

УДК 621. 396. 96

*Борис Никитович Федотов,  
Александр Васильевич Небога,  
Татьяна Юрьевна Куровская*

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СФЕРИЧНОСТИ ФРОНТА ВОЛНЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛОСОВЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ С СИНТЕЗИРОВАНИЕМ АПЕРТУРЫ

В настоящее время прогресс в технологиях создания бортовых радаров с траекторной обработкой сигналов достиг такого уровня, что позволяет выдвигать требования к разрешающей способности радиолокационных станций с синтезированием апертуры (РСА) двойного назначения в доли метра.

В то же время выдвигаемые требования к РСА сверхвысокого разрешения должны обосновываться с учётом реальных факторов, которые ухудшают потенциальные характеристики. Поэтому количественная оценка влияния различных объективных факторов на основные характеристики РСА является актуальной научной и практической задачей.

В теории РСА известны ряд факторов, которые влияют на ухудшение потенциальных характеристик РСА. Это квантование (усреднение) сигнала по апертуре антенны, это не прямоугольность диаграммы направленности приёмопередающей антенны, это и влияние сферичности фронта волны зондирующего сигнала.

Уточнённая количественная оценка усреднения сигнала по апертуре антенны и количественная оценка не прямоугольной формы диаграммы направленности приёмопередающей антенны приведена в [1, 2].

Ограничение в дальности действия классической структуры полосовой РСА от разрешающей способности, обусловленное сферичностью фронта волны зондирующего сигнала рассмотрено в [3]. В то же время влияние сферичности фронта волны на другие характеристики РСА не исследовано.

*Целью данной статьи* является оценка ухудшения характеристик полосовой РСА,

которое связано со сферичностью фронта волны.

Для количественной оценки влияния сферичности фронта волны на характеристики полосовой РСА применим модель отражения, которая основана на использовании понятия удельной эффективной отражающей способности поверхности.

Отметим, что в процессе синтезирования апертуры алгоритм согласованной фильтрации предполагает когерентное суммирование отражённых сигналов от каждого элемента разрешения в каждом канале наклонной дальности. При этом предполагается, что, во-первых, когерентное суммирование, возможно, осуществлять на линейном интервале синтезирования величиной

$$L \leq \frac{\lambda}{d_r} R, \quad (1)$$

где  $L$  — линейный интервал синтезирования;  $\lambda$  — длина волны;  $d_r$  — горизонтальный размер приёмопередающей антенны;  $R$  — расстояние до канала наклонной дальности.

Во-вторых, что фронт волны зондирующего сигнала плоский, и в РСА осуществляется запись отражённых сигналов для каждого канала дальности от прямоугольных элементов размером

$$\alpha \times b = L_i \times \delta r, \quad (2)$$

где  $\delta r$  — разрешающая способность по наклонной дальности;  $L_i$  — размер синтезируемой апертуры для  $i$ -го канала наклонной дальности.

В процессе обработки (согласованной фильтрации) энергия сигнала от элемента



Для аналитического определения диаграммы направленности синтезированной апертуры распределение напряжённости поля в раскрыве удобно аппроксимировать функцией

$$F'(x) = \cos^2 bx, \quad (13)$$

где  $b = a \cdot \frac{2}{L}$ ;  $a = \frac{\pi}{4}$ , что соответствует значению  $F'(x = \frac{L}{2}) = 0,5$  на краю эффективно-го раскрыва синтезируемой апертуры.

Выборочные значения функции  $F(x)$  и аппроксимирующей функции  $F'(x)$  приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Таблица сравнения функции интенсивности поля по раскрыву синтезируемой апертуры и функции её аппроксимирующей**

x	0	L/8	L/4	3L/8	L/2
F(x)	1	0,97	0,87	0,72	0,5
F'(x)	1	0,96	0,85	0,69	0,5
$\frac{F(x) - F'(x)}{F(x)}$	0	0,01	0,02	0,03	0

Тогда диаграмма направленности синтезированной апертуры

$$D_c(\theta) = \frac{j}{\lambda R} \delta r \int_{-L/2}^{L/2} \cos^2 \left( \frac{\pi x}{2L} \right) \times e^{jkr \sin \theta} dx \quad (14)$$

В соотношении (14) при нормировании диаграммы направленности множители, которые находятся перед знаком интеграла можно не учитывать.

Вводя обобщённые координаты

$$p = \frac{\pi L}{\lambda} \sin \theta \quad \text{и} \quad q = \frac{2x}{L} \quad (15)$$

в уравнение (14), получим

$$D_c(p) = \int_{-1}^1 \cos^2(aq) e^{jpaq} dq. \quad (16)$$

Определение интеграла (16) приведено в [7] и имеет вид

$$D_c(\theta) = 0,5 \frac{\sin(p-2a)}{p-2a} + \frac{\sin p}{p} + 0,5 \frac{\sin(p+2a)}{p+2a} \quad (17)$$

В соотношении (17) функция соответствует диаграмме направленности синтезируемой антенны при постоянной мощности принимаемого сигнала от блестящей точки на интервале синтезирования. Две другие функции  $0,5 \sin(p-2a) / (p-2a)$  и  $0,5 \sin(p+2a) / (p+2a)$  характеризуют влияние на синтезируемую диаграмму направленности РСА сферичности фронта волны зондирующего сигнала и определяют степень расширения диаграммы направленности синтезированной антенны.

Фрагмент диаграммы направленности синтезированной антенны, соответствующий соотношению (17) при  $\alpha = \pi / 4$  представлен на рис. 3 (кривая 1).

Приведённый фрагмент синтезированной диаграммы направленности  $D_c(p)$  позволяет определить относительное расширение главного лепестка синтезированной антенны полосовой РСА. Для наглядности на рис. 3 (кривая 2) приведен фрагмент функции  $\frac{\sin p}{p}$ , который соответствует равномерному распределению энергии сигнала

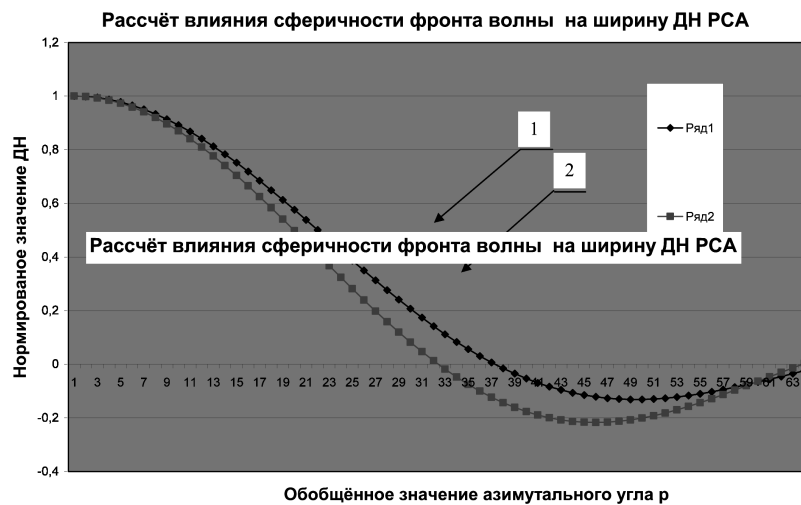


Рис. 3. Влияние сферичности фронта волны на диаграмму направленности РСА в горизонтальной плоскости

от элемента разрешения при обработке на интервале синтезирования апертуры.

Единица при измерении обобщённой переменной  $p$  соответствует масштабу 10:1. То есть единица по оси  $p$  на рис. 3 соответствует значению  $p = 0,1$  радиана. Анализ кривых 1 и 2 позволяет рассчитать относительное расширение диаграммы направленности синтезируемой антенны обусловленное сферичностью фронта волны зондирующего сигнала по сравнению с диаграммой направленности при плоском фронте и одинаковых интервалах синтезирования. Это расширение равно 0,07 при максимально допустимом интервале синтезирования по критерию Лейта, который ограничивает величину произведения разрешаемых координат [6].

Таким образом, во-первых, разрешающая способность по путевой дальности в полосовой РСА ухудшается на 7% на максимально допустимом интервале синтезирования по критерию Лейта. Во-вторых, на четверть уменьшается отношение сигнал/шум. И,

в-третьих, уменьшается максимальная величина первого бокового лепестка со значения 0,22 до 0,13 от максимального значения главного лепестка. Всё это необходимо учитывать при разработке РСА.

### Литература

- 1. Федотов Б. М.** Вплив квантування сигналу приймальної антени радіолокаційної станції бокового огляду на її розрізнення / Б. М. Федотов // Труды университета. — 2009. — № 3 (93). — С. 171—177.
- 2. Федотов Б. М.** Вплив діаграми спрямованості антени радіолокаційної станції бокового огляду на її розрізнювальну здатність / Б. М. Федотов // Держ. наук.-дослідний ін-т авіації. Зб. наук. праць. — 2009. — Вип. 5 (12). — С. 115—120.
- 3. Федотов Б. М.** Криза класичної структури радіолокаційної станції бокового огляду і можливості її подолання / Б. М. Федотов, В. І. Ковтун, С. Д. Ставицький // Держ. наук.-дослідний ін-т авіації. Збірник наукових праць. — 2008. — Вип. 4 (11). — С. 99—105.
- 4. Реутов А. П.** Радиолокационные станции бокового обзора / А. П. Реутов, Б. А. Михайлов, Г. С. Кондратенков, Б. В. Бойко. — М.: Сов. радио, 1970. — 360 с.
- 5. Скольник М.** Справочник по радиолокации / Т. 2. Радиолокационные антенные устройства / под ред. П. И. Дудника. — М.: Сов. радио, 1977. — 408 с.
- 6. Leith E. N.** Optikal processing techniques for simultaneous pulse compression and beam sharpening // IEEE Trans. — 1968. — Nov., AES-4, № 6. — p. 879—885.

В статті отримана оцінка впливу сферичності фронту хвилі сигналу зондування на розрізнювальну здатність за шляховою дальністю та енергетику РСА надвисокого розрізнення.

*Ключові слова:* синтезована апертура, розрізнювальна здатність, діаграма спрямованості.

The article contains the estimate of impact of the wave front sphericity of a probing signal on along-track resolution and energy of ultra-high resolution radars.

*Key words:* synthetic aperture, resolution, directional pattern.