

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.11.28>

УДК: 621.396.96

ПОМЕХИ НЕОДНОЗНАЧНОСТИ СИГНАЛОВ КОСМИЧЕСКИХ РСА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КРУГЛОЙ ЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ

К.К. Храмов¹, В.В. Костров¹, В.П. Макаров²

¹Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
602264, Владимирская область, г. Муром, ул. Орловская, 23

²АО «Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина»
141402, Московская область, г. Химки, ул. Ленинградская, 24

Статья поступила в редакцию 25 ноября 2024 г.

Аннотация. В радиолокаторах с синтезированной апертурой антенны (РСА) достаточно широко используются гибридные зеркальные антенны. При этом форма диаграммы направленности антенны должна обеспечивать как однозначность измерения доплеровской частоты принимаемых сигналов по азимуту, так и требуемую полосу захвата в угломестной плоскости. Целью работы является оценивание уровня помех неоднозначности по азимуту и по дальности в РСА X-диапазона космического базирования, использующего круглую зеркальную антенну и работающего в режиме нормального бокового обзора. Рассмотрены причины возникновения помех неоднозначности по азимуту и дальности. Проведено моделирование проекции диаграммы направленности круглой антенны на поверхность Земли. Выполнены расчеты достижимого уровня помех неоднозначности по азимуту и по дальности для РСА X-диапазона, работающего в маршрутном режиме. Проведено сравнение полученных значений с аналогичными данными для прямоугольной плоской апертуры.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированной апертурой антенны, РСА космического базирования, помехи неоднозначности, неоднозначность по дальности, неоднозначность по азимуту, зеркальная антенна.

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 23-29-10114

Автор для переписки: Костров Виктор Васильевич, kostrov.46@mail.ru

Введение

Благодаря развитию цифровых технологий и их применению в радиолокаторах с синтезированной апертурой антенны (РСА) [1-3] появилось многообразие режимов съемки с использованием электронного сканирования луча антенны [4]. При этом в качестве основного и перспективного технического решения рассматриваются активные фазированные антенные решетки, однако гибридные зеркальные антенны также широко используются в РСА из-за простоты их конструкции и изготовления. В качестве примеров РСА космического базирования, в которых применяются гибридные зеркальные антенны, можно назвать малый космический аппарат (КА) X-диапазона TecSAR (производство Израиль), созданные на его основе Asnaro-2 (Япония) и RISAT II (Индия), отечественные малые КА серии «Кондор», немецкие спутники серии SAR-Lupe, а также аппараты SARah 2 и SARah 3 [5,6].

Как известно, вследствие движения космического аппарата относительно поверхности Земли возникает доплеровское смещение частоты, величина которого увеличивается при увеличении азимутального угла отклонения θ_x линии визирования от траверсной плоскости аппарата [3,4]. Периодический характер зондирующего сигнала приводит к дискретизации отраженного колебания по времени с частотой повторения F_n , спектр получаемого траекторного сигнала становится периодическим. При обработке такого сигнала из-за эффекта наложения спектров и сигналов с рекуррентных периодов могут возникать ложные изображения, которые проявляются в виде помех неоднозначности по азимуту и по дальности соответственно. Уровень

подавления пиков неоднозначности зависит в первую очередь от диаграммы направленности (ДН) реальной антенны и периода следования T_n зондирующих импульсов [4].

Рассмотрим сцену (рис. 1,а), содержащую носитель РСА – космический аппарат КА, движущийся с постоянной орбитальной скоростью V_0 и излучающий за время T_{ca} синтезирования апертуры N зондирующих импульсов. За один период излучения КА преодолевает расстояние Δ_s . Сигнал, отраженный от пространственного элемента разрешения, находящегося на расстоянии R_0 и принадлежащего траверсной плоскости, имеет нулевое доплеровское смещение частоты. При этом доплеровское смещение частоты сигнала, отраженного от элемента разрешения O , определяется радиальной скоростью V_r , которая представляет собой проекцию путевой скорости V_0 на линию визирования этой точки (на линию наклонной дальности R_n), длиной волны λ и углом наблюдения θ_n :

$$F_\delta(\alpha) = \frac{2V_r(\alpha)}{\lambda} = \frac{2V_0}{\lambda} \sin(\theta_n) \sin(\alpha),$$

где α – угол скоса (отклонение визирной плоскости от траверсной плоскости).

Ширина обрабатываемой части доплеровского спектра отраженного сигнала, определяемая азимутальной шириной ДН антенны по уровню минус 3 дБ ($\theta_{x-3\text{дБ}} = 2\alpha$), при боковом обзоре ($\theta_n = \pi/2$) рассчитывается по формуле $\Delta F_\delta = 4V_0 \sin(0,5\theta_{x-3\text{дБ}}) / \lambda$. Для передачи всего спектра доплеровских частот траекторного сигнала необходимо, чтобы частота повторения F_n зондирующих импульсов превышала значение ΔF_δ :

$$F_n \geq k_x \Delta F_\delta = k_x 2V_0 / D_x, \quad (1)$$

где $D_x = \lambda / \theta_{x-3\text{дБ}}$ – линейный размер антенны РСА в азимутальной плоскости; k_x – коэффициент запаса, обеспечивающий дополнительное подавление помех неоднозначности по азимуту [4].

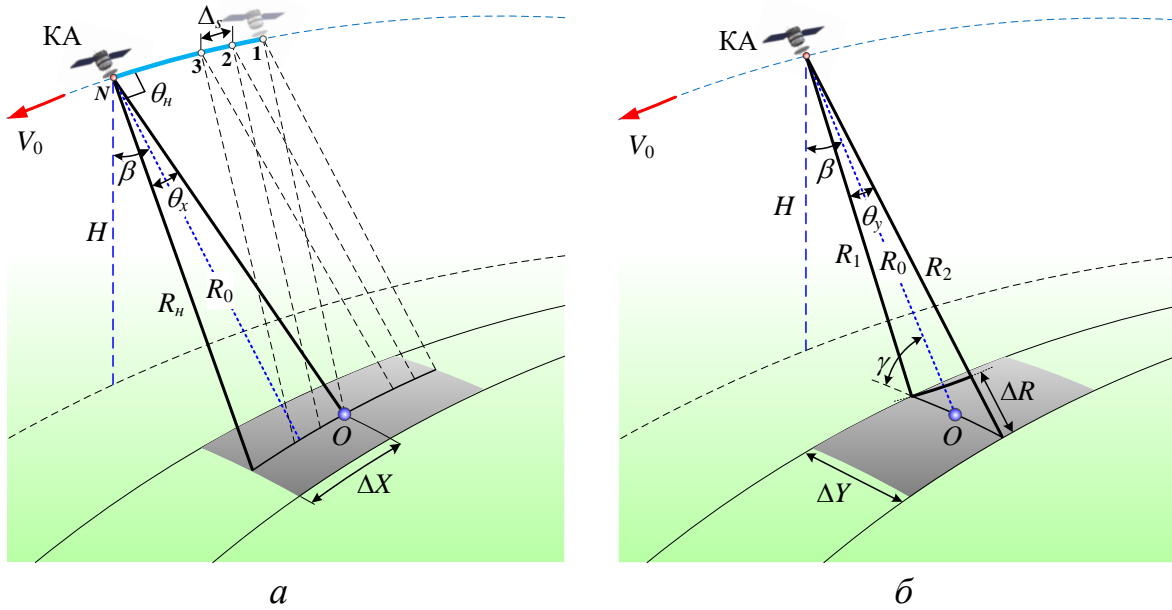


Рис. 1. Геометрия обзора в азимутальной (а) и угломестной (б) плоскостях при нормальном боковом обзоре.

Форма спектра доплеровских частот отраженного сигнала определяется формой диаграммы направленности антенны в азимутальной плоскости. Таким образом, в общем случае, чем уже ДН (больше размер антенны), тем меньше уровень помехового сигнала, принимаемого по боковым пикам функции неопределенности. Однако значительное увеличение размера антенны ограничивается трудностями ее размещения на носителе РЛС, что особенно актуально для малых КА [7,8]. Апертура антенны по азимуту определяет ширину ДН и, следовательно, максимальный размер синтезированной апертуры $\Delta X = \lambda R_n / (D_x \sin \theta_n)$, который, в свою очередь, определяет минимально возможный для маршрутного режима съемки размер элемента разрешения по азимуту [9]: $\delta_x = D_x / 2$.

Вместе с тем, при выборе частоты повторения зондирующих импульсов необходимо, чтобы длительность траекторного сигнала не превышала строб приемника T_{np} , т.е. выполнялись неравенства [10]:

$$\frac{k}{T_1 - \tau - \tau_2} \leq F_n \leq \frac{k+1}{T_1 + T_{np \min} + \tau_1}; \quad (2)$$

$$T_{np \min} \leq T_{np},$$

где τ – длительность зондирующего импульса; τ_1 и τ_2 – временные интервалы, предназначенные для переключения режимов «прием-передача» (ПР/ПД), положения луча в зоне обзора, а также режима поляризации; $T_{np \min}$ – минимальная длительность строба приёмника; T_1 – время задержки отраженного сигнала; $k = 1, 2, \dots, N_1$; N_1 – количество зондирующих импульсов, излученных за время T_1 .

Требуемая ширина луча в угломестной плоскости θ_y (рис. 1,б) должна удовлетворять двум условиям – обеспечению полосы захвата и отстройки от сигналов неоднозначности. Интервал неоднозначности по времени равен половине расстояния распространения радиоволн за период повторения T_n зондирующих импульсов: $R_n = cT_n/2$, где c – скорость света. Для подавления сигналов от соседних зон неоднозначности по дальности ширину угломестной ДН антенны необходимо выбирать таким образом, чтобы ее след ΔY на поверхности Земли был меньше расстояния $\Delta Y_R = R_n/\cos \gamma$, где γ – угол падения электромагнитной волны на участок съемки. В противном случае в строб приема будут попадать сигналы с нескольких интервалов дальности R_n . Очевидно, что размер следа луча антенны на поверхности Земли зависит от угла визирования β , поскольку изменяется наклонная дальность до района съёмки.

Целью работы является оценка уровня помех неоднозначности по азимуту и по дальности в РСА X-диапазона космического базирования, использующего круглую зеркальную антенну и работающего в режиме нормального бокового обзора.

1. Расчет проекции двумерной диаграммы направленности антенны

В качестве модели антенны возьмем апертуру в виде круглого зеркала радиусом $r = D/2$, где D – ее диаметр. Функция, описывающая нормированную диаграмму направленности антенны с круглой апертурой, может быть записана в виде:

$$G(\theta) = \pi r^2 \frac{2J_1(kr \sin \theta)}{kr \sin \theta},$$

где $J_1(\xi)$ – функция Бесселя первого рода первого порядка от аргумента ξ , $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; θ – угловая координата, отсчитываемая от нормали к апертуре.

Зададимся значениями основных параметров РСА, используемых для расчета уровня помех неоднозначности (таблица 1).

Таблица 1. Параметры РСА для расчетов.

Параметр	Значение
Высота орбиты космического аппарата, H , км	520
Длина волны зондирующего сигнала, λ , см	3,1
Угломестное положение максимума ДН, β_0 , градусы	40
Ширина луча ДН антенны, $\theta_{x-3\text{дБ}} = \theta_{y-3\text{дБ}} = \theta_{-3\text{дБ}}$, градусы	0,61
Зондирующий сигнал	ЛЧМ
Длительность зондирующих импульсов, τ , мкс	20
Длительность интервалов коммутации, $\tau_1 = \tau_2$, мкс	8

Для выбранной модели антенны с учетом значений таблицы 1 была рассчитана двумерная диаграмма направленности, угловая спутниковая проекция которой на поверхность Земли приведена на рис. 2.

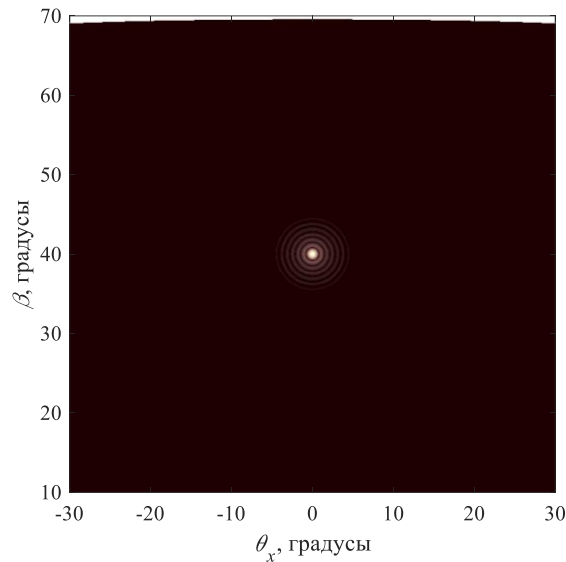


Рис. 2. Угловая спутниковая проекция диаграммы направленности круглой антенны на Земле при $\beta_0 = 40^\circ$, $\theta_{-3\text{дБ}} = 0,61^\circ$.

Боковые лепестки ДН антенны с круглой апертурой расположены в виде концентрических колец вокруг главного лепестка. При этом уровень первого бокового лепестка ДН составляет $PSLR = -17,57$ дБ, а относительный интегральный уровень боковых лепестков равен $ISLR = -13$ дБ. Аналогичные значения для антенны с прямоугольной апертурой равны, соответственно, минус 13,26 дБ и минус 7,24 дБ. Указанные особенности ДН антенны с круглой апертурой и ее параметры определяют специфику характеристик пространственной селекции радиолокатора, использующего такую антенну.

Переход от угловой спутниковой проекции к геоцентрической системе координат осуществлялся с использованием выражения (3), которое определяет наклонную дальность до точки обзора O (рис. 1):

$$R_n = \sqrt{R_{KA}^2 - 2R_{KA}R_3 \cos(\Delta\varphi)\cos(\Delta l) + R_3^2}, \quad (3)$$

где $R_{KA} = H + R_3$ – радиус орбиты КА; R_3 – радиус Земли; $\Delta\varphi$ – широта точки O ; Δl – разница долгот точки O и подспутниковой точки [11].

Последнее выражение позволяет выполнить пересчет проекции, приведенной на рис. 2, в географические координаты (рис. 3,а), где отображены области, уровень которых превышает значение минус 25 дБ относительно максимума ДН.

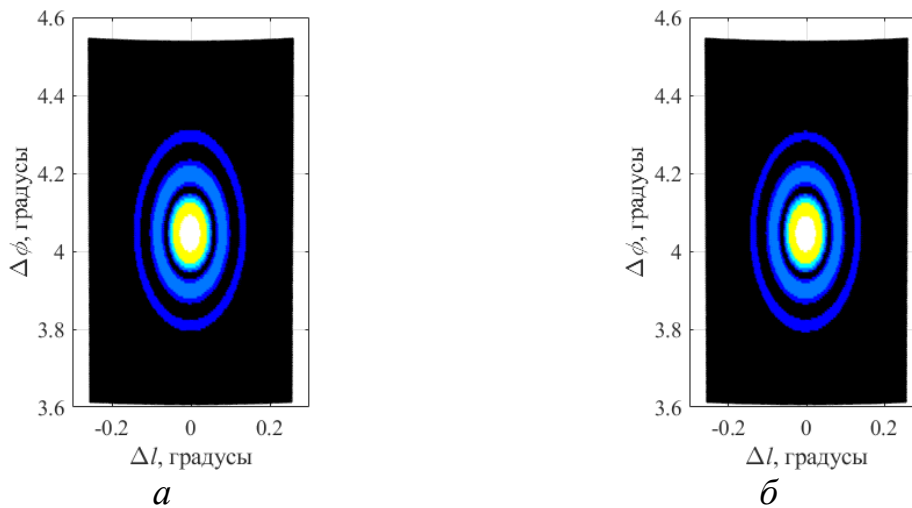


Рис. 3. Проекция двумерной ДН антенны на Земле (а) и относительные уровни мощности отраженного сигнала (б) в геоцентрической системе координат.

Из рис. 3 видно, что боковые лепестки ДН антенны, имеющие концентрическое расположение в плоскости (β, θ_x) , приобретают эллиптичность в плоскости $(\Delta\varphi, \Delta l)$. Относительные уровни мощности отраженного сигнала в геоцентрической системе координат приведены на рис. 3,б. Эта диаграмма иллюстрирует распределение энергии отраженного сигнала при изменении географической широты (угла визирования).

2. Помехи неоднозначности по азимуту

Азимутальная неоднозначность оценивается интегральным уровнем паразитных сигналов (отношение мощности сигналов неоднозначности к мощности сигнала в максимуме синтезированной ДН антенны), который зависит от полосы доплеровских частот, отношения частоты повторения к полосе доплеровских частот, а также от уровня боковых лепестков антенны по азимуту [4]:

$$A_x = \frac{\sum_n \left[\int_{F_{\delta 1} + nF_n}^{F_{\delta 2} + nF_n} G_x^2(F_\delta) dF_\delta \right]}{\int_{F_{\delta 1}}^{F_{\delta 2}} G_x^2(F_\delta) dF_\delta}, \quad (4)$$

где n – номер зоны неоднозначности; $F_{\partial 1}, F_{\partial 2}$ – пределы интегрирования при синтезе радиолокационного изображения (полоса обработки); $G_x(F_o) = G_x(\theta_x)$ – пересчет азимутальной формы ДН антенны по полю из угловой координаты к доплеровской частоте.

Фрагмент азимутальной ДН антенны как функция угла θ_x вместе с полосой обработки радиоголограммы и зонами неоднозначности $n = \pm 1$ показаны на рис. 4. На этом рисунке δ_x – азимутальное разрешение РСА, Δ_s – расстояние, преодолеваемое носителем РСА за один период излучения.

Уровни A_x помех неоднозначности по азимуту, рассчитанные по выражению (4) для антенны с круглой апертурой при изменении относительной частоты повторения импульсов $F_n / \Delta F_o$, приведены на рис. 5 (кривая 1).

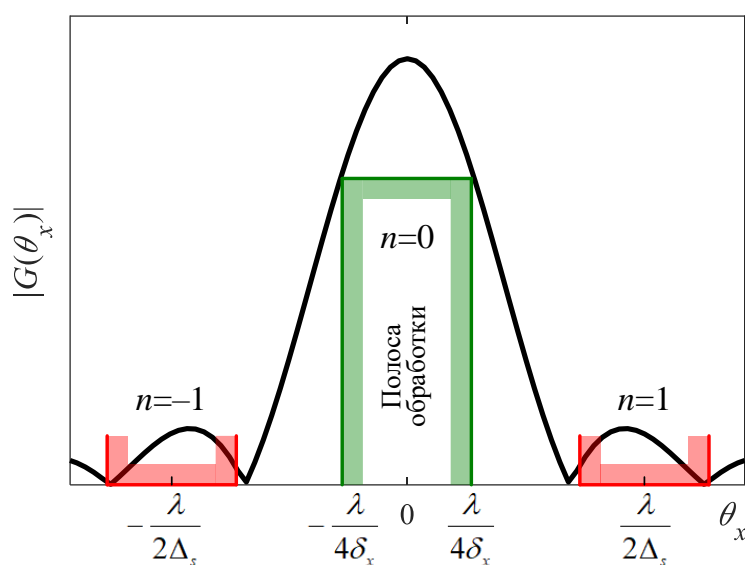


Рис. 4. Полоса обработки и зоны неоднозначности на азимутальной ДН антенны в угловых координатах.

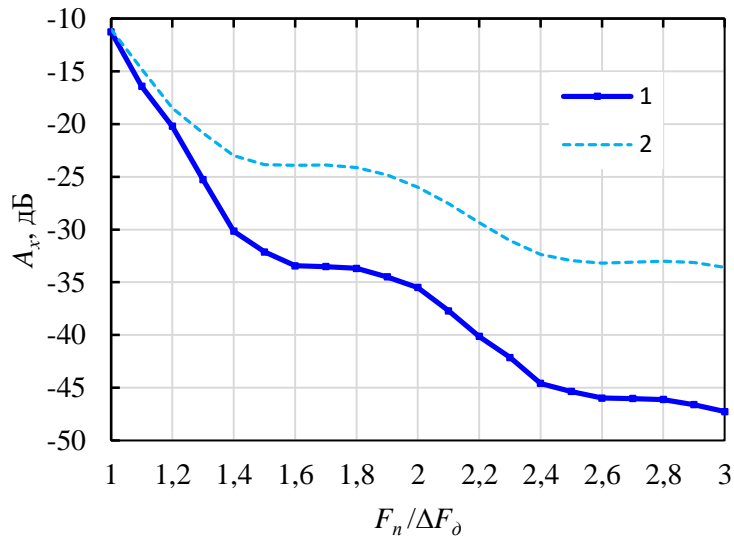


Рис. 5. Уровни неоднозначности по азимуту при изменении относительной частоты повторения импульсов.

Из этого рисунка следует, что уровень неоднозначности по азимуту имеет колебательный характер и монотонно падает с ростом $F_n/\Delta F_\delta$, достигая значения минус 35 дБ при $F_n/\Delta F_\delta = 2$. При значениях $0 < F_n/\Delta F_\delta < 1,4$ наблюдается наибольшая крутизна спада уровня азимутальной неоднозначности, а при бóльших значениях относительной частоты повторения импульсов зависимость является более полой. Такой характер функции $A_x(F_n/\Delta F_\delta)$ объясняется тем, что при $F_n/\Delta F_\delta < 1,4$ в зоны неоднозначности $n = \pm 1$ попадает энергия не только из первых боковых лепестков, но и из главного, что приводит к резкому увеличению уровня помех.

При практической реализации РСА предпочтительно выбирать минимально допустимое значение частоты повторения, поскольку этот параметр будет влиять на объем и скорость обработки данных. Как следует из рис. 5, ближайший локальный минимум уровня азимутальной неоднозначности, равный минус 33,5 дБ (что может считаться достаточным уровнем для большинства практических задач [4,12]), приходится на относительное значение частоты $F_n/\Delta F_\delta \approx 1,6$. Это означает, что наименьшая частота повторения импульсов, которую целесообразно реализовать в РСА с прямоугольной ФАР, примерно в 1,6 раза превышает полосу доплеровских частот.

Кривая 2 на рис. 5 соответствует уровням неоднозначности по азимуту для прямоугольной антенны с той же шириной $\theta_{x-3\text{дБ}}$ ДН в азимутальной плоскости. Очевидно, что уровень помех неоднозначности по азимуту при использовании антенны с круглой апертурой меньше, чем у прямоугольной плоской апертуры [13]. При $1,4 < F_n / \Delta F_\delta < 2$ выигрыш составляет 7...9 дБ. Такой характер зависимостей $A_x(F_n / \Delta F_\delta)$ обусловлен более низким уровнем боковых лепестков ДН антенны с круглой апертурой и более высокой скоростью их ослабления с ростом θ_x .

Выполним расчет уровня азимутальных помех в сечениях двумерной ДН (рис. 3,б) круглой антенны в азимутальной плоскости для различных относительных приращений угла визирования $\mathcal{G}_y = 2\Delta\beta / \theta_{-3\text{дБ}}$, где $\Delta\beta$ – абсолютное приращение угла визирования.

На рис. 6 приведены графики нормированной мощности отраженного сигнала $P(\theta_x)$ в азимутальной плоскости при $\mathcal{G}_y = 0$ ($\Delta\beta = 0$) и $\mathcal{G}_y = 1$ (сечение проходит по границе ширины ДН антенны). Из рисунка видно, что сечение по границе ширины ДН антенны ($\Delta\beta = \theta_{-3\text{дБ}}/2$) соответствует уменьшению вдвое мощности главного лепестка. При этом уровень боковых лепестков ДН антенны не меняется.

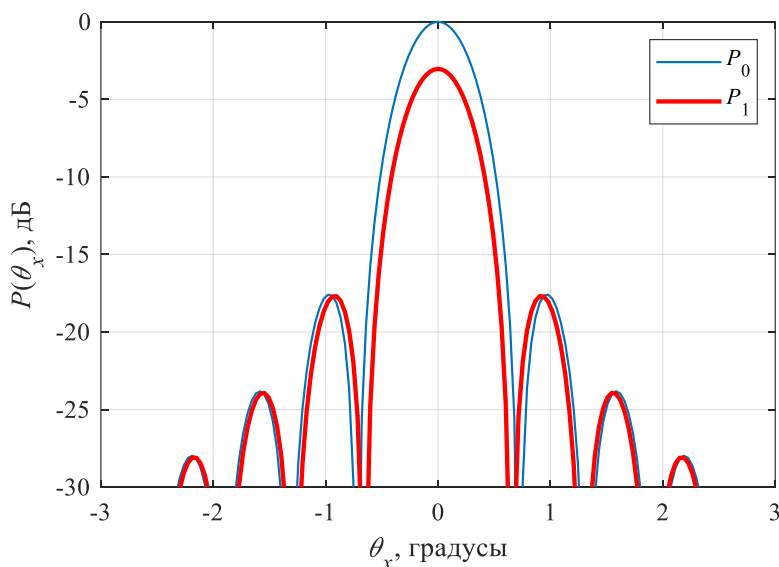


Рис. 6. Нормированные зависимости мощности отраженного сигнала в азимутальной плоскости в сечениях $\mathcal{G}_y = 0$ (график P_0) и $\mathcal{G}_y = 1$ (график P_1).

Рассчитанные уровни неоднозначности по азимуту A_x для сечений $\mathcal{G}_y = 0; 0,33; 0,67; 1$ при изменении относительной частоты повторения импульсов показаны на рис. 7. Из приведенного рисунка следует, что при $F_n/\Delta F_\delta < 1,3$ зависимости практически совпадают. При увеличении отношения $F_n/\Delta F_\delta$ помехи неоднозначности возрастают обратно пропорционально максимальному уровню мощности в сечении главного лепестка. При $\mathcal{G}_y = 1$ относительный уровень помех неоднозначности превышает на 5...7 дБ значение, полученное при $\mathcal{G}_y = 0$.

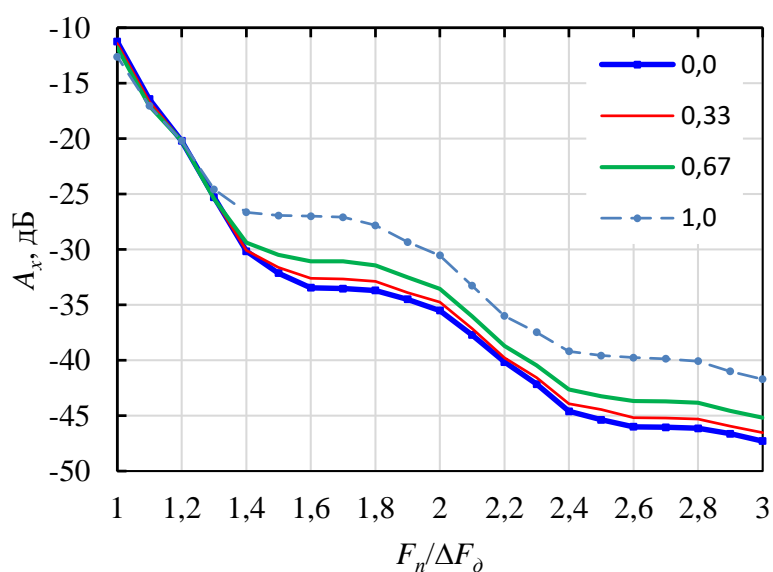


Рис. 7. Уровни неоднозначности по азимуту A_x для различных сечений \mathcal{G}_y при изменении нормированной частоты повторения $F_n/\Delta F_\delta$.

3. Помехи неоднозначности по дальности

В [4] неоднозначность по дальности (рекуррентные помехи) представляется как отношение мощностей ложных сигналов (для ближайших двух зон неоднозначности с номерами $n = \pm 1$) к мощности полезного сигнала для равномерного фона. Если рассматривать уровень помех неоднозначности в полосе обзора, то его можно представить как функцию угла визирования β :

$$A_y(\beta) = \frac{R_n^4}{G_y^2[\beta(R_n)]} \times \left\{ \frac{G_y^2[\beta(R_n + R_n)]}{(R_n + R_n)^4} + \frac{G_y^2[\beta(R_n - R_n)]}{(R_n - R_n)^4} \right\}, \quad (5)$$

где R_n – наклонная дальность, изменяющаяся в полосе обзора в диапазоне от R_1 до R_2 (рис. 1,б); $G_y(\beta)$ – коэффициент усиления антенны в направлении угла визирования β в угломестной плоскости; $(R_n + R_n)$ и $(R_n - R_n)$ – расстояния до целей, формирующих сигналы неоднозначности.

Используя (2), рассчитаем реализуемые при заданных в таблице 1 параметрах съемки значения частоты повторения импульсов [10]. Диапазоны допустимых при $\beta_0 = 40^\circ$ значений F_n приведены на рис. 8, где они выделены цветными полосами. На этом же графике обозначены предельные значения частоты повторения импульсов: $F_{n \min}$ и $F_{n \max}$.

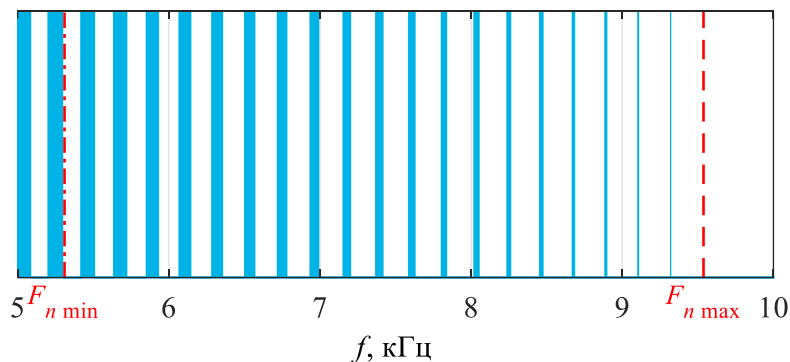


Рис. 8. Диаграмма распределения допустимых значений частоты повторения импульсов при $\beta_0 = 40^\circ$.

Построим сечение мощности отраженного сигнала (рис. 3,б) в угломестной плоскости $P(\beta)$ для азимутальной координаты $\theta_x = 0$ (рис. 9,а). При частоте $F_n = 5,46$ кГц определим положение основной области ($n = 0$) и ближайших зон неоднозначности по дальности с номерами $n = \pm 1$. Эти области обозначены на рис. 9,а темным фоном. Их протяженность вдоль оси абсцисс соответствуют длительности строба приемника T_{np} , пересчитанной в значение угла визирования β . Зазоры между зонами неоднозначности соответствуют интервалам зондирования и коммутации.

На рис. 9,б представлены зависимости $A_y(\beta)$ в основной области неоднозначности, рассчитанные с использованием выражения (5). Из этого рисунка следует, что уровень помех неоднозначности по дальности меняется в полосе обработки в пределах $A_y(\beta) = (-58...-47)$ дБ, т.е. его неравномерность составляет около 11 дБ. При этом интегральный уровень помех неоднозначности по дальности в полосе обработки для рассматриваемого угла визирования и частоты зондирования равен $A_{y0} = -54,5$ дБ. Асимметрия функции $A_y(\beta)$ в полосе обработки объясняется различной шириной ближайших зон неоднозначности.

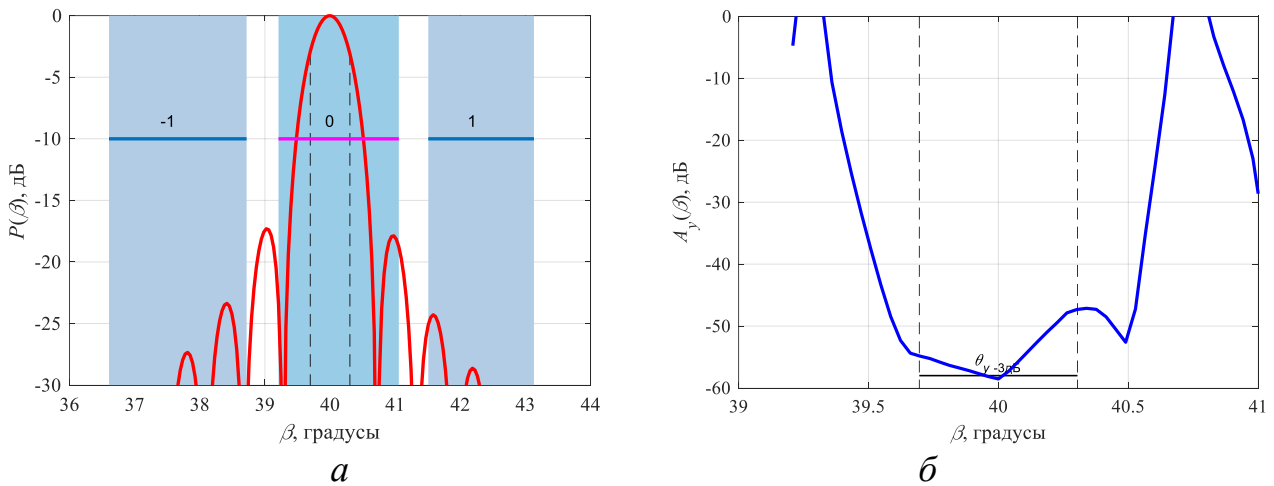


Рис. 9. График $P(\beta)$ с областями неоднозначности (а) и уровни помех неоднозначности по дальности в основной области (б) при $F_n = 5,46$ кГц.

Увеличение частоты повторения зондирующих импульсов приводит к уменьшению ширины смежных областей неоднозначности. На рис. 10,а приведены нормированные зависимости $P(\beta)$ и обозначены области неоднозначности, полученные при частоте зондирования $F_n = 7,39$ кГц. Соответствующие этой частоте зависимости $A_y(\beta)$ в основной области представлены на рис. 10,б. Неравномерность значений уровня неоднозначности в полосе обработки равна 9 дБ, а интегральный уровень помех стал выше и составляет $A_{y0} = -46$ дБ.

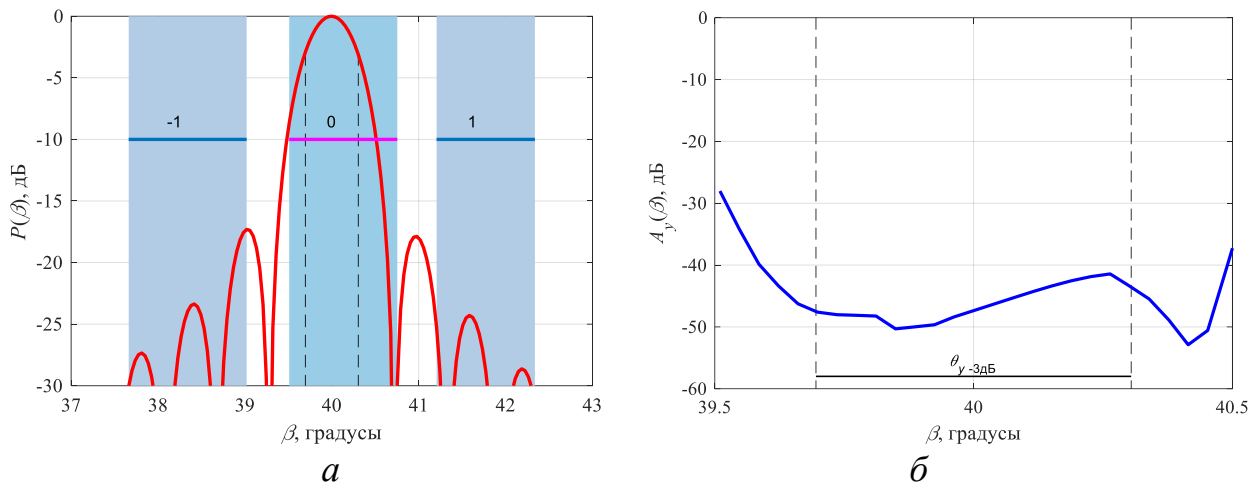


Рис. 10. График $P(\beta)$ с областями неоднозначности (а) и уровни помех неоднозначности по дальности в основной области (б) при $F_n = 7,39$ кГц.

На рис. 11 приведены аналогичные зависимости, полученные при максимально возможной для заданных параметров обзора частоте зондирования $F_n = 9,32$ кГц. Как следует из этого рисунка, минимально достижимый расчетный уровень помех неоднозначности находится ниже минус 60 дБ, а его максимальное значение в основной области равно $A_{y \max} = -28$ дБ. Такой разброс значений A_y обусловлен тем, что зоны неоднозначности с номерами $n = \pm 1$ попадают одновременно на нули и главный лепесток ДН антенны (рис. 11,а). При этом интегральный уровень помех неоднозначности в полосе обработки увеличился до значения $A_{y0} = -40,6$ дБ.

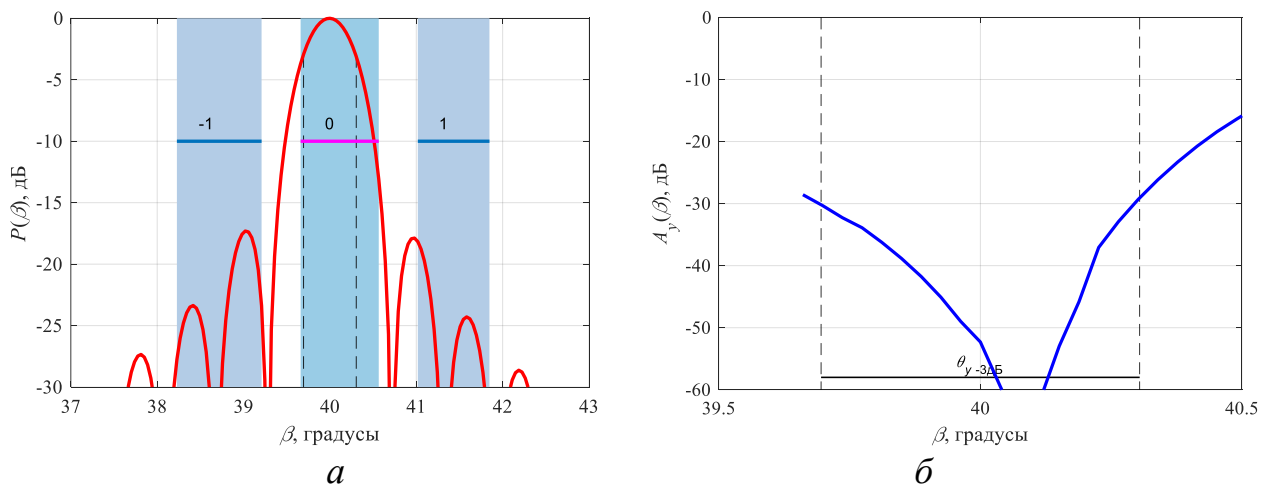


Рис. 11. График $P(\beta)$ с областями неоднозначности (а) и уровни помех неоднозначности по дальности в основной области (б) при $F_n = 9,32$ кГц.

На основании результатов моделирования была получена зависимость интегрального уровня помех неоднозначности по дальности для круглой зеркальной антенны при изменении частоты повторения импульсов для фиксированного угла визирования $\beta_0 = 40^\circ$ (рис. 12). Эта зависимость является дискретной. Ее значения определены только для допустимых F_n , которые приведены на диаграмме рис. 8. Функция $A_{y0}(F_n)$ имеет колебательный характер, аналогичный и обратный зависимости $A_x(F_n/\Delta F_\partial)$. Как следует из рис. 12 мощность помех неоднозначности по дальности возрастает при увеличении F_n и неизменном β_0 . Это вызвано сужением смежных зон неоднозначности и их смещением в область главного лепестка с ростом частоты повторения.

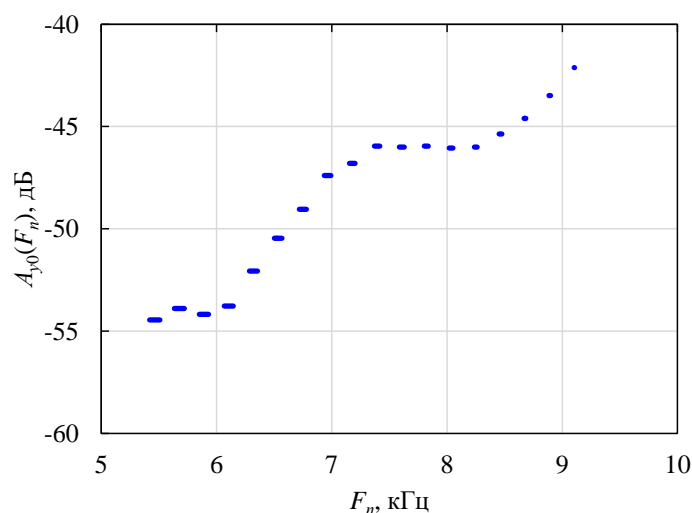


Рис. 12. Интегральный уровень помех неоднозначности по дальности в полосе обработки при изменении частоты повторения импульсов для $\beta_0 = 40^\circ$.

Сравнительный анализ полученных данных с результатами исследования прямоугольной апертуры [13], позволяет говорить о возможности достижения меньшего уровня помех неоднозначности по дальности при использовании антенны с круглой апертурой.

Заключение

Помехи неоднозначности сигналов космических РСА вызваны периодическим характером зондирующих импульсов и зависят от ширины и формы диаграммы направленности антенны по азимуту и углу места.

Уровень помех неоднозначности по азимуту при использовании антенны с круглой апертурой составляет $(-30\dots-35)$ дБ в диапазоне $1,4 < F_n / \Delta F_\theta < 2$, что меньше на $7\dots9$ дБ, чем при использовании прямоугольной плоской апертуры с той же шириной ДН. Интегральный уровень помех неоднозначности по дальности в полосе обработки при использовании антенны с круглой апертурой и угле визирования $\beta_0 = 40^\circ$ ниже на $10\dots15$ дБ, чем для прямоугольной плоской апертуры с той же шириной ДН. Эти особенности обусловлены более низким уровнем боковых лепестков ДН антенны с круглой апертурой и более высокой скоростью их спада при увеличении азимутального угла.

Увеличение частоты повторения импульсов при фиксированном угле визирования приводит к одновременному повышению уровня помех неоднозначности по дальности и уменьшению азимутальной неоднозначности. Рекуррентные помехи возрастают при увеличении угла визирования, а также при расширении ДН антенны в плоскости визирования.

Наименьшее значение частоты повторения импульсов, которое целесообразно реализовать в РСА при использовании антенны с круглой апертурой, примерно в 1,6 раза превышает полосу доплеровских частот.

Дополнительной мерой снижения мощности сигналов неоднозначности является формирование специального амплитудно-фазового распределения сигналов по апертуре антенны, позволяющего уменьшить уровень боковых лепестков ДН антенны.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 23-29-10114.

Литература

1. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / В.И. Антипов, В.Т. Горяинов, А.Н. Кулин, Е.Ф. Толстов [и др.]; под ред. В. Т. Горяинова. – Москва : Радио и связь, 1988. – 304 с.
2. Карпов О.А., Цветков О.Е., Вашкевич С.А. Оптимальные алгоритмы фильтрации сигналов в РСА: Цифровая обработка сигналов в РСА ; под ред. Е.Ф. Толстова. – Смоленск : Изд-во ВА ВПВО ВС РФ, 2005. – 232 с.
3. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений / Л.А. Школьный, Е.Ф. Толстов [и др.] – Москва : Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. – 531с.
4. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования ; под ред. В. С. Вербы. – Москва : Радиотехника, 2010. – 680 с.
5. Голов Н.А., Усачев В.А., Корянов В.В., Топорков А.Г. Перспективные технологии создания космического комплекса радиолокационного зондирования Земли на базе малых космических аппаратов и ракет-носителей легкого класса // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2019. – № 5(89). – 9 с. – <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2019-5-1881>.
6. Костров В.В., Ракитин А.В. Радиолокационный космический сегмент дистанционного зондирования Земли в 2023 году: состояние и перспективы развития // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2023. – № 4. – С. 11–31. – <https://doi.org/10.24412/2221-2574-2023-4-11-31>.
7. Храмов К.К., Костров В.В. Обеспечение чувствительности и радиометрического разрешения РСА X-диапазона на базе малых космических аппаратов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2022. – № 3. – С. 43–50. – <https://doi.org/10.24412/2221-2574-2022-3-43-50>.
8. Khramov K., Kostrov V. Achievable parameters of the X-band synthetic aperture radar based on small satellite // E3S Web of Conferences. – EDP Sciences. – 2023. – Т. 431. – С. 02026. – <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343102026>.

9. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли ; под ред. Г. С. Кондратенкова. – Москва : Радиотехника, 2005. – 368 с.
10. Храмов К.К., Смирнов М.С., Лагунов И.Р. Расчет геометрических и временных параметров циклограммы радиолокатора космического базирования с синтезированием апертуры на основе активной фазированной антенной решетки // Научные исследования: итоги и перспективы. – 2024. – Т. 5. – №1. – С.8–18. – <https://doi.org/10.21822/2713-220X-2024-5-1-8-18>.
11. Носов В.И. Обеспечение электромагнитной совместимости при частотно-территориальном планировании систем спутниковой связи с зональным обслуживанием : [монография]. – Новосибирск : СибГУТИ, 2016. – 252 с.
12. Карпов О.А., Рабочий А.Н., Толстов Е.Ф., Фёдоров В.С., Костров В.В. Проблемы неоднозначности в космических РСА и коды Голда // Всероссийские открытые Армандовские чтения [Электронный ресурс] : Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн / Материалы Всероссийской открытой научной конференции. – Муром : МИ ВлГУ. – 2023. – С. 375–384. – <https://doi.org/10.24412/2304-0297-2023-1-375-384>.
13. Петров А.С., Прилуцкий А.А., Волченков А.С. Угломестная и азимутальная неоднозначности сигнала, принимаемого аппаратурой космического радиолокатора с синтезированной апертурой // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. – 2019. – № 1. – С. 39–47.

Для цитирования:

Храмов К.К., Костров В.В., Макаров В.П. Помехи неоднозначности сигналов космических РСА при использовании круглой зеркальной антенны. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.11.28>