувати при розробці РСА надвисокого розрізнення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Федотов Б.М., Станкевич С.А. Сучасний стан авіаційних радіолокаційних станцій з синтезованою апертурою та напрямки їх удосконалення. Труды університету, 2009. – №2 (92). – С. 128-139.
2. Федотов Б. М. Криза класичної структури радіолокаційної станції бокового огляду і можливості її подолання / Федотов Б. М., Ковтун В.І., Ставицький С. Д. Державний науково-дослідний інститут авіації. Збірник наукових праць. Вип. 4 (11), 2008. – С. 99-105.
3. Федотов Б.М., Станкевич С.А., Пономаренко С. О. Спосіб синтезування апертури РЛС бокового огляду і пристрій для його здійснення. Патент UA № 92116 від 27.09.2010.
4. Leith E. N. Optikal processing techniques for simultaneous pulse compression and beam sharpening. IEEE Trans., 1968, Nov., AES-4, № 6, p. 879-885.
5. Реутов А. П. Радиолокационные станции бокового обзора / А. П. Реутов, Б.А. Михайлов, Г.С.Кондратенков, Б.В. Бойко. – М.: „Советское радио”, 1970. – 360 с.
6. Скольник М. Справочник по радиолокации. Том 2. Радиолокационные антенные устройства // Под ред. П.И. Дудника. – М.: Сов. Радио, 1977. – 408 с.

7. Федотов Б. М. Вплив діаграми спрямованості антени радіолокаційної станції бокового огляду на її розрізнявальну здатність. Державний науково-дослідний інститут авіації. Збірник наукових праць. Вип. 5 (12). 2009. – С. 115-120.

Надійшла до редакції 29.10.2010