

УДК 621. 396

Б.Н. Федотов, А.А. Слюсарчук

Національний університет оборони України, Київ

ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ РАСШИРЕНИЕ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ РАДИОЛОКАТОРА С СИНТЕЗИРУЕМОЙ АПЕРТУРОЙ, И ОЦЕНКА ИХ СОВМЕСТНОГО ВЛИЯНИЯ НА РАЗРЕШАЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ

Статья посвящена интегральной количественной оценке воздействия факторов, которые ухудшают потенциальную разрешающую способность радиолокационной станции с синтезированием апертуры. Объективными факторами, которые расширяют синтезированную диаграмму направленности, являются, во-первых, отличия формы диаграммы направленности приёмно-передающей антенны от П-образной. Во-вторых, усреднение отражённого сигнала по апертуре приёмной антенны. И, в-третьих, не идеальность выравнивания сферического фронта волны зондирующих сигналов. Численная оценка степени расширения синтезируемой диаграммы направленности упрощает расчёт диаграммы направленности реальной антенны, которая обеспечит требуемую разрешающую способность по путевой дальности радара с синтезируемой апертурой.

Ключевые слова: синтезированная апертура, расширение диаграммы направленности антенны, разрешающая способность.

Введение

Современные радиолокационные станции с синтезируемой апертурой имеют разрешающую способность единицы и доли метра. В процессе их

совершенствования были решены вопросы компенсации траекторных нестабильностей носителя, вопросы быстродействия аналого-цифровых преобразователей, которые обеспечивают сегодня разрешающую способность до 0,2-0,3 метра.

При таком разрешении становится острой проблема структурного ограничения дальности действия полосовой радиолокационной станции с синтезируемой апертурой (РСА) сверхвысокого разрешения, которая обусловлена сферичностью фронта волны зондирующего сигнала.

Для её решения предложена модернизированная структура полосовой РСА [1]. Суть идеи состоит в том, что искусственно формируется плоский фронт зондирующего сигнала. Это выполняется путём дополнительной обработки отражённых сигналов. Сегодня, когда идёт борьба за каждый сантиметр разрешающей способности и каждый километр дальности действия, при задании требований к новым перспективным РСА необходимо учитывать объективные факторы, ухудшающие потенциальную разрешающую способность по путевой дальности.

Факторами, объективно влияющими на ухудшение потенциальной разрешающей способности РСА по путевой дальности, являются:

- форма диаграммы направленности (ДН) приёмно-передающей антенны РСА;
- влияние усреднения энергии отражённого сигнала по апертуре приёмной антенны;
- неточность выравнивания сферического фронта зондирующего сигнала;
- степень отклонения от П-образной формы амплитудно-частотной характеристики селективных фильтров выравнивания фронта волны.

Влияние каждого из этих факторов в отдельности на разрешающую способность по путевой дальности рассмотрено в работах [2–4]. В тоже время перечисленные факторы одновременно влияют на характеристики РСА.

Целью данной статьи является оценка одновременного воздействия всех перечисленных факторов на разрешающую способность по путевой дальности полосовой РСА сверхвысокого разрешения с повышенной дальностью действия.

Рассмотрим сначала физическую сущность перечисленных факторов.

1. Влияние формы диаграммы направленности приёмно-передающей антенны полосовой РСА

В процессе движения носителя РСА отражённый сигнал от блестящей точки по амплитуде (мощности) повторяет форму диаграммы направленности антенны передатчика (рис. 1).

Считая, что в полосовой РСА используется одна приёмно-передающая антенна для излучения и приема сигнала, распределение отраженного сигнала по раскрытию синтезированной апертуры соответствует квадрату коэффициента направленного действия (КНД) $D^2(\theta)$ реальной антенны РСА.

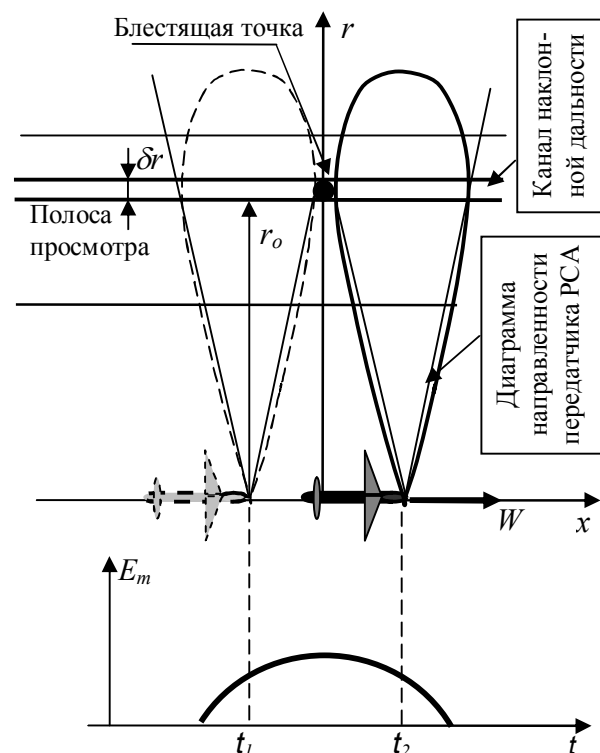


Рис. 1. Формирование сигнала от блестящей точки в канале наклонной дальности РСА

Как правило, распределение энергии по поверхности передающей антенны стараются сделать близким к равномерному. При этом диаграмма направленности имеет вид

$$D(\theta) = A \cdot \sin(\pi d_r (\theta / \lambda)) / (\pi d_r (\theta / \lambda)), \quad (1)$$

где d_r – горизонтальный размер антенны РСА; θ – угол в горизонтальной плоскости, который отсчитывается от оси антенны (направления максимального КНД); λ – длина волны.

Для получения аналитической оценки диаграммы направленности синтезируемой апертуры распределение напряженности электромагнитного поля по её эффективному раскрытию аппроксимируем функцией

$$F_1(x) = \cos^2 bx, \quad (2)$$

где $b = a_1 \cdot (2/L_c)$; $a_1 = 0,88$ радиан, что соответствует значению $F(x = L_c / 2) = 0,63$ на краю эффективного раскрытия.

Диаграмма направленности синтезированной апертуры РСА с учетом формы диаграммы направленности реальной антенны равна [2]:

$$D_c(p) = 0,5 \frac{\sin(p - 2a_1)}{p - 2a_1} + \frac{\sin(p)}{p} + 0,5 \frac{\sin(p + 2a_1)}{p + 2a_1}, \quad (3)$$

$$\text{где } p = \frac{\pi L_c}{\lambda} \sin(\theta); \quad q = \frac{2x}{L_c}, \quad (4)$$

L_c – длина синтезированной апертуры; a_1 – фиксированная константа.

2. Влияние квантования (усреднения) сигнала по раскрытию приемной антенны

Усреднение сигнала по апертуре антенны можно определить, используя модель процесса, которая изображена на рис. 2.

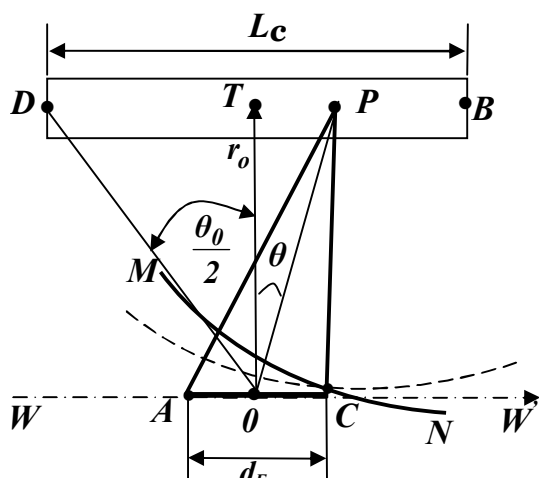


Рис. 2. Модель квантования сигнала по апертуре антенны

На рис. 2 точка P – это блестящая точка, например, всенаправленный отражатель на поверхности моря в штить; AC – антенна PCA, которая движется по направлению W-W'; θ_0 – ширина диаграммы направленности в горизонтальной плоскости; d_r – горизонтальный размер приёмо-передающей антенны РЛС БО; $\cup MCN$ – фронт волны, которая отражена от блестящей точки P; r_0 – расстояние до канала наклонной дальности полосовой PCA; $L_c = DB$ – длина синтезирования апертуры на расстоянии r_0 .

Когда точечный отражатель находится на краю диаграммы направленности антенны PCA, разница в расстоянии от отражателя (точка B) до крайних точек антенны (до точек A и C) равна [3]

$$\Delta r \cong d_r \frac{\theta_0}{2} \cong \frac{\lambda}{2}, \quad (5)$$

Для определения степени расширения главного лепестка синтезированной апертуры за счет квантования по раскрытию реальной антенны необходимо определить закон изменения амплитуды принятого сигнала по раскрытию синтезированной апертуры. Функция аппроксимации распределения амплитуды сигнала по раскрытию синтезированной апертуры имеет вид [3]

$$F_2(cx) = F_2\left(\frac{2a_2x}{L_c}\right) = \cos(a_2q) = \cos(0,87q), \quad (6)$$

где $c = \frac{2a_2}{L_c}$; $a_2 = 0,87$; $q = \frac{2x}{L_c}$.

При введенных обобщенных координатах p, q диаграмма направленности равна [3]:

$$D_{c2}(p) = \int_{-1}^{+1} \cos(a_2q) \exp(jpq) dq = \frac{\sin(p+a_2)}{p+a_2} + \frac{\sin(p-a_2)}{p-a_2}, \quad (7)$$

где $a_2 = 0,87$; $p = (\pi L_c / \lambda) \cdot \sin \theta$ и $q = 2x / L_c$.

3. Неточность выравнивания сферического фронта зондирующего сигнала

При синтезировании апертуры (согласованной фильтрации) энергия принятого сигнала, от элемента $R \cdot dx \times \delta r$ кольцевого сектора $R\theta_0 \times \delta r$ выделяемого канала наклонной дальности i будет пропорциональна площади наложения элементов кольцевого сектора на площадь канала наклонной дальности (рис. 3).

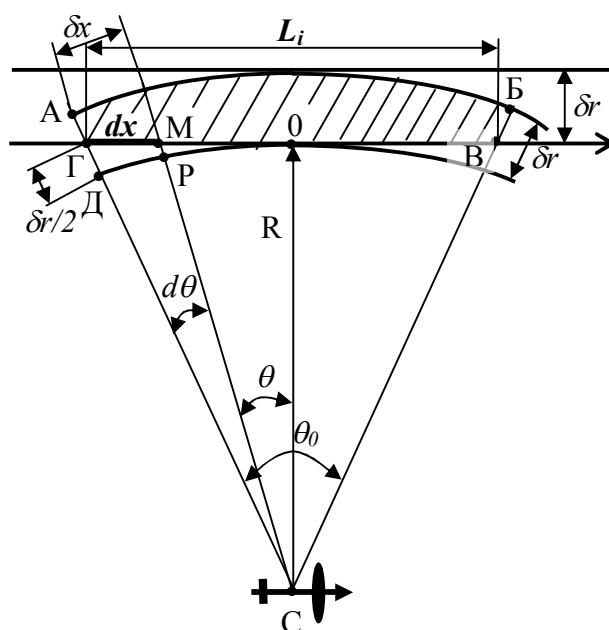


Рис. 3. Пояснение к процессу синтезирования апертуры в i -м канале дальности

В процессе синтезирования апертуры сигнал от элемента $dx \times \delta r$ будет меняться. Определим зависимость величины сигнала, который отдельный элемент $dx \times \delta r$ создаёт в канале наклонной дальности при синтезировании апертуры.

Нормированное значение функции распределения амплитуды поля по раскрытию синтезированной апертуры равно [4]

$$F_3'(x) = 1 - 2x^2 / L_c, \quad (8)$$

Функция $F_3'(x)$ уменьшается от значения „1” – в центре синтезированной апертуры, до значения „0,5” – на краях синтезированной апертуры.

Для аналитического определения диаграммы направленности синтезированной апертуры целесообразно распределение поля по её раскрытию аппроксимировать функцией

$$F_3(x) = \cos^2(\gamma x), \quad (9)$$

где $\gamma = 2a_3/L_c$, $a_3 = \pi/4$, что соответствует значению $F_3(x = L_c/2) = 0.5$ на краю эффективного раскрыва синтезируемой апертуры.

Диаграмма направленности синтезированной апертуры при этом равна

$$D_{c3}(p) = 0,5 \frac{\sin(p-2a_3)}{p-2a_3} + \frac{\sin(p)}{p} + 0,5 \frac{\sin(p+2a_3)}{p+2a_3}. \quad (10)$$

4. Интегральная оценка расширения синтезированной диаграммы направленности

Функция распределения амплитуды поля по раскрыву синтезированной апертуры с учетом перечисленных факторов, а именно диаграммы направленности приемо-передающей антенны, квантования отраженного сигнала по апертуре антенны и не идеальности искусственного сформированного плоского фронта волны, имеет вид

$$F(x) = F_1(x)F_2(x)F_3(x) = \cos^2(bx)\cos(cx)\cos^2(\gamma x) \quad (11)$$

После преобразования (11) получаем

$$\begin{aligned} F(x) &= 0,5(1 + \cos(2bx))\cos(cx) \times \\ &\times 0,5(1 + \cos(2\gamma x)) = 0,25\{\cos(cx) \times \\ &\times (1 + \cos(2\gamma x)) + \cos(2bx)\cos(cx)(1 + \cos(2\gamma x))\} = \quad (12) \\ &= 0,25\{\cos(cx) + \cos(cx)\cos(2\gamma x) + \\ &+ \cos(2bx)\cos(cx) + \cos(2bx)\cos(cx)\cos(2\gamma x)\}. \end{aligned}$$

Учитывая, соотношения для произведений тригонометрических функций

$$\cos(x)\cos(y) = 0,5 \cdot (\cos(x+y)\cos(x-y)), \quad (13)$$

получаем:

$$\begin{aligned} F(x) &= \frac{1}{4}\{\cos(cx) + \frac{1}{2}[\cos(cx+2\gamma x) + \cos(cx-2\gamma x)] + \\ &+ \frac{1}{2}[\cos(cx+2bx) + \cos(cx-2bx)] + \\ &+ \frac{1}{4}[\cos(cx+2bx-2\gamma x) + \cos(2bx+2\gamma x-cx) + \\ &+ \cos(2\gamma x+cx-2bx) + \cos(cx+2bx+2\gamma x)]\}. \quad (14) \end{aligned}$$

Диаграмма направленности синтезируемой апертуры является суммой функцией вида (7) и равна

$$D_c(p) = \sum_{i=1}^9 A_i \left[\frac{\sin(p+a_i)}{p+a_i} + \frac{\sin(p-a_i)}{p-a_i} \right], \quad (15)$$

где $a_1 = 0,87$; $a_2 = 0,87 + \pi/2$; $a_3 = 0,87 - \pi/2$;

$$a_4 = 0,87 + 2 \cdot 0,88$$

$$a_5 = 0,87 - 2 \cdot 0,88$$

$$a_6 = 0,87 + 2 \cdot 0,88 - \pi/2$$

$$a_7 = 2 \cdot 0,88 + \pi/2 - 0,87$$

$$a_8 = \pi/2 + 0,87 - 2 \cdot 0,88$$

$$a_9 = \pi/2 + 0,87 + 2 \cdot 0,88$$

$$A_1 = 0,25; A_2 \div A_5 = 0,125; A_6 \div A_9 = 0,0625.$$

Фрагмент диаграммы направленности синтезированной антенны, при учете влияния формы диаграммы направленности реальной приемо-передающей антенны, квантования (усреднения) сигнала по апертуре реальной антенны и сферичности волны зондирующего сигнала приведен на рис. 4 кривая 2.

Влияние на расширение синтезированной ДН РСА квантования сигнала, сферичности фронта волны и формы ДН приёмо-передающей антенны

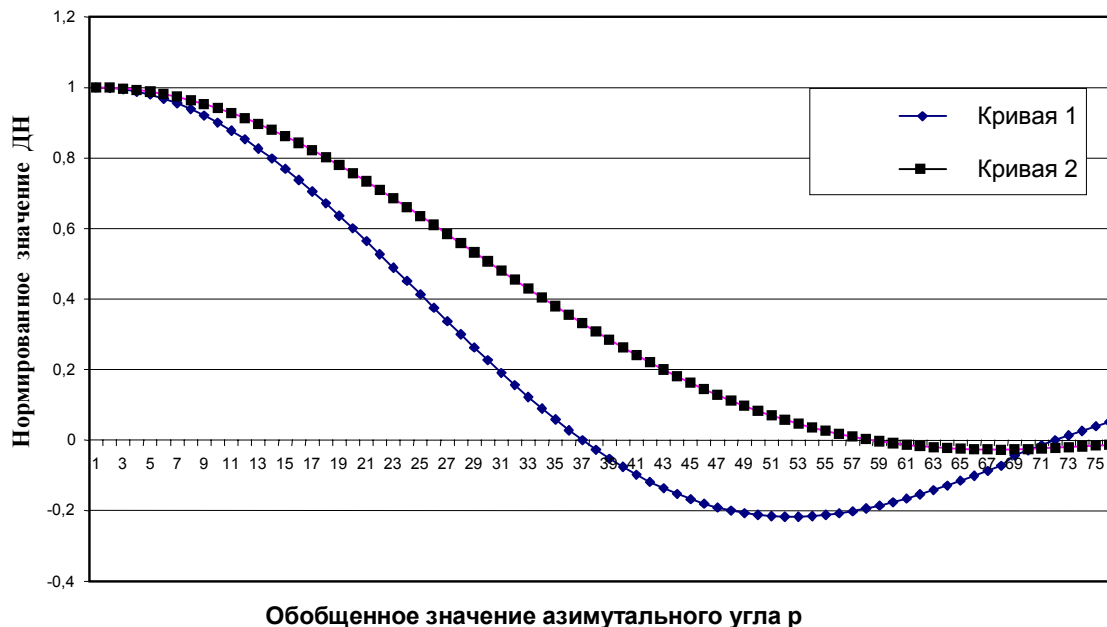


Рис. 4. Диаграммы для определения суммарного расширения диаграммы направленности синтезированной антенны РСА

Приведенный фрагмент синтезированной диаграммы направленности $D_c(p)$ (кривая 2 на рис. 4), позволяет определить относительное расширение

главного лепестка синтезированной антенны полосовой радиолокационной станции с синтезируемой апертурой.

Для этого на рис. 4 (кривая 1) приведен фрагмент функции $\sin(p)/p$, который соответствует равномерному распределению энергии сигнала отражённого от элемента разрешения на интервале синтеза апертуры.

Единичный интервал обобщённой переменной p соответствует азимутальному угловому интервалу 5° ($p=5\theta^\circ$).

Анализ кривых 1 и 2 на рис. 4 позволяет рассчитать относительное расширение диаграммы направленности синтезируемой антенны, вызванное сферичностью фронта волны зондирующего сигнала, квантованием сигнала по апертуре реальной антенны и неравномерностью отраженного сигнала от элемента разрешения по интервалу синтеза апертуры, которое обусловлено формой диаграммы направленности приемо-передающей антенны. Это расширение равно 32% при отсчете на уровне 0,701 от максимального значения. При этом уровень боковых лепестков синтезируемой диаграммы направленности составляет не более 2,5%, т.е. – 36дБ.

Что касается влияния формы амплитудно-частотных характеристик избирательных фильтров, используемых при выравнивании фронта волны, их можно рассчитать таким образом, что потерь в разрешающей способности по путевой дальности не будет.

При задании тактико-технических характеристик к разрабатываемым радиолокационным станциям с синтезируемой апертурой и их проектировании необходимо учитывать, что реальная предельно достижимая разрешающая способность по путевой дальности на 30-35% хуже потенциальной разрешающей способности радиолокационных станций с

синтезируемой апертурой, так как при выводе потенциальной разрешающей способности не учитывалось влияние указанных объективных факторов.

Данная статья подводит итог теоретическому анализу влияния основных объективных факторов, которые расширяют диаграмму направленности синтезированной апертуры, и даёт оценку относительного расширения синтезированной диаграммы направленности, которое происходит за счёт этих факторов.

Список литературы

1. Патент №92116. Україна. МПК G01S 13/90. Спосіб синтезування апертури РЛС бокового огляду і пристрій для його здійснення / Б.М. Федотов, С. А. Станкевич, С.О. Пономаренко. – Власник патенту Державний науково-дослідний інститут авіації; – № а 2009 07223; заявл. 10.07.09; опубл. 27.09.10, Бюл. № 18.

2. Федотов Б.М. Вплив діаграми спрямованості антени радіолокаційної станції бокового огляду на її розрізняльну здатність / Б.М. Федотов // Державний науково-дослідний інститут авіації. Збірник наукових праць. – К.: ДНДІА, 2009. – Вип. 5 (12). – С. 115-120.

3. Федотов Б.М. Вплив квантування сигналу приймальної антени радіолокаційної станції бокового огляду на її розрізняльну здатність / Б.М. Федотов // Труды університету. – 2009. – №3 (93). – С. 171-177.

4. Федотов Б.М. Оцінка впливу неточностей компенсації сферичності фронту хвилі в радіолокаційних станціях надвисокого розрізняльну здатності / Б.М. Федотов // Державний науково-дослідний інститут авіації. Збірник наукових праць. – К.: ДНДІА, 2010. – Вип. 6 (13). – С. 48-55.

Надійшла до редколегії 2.03.2011

Рецензент: д-р техн. наук, с.н.с. С.А. Станкевич, Інститут геологічних наук НАН України, Київ.

ФАКТОРИ, ЩО ВИЗНАЧАЮТЬ РОЗШИРЕННЯ ДІАГРАМИ СПРЯМОВАНОСТІ РАДІОЛОКАТОРА ІЗ СИНТЕЗОВАНОЮ АПЕРТУРОЮ, І ОЦІНКА ЇХНЬОГО СПІЛЬНОГО ВПЛИВУ НА РОЗРІЗНОВАЛЬНУ ЗДАТНІСТЬ

Б.М. Федотов, О.О. Слюсарчук

Стаття присвячена інтегральній кількісній оцінці впливу факторів, які погіршують потенційну розрізняльну здатність радіолокаційної станції із синтезуванням апертури. Об'єктивними факторами, які розширюють синтезовану діаграму спрямованості, є, по-перше, відмінності форми діаграми спрямованості приймально-передавальної антени від П-образної. По-друге, усереднення відбитого сигналу по апертурі прийомної антени. І, по-третє, не ідеальність вирівнювання сферичного фронту хвилі зондувальних сигналів. Чисельна оцінка ступеня розширення синтезованої діаграми спрямованості спрощує розрахунок діаграми спрямованості реальної антени, яка забезпечує необхідну розрізняльну здатність за шляховою дальністю радара із синтезованою апертурою.

Ключові слова: синтезована апертура, розширення діаграми спрямованості антени, розрізняльна здатність.

THE FACTORS THAT DETERMINE THE WIDENING OF THE SAR'S DIRECTIONAL DIAGRAM AND THE ESTIMATION OF THEIR JOINT EFFECT ON THE RESOLUTION.

B.M. Fedotov, O.O. Slusarchuk

The article is devoted to the integrated quantitative assessment of the impact of factors that worsen the potential resolution of the radar with synthetic aperture. Objective factors that enhance the synthesized radiation pattern, are, firstly, the differences in shape pattern of receiving and transmitting antennas from the U-shaped. Secondly, the averaging of the reflected signal at the receiving antenna aperture. And, thirdly, is not perfect alignment of the spherical wavefront of transmitted signals. Numerical evaluation of the degree of expansion of the synthesized pattern simplifies the calculation of the actual pattern of the antenna, which will provide the required resolution to track range radar with synthesized aperture.

Keywords: synthesized aperture, widening of the directional diagram of synthesized antenna, resolving ability.