

Оценка уровня помех неоднозначности по дальности в РСА космического базирования

К. К. Храмов

Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых

hramovkk@gmail.com

М. С. Смирнов

Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых

micas_2001@mail.ru

Аннотация. Для радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны на базе малых космических аппаратов проблема возникновения неоднозначности по дальности является актуальной. В работе рассматриваются причины возникновения помех неоднозначности по дальности, выполняется расчет их уровня в полосе обзора, формулируются требования по снижению уровня помех неоднозначности.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированной апертурой антенны; РСА космического базирования; помехи неоднозначности; неоднозначность по дальности

I. ВЕДЕНИЕ

Как известно, периодическая структура зондирующего сигнала в радиолокационных системах приводит к неоднозначности по дальности, которая вызвана тем, что в строб приема могут приходить сигналы, отраженные целями не только от текущего зондирующего импульса, но и от предыдущих и также от более поздних периодов зондирования [1–3]. Сложность проблемы для космических радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны (РСА) заключается в том, что для передачи спектра доплеровских частот приходится выбирать период повторения много меньше времени задержки отраженного сигнала. Это приводит к тому, что интервал неоднозначности по времени равен половине расстояния распространения радиоволн за длительность периода повторения T_n зондирующих импульсов: $R_n = cT_n/2$, где c – скорость света.

Основным временным параметром съемки является частота повторения зондирующих импульсов F_n , которая обратно пропорциональна периоду повторения зондирующих импульсов $T_n = 1/F_n$ [4].

Рассмотрим временные диаграммы работы РСА (рис. 1). Здесь обозначены: τ – длительность зондирующего импульса; T_{np} – длительность строба приёмника; $T_{np \min}$ – минимальная длительность строба приёмника; T_1 – время задержки отраженного сигнала. В каждом цикле зондирования предусматриваются временные интервалы τ_1 и τ_2 , предназначенные для переключения режимов «прием-передача» (ПР/ПД), положения луча в зоне обзора, а также режима поляризации.

Из приведенных на рис. 1 временных диаграмм следует, что при выборе частоты (периода) повторения зондирующих импульсов необходимо, чтобы

отраженный от Земной поверхности сигнал длительностью $T_{np \min}$ не превышал длительность строба приемника T_{np} , т. е. выполнялись ограничения (с учетом интервала T_1):

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

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

где $k = 1, 2, \dots, N_1$; N_1 – количество зондирующих импульсов, излученных за время T_1 .

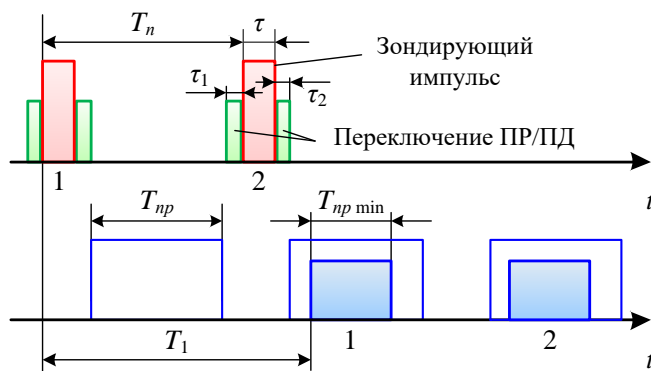


Рис. 1. Временные диаграммы работы РСА

Другим фактором, влияющим на уровень помех неоднозначности по дальности, является ширина луча θ_y диаграммы направленности (ДН) антенны в угломестной плоскости. Требуемая ширина луча по углу места должна удовлетворять двум условиям – обеспечению полосы захвата и отстройки от сигналов неоднозначности. Следует отметить, что размер следа луча антенны на поверхности Земли (рис. 2) зависит от угла визирования β , поскольку изменяется наклонная дальность до района съёмки. Наиболее сильно эта зависимость проявляется по угломестной координате, поскольку дополнительно изменяется угол γ падения электромагнитной волны на участок съемки. Геометрические соотношения, связывающие полосу захвата ΔY , рекуррентную дальность R_n и ширину θ_y ДН антенны в угломестной плоскости, могут быть получены непосредственно из построений на рис. 2.

Для подавления сигналов от соседних зон неоднозначности ширину угломестной ДН антенны необходимо выбирать таким образом, чтобы ее след ΔY на поверхности Земли был меньше расстояния по Земле между точками пересечения соседних окружностей с

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

Переход от угловой спутниковой проекции к геоцентрической системе координат осуществлялся с использованием построений рис. 4. Наклонная дальность до точки обзора А определяется выражением [9]

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

где R_3 – радиус Земли; R_{KA} – радиус орбиты КА; $\Delta\varphi$ – широта точки А; $\Delta\alpha$ – разница долгот точки А и подспутниковой точки.

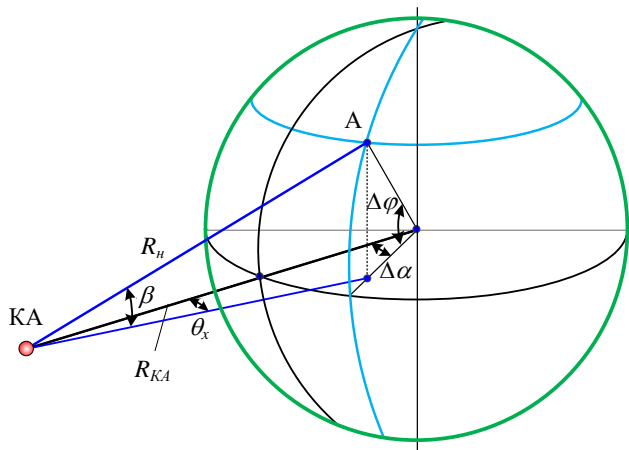


Рис. 4. Система координат, связанная с космическим аппаратом

Используя последнее выражение, выполним пересчет прямоугольного фрагмента ДН, выделенного на рис. 3, в географические координаты (рис. 5а). Из этого рисунка видно, что вследствие кривизны Земли боковые лепестки ДН антенны, имеющие симметричное расположение в плоскости $G_y(\beta)$, имеют характерную вытянутость в плоскости $G_y(\Delta\varphi)$. Этот эффект возрастает при увеличении относительного значения географической широты.

Для определения мощности отраженного сигнала, как функции угла визирования с учетом огибающей ДН антенны, воспользуемся одной из форм записи основного уравнения радиолокации для однопозиционной радиолокационной системы [5]:

$$R = 4 \sqrt{\frac{P_u G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 P_{np} L}}, \quad (4)$$

где R – дальность до цели; P_u – излучаемая мощность; P_{np} – принимаемая мощность; G – коэффициент усиления антенны; L – коэффициент потерь; σ – эффективная поверхность рассеяния цели.

С учетом того, что коэффициент G определяет направленные свойства антенны, из уравнения (4) можно получить искомую мощность:

$$P(\beta, \theta_x) = K \frac{G_y^2(\beta, \theta_x)}{R_n^4(\beta, \theta_x)}, \quad (5)$$

где коэффициент K включает в себя остальные параметры уравнения (4), которые можно считать постоянными.

Используя выражения (3) и (5), были рассчитаны относительные уровни мощности отраженного сигнала в геоцентрической системе координат (рис. 5б). Полученная диаграмма наглядно иллюстрирует перераспределение энергии отраженного сигнала при изменении географической широты (угла визирования) плоскости обзора.

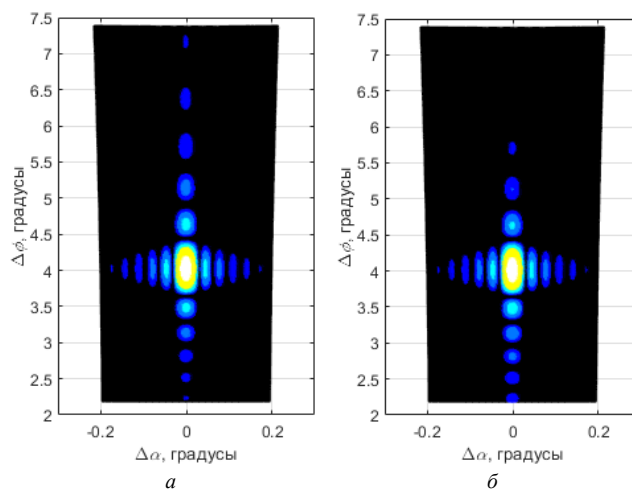


Рис. 5. Проекция двумерной ДН антенны на Земле (а) и относительные уровни мощности отраженного сигнала (б) в геоцентрической системе координат

С. Расчет уровня помех неоднозначности по дальности

Для расчета уровня помех неоднозначности по дальности, прежде всего, построим сечение функции $P(\beta, \theta_x)$ в угломестной плоскости, соответствующее азимутальной координате $\theta_x = 0$ (рис. 6).

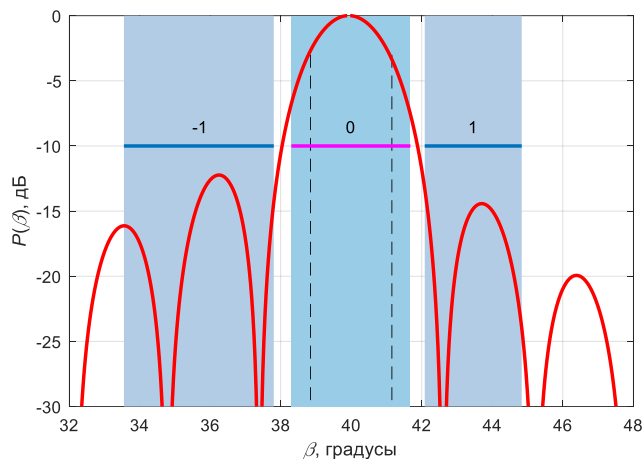


Рис. 6. Нормированная зависимость $P(\beta)$ и области неоднозначности при $F_n = 3,32$ кГц

Используя условия (1), рассчитаем допустимое для заданных параметров съемки значение частоты повторения импульсов $F_n = 3,32$ кГц [4]. Для полученного значения F_n определим ширину ближайших зон неоднозначности по дальности с номерами $n = \pm 1$ и ширину основной области $n = 0$. Границы этих областей обозначены на рис. 6 темным фоном. Их протяженность вдоль оси абсцисс соответствуют длительности строка приемника T_{np} , пересчитанной в значение угла визирования β . Интервалы между зонами неоднозначности соответствуют моментам зондирования и коммутации (рис. 1). Очевидно, что зоны

неоднозначности $n=\pm 1$, которые соответствуют предыдущему и следующему периодам зондирования, располагаются по обе стороны от основной области. При этом следует обратить внимание на асимметричное расположение и различную ширину этих зон: с увеличением угла визирования ширина зоны неоднозначности уменьшается. Это связано с тем, что ширина полосы на поверхности Земли ΔY_R , соответствующая рекуррентной дальности R_n , обратно пропорциональна косинусу угла падения γ волны на область съемки (рис. 2) $\Delta Y_R = R_n / \cos \gamma$, который уменьшается при увеличении угла визирования.

Выполним с использованием выражения (2) расчет уровней помех неоднозначности по дальности для построений рис. 6. На рис. 7 представлены зависимости $A_y(\beta)$ в основной области неоднозначности $\beta = 38,3^\circ \dots 41,7^\circ$ при ширине ДН антенны в угломестной плоскости $\theta_{y-3дБ} = 2,3^\circ$. Из этого рисунка следует, что уровень помех неоднозначности по дальности меняется в полосе обработки в пределах $A_y(\beta) = (-23 \dots -9)$ дБ, т. е. его неравномерность составляет около 14 дБ. Уровень неоднозначности по дальности при угле визирования $\beta_0 = 40^\circ$ составляет $A_{y-3дБ}(\beta_0) = -11,5$ дБ. Также заметим, что при рассматриваемых параметрах функция неоднозначности в полосе обработки имеет два локальных минимума. Это обусловлено тем, что значению β_0 соответствует рекуррентная дальность, практически совпадающая с максимумами первых боковых лепестков ДН антенны (рис. 6). Асимметрия функций $A_y(\beta)$ в полосе обработки объясняется различной шириной ближайших зон неоднозначности.

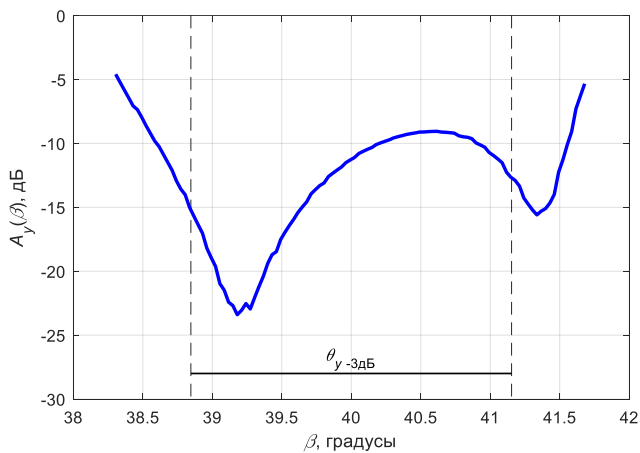


Рис. 7. Уровни помех неоднозначности по дальности в основной области $n=0$ при $F_n = 3,32$ кГц

Увеличение частоты повторения зондирующих импульсов приводит к уменьшению ширины смежных областей неоднозначности. На рис. 8 приведены нормированные зависимости $P(\beta)$ и области неоднозначности, полученные при $F_n = 4,61$ кГц. В данном случае ширина основной зоны неоднозначности равна ширине ДН антенны. Соответствующие этой частоте зависимости $A_y(\beta)$ в основной области неоднозначности представлены на рис. 9. Несмотря на то, что минимальное значение уровня неоднозначности составляет $A_{y \min} = -25$ дБ, на краях основной области это значение возрастает до $A_{y \max} = -2$ дБ, что является недопустимо низким уровнем [3]. Также наблюдается асимметрия функции $A_y(\beta)$ относительно значения β_0 .

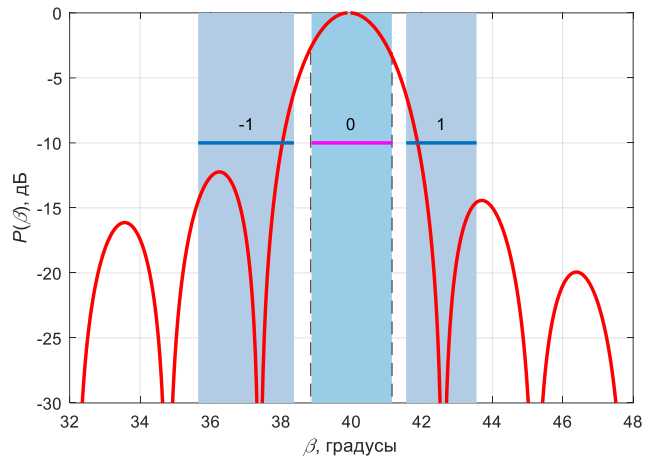


Рис. 8. Нормированная зависимость $P(\beta)$ и области неоднозначности при $F_n = 4,61$ кГц

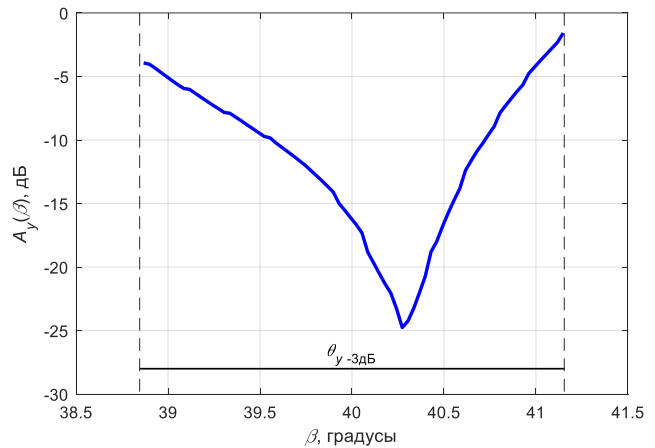


Рис. 9. Уровни помех неоднозначности по дальности в основной области $n=0$ при $F_n = 4,61$ кГц

При дальнейшем увеличении частоты зондирующих импульсов до значения $F_n = 5,47$ кГц взаимное расположение зависимости $P(\beta)$ и областей неоднозначности $n = -1, 0, +1$ имеет вид, приведенный на рис. 10. Из рисунка видно, что ширина ДН антенны превышает длительность строка приемника, поэтому при рассматриваемых параметрах РСА и заданной частоте траекторный сигнал, отраженный от краев полосы обзора, не может быть принят и обработан.

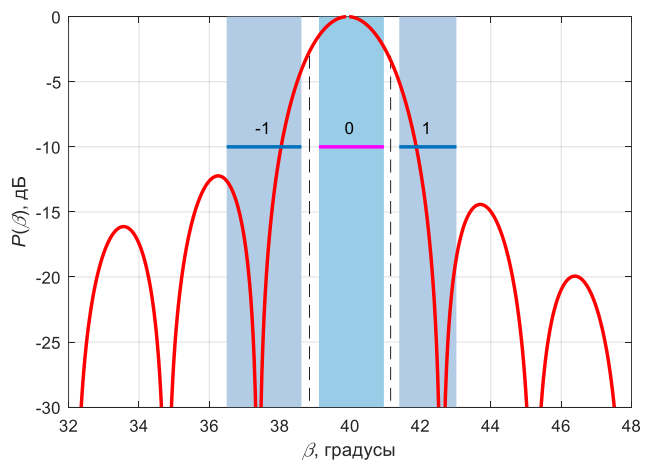


Рис. 10. Нормированная зависимость $P(\beta)$ и области неоднозначности при $F_n = 5,47$ кГц

Зависимости $A_y(\beta)$ в основной области неоднозначности при $F_n=5,47$ кГц представлены на рис. 11. Минимально достижимый уровень помех неоднозначности составляет $A_{y \min}=-15,5$ дБ, а его значения в основной области меняются в диапазоне $A_y(\beta)=(-15,5 \dots -1)$ дБ. Такие высокие значения A_y обусловлены тем, что зоны неоднозначности с номерами $n=\pm 1$ в значительной степени попадают на главный лепесток ДН антенны (рис. 10).

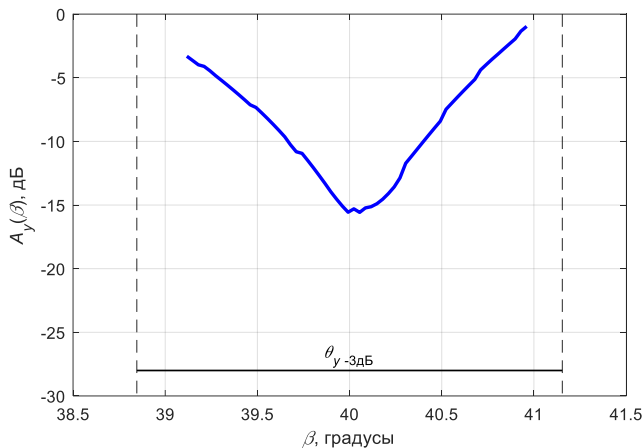


Рис. 11. Уровни помех неоднозначности по дальности в основной области $n=0$ при $F_n=5,47$ кГц

Таким образом, в работе были рассчитаны проекции ДН прямоугольной антенны на Землю и уровни помех неоднозначности по дальности в полосе обзора для параметров съемки, соответствующих РСА X-диапазона на базе малых космических аппаратов. Приведены зависимости $A_y(\beta)$ при изменении частоты повторения импульсов. Полученные результаты позволяют предъявить требования к уровню дополнительного подавления помех неоднозначности по дальности в РСА космического базирования.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в работе результаты позволяют сделать ряд выводов:

- уровень помех неоднозначности по дальности зависит от уровня боковых лепестки ДН антенны в угломестной плоскости, попадающих в зоны неоднозначности;
- боковые лепестки ДН антенны, соответствующие угломестным значениям $\beta > \beta_0$, вносят меньший (на 3...5 дБ) вклад в уровень помех неоднозначности, чем лепестки в области $\beta < \beta_0$;
- увеличение частоты повторения импульсов приводит к сужению зон неоднозначности по дальности и повышению уровня помех неоднозначности;

- частота повторения зондирующих импульсов должна выбираться таким образом, чтобы основная область неоднозначности по угломестной координате перекрывала ширину ДН антенны;
- при уменьшении частоты повторения зондирующих импульсов зависимость $A_y(\beta)$ в полосе обзора имеет более равномерный характер;
- расширение ДН антенны в плоскости визирования вызывает увеличение рекуррентных помех;
- помехи неоднозначности проявляются сильнее при увеличении угла визирования;
- максимальное подавление помех неоднозначности по дальности наблюдается, когда рекуррентная дальность, пересчитанная в угловые координаты, будет соответствовать нулям диаграммы направленности (пространственная селекция помех).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / Под ред. В.С. Вербы. М.: Радиотехника, 2010. 680 с.
- [2] Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли / Под ред. Г.С. Кондратенкова. М.: Радиотехника, 2005. 368 с: ил.
- [3] Груздов В.В., Колковский Ю.В., Криштопов А.В., Кудря А.И. Новые технологии дистанционного зондирования Земли из космоса. М.: Техносфера, 2019. 482 с.
- [4] Храмов К.К., Смирнов М.С., Лагунов И.Р. Расчет допустимых значений частоты повторения импульсов для РСА космического базирования на основе АФАР // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии: сборник трудов XX Международной научно-практической конференции / Под. ред. С.У. Увайсова. Москва: Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА им. проф. Жуковского, 2023. С. 471-476.
- [5] Khramov K.K., Kostrov V.V. Achievable parameters of the X-band synthetic aperture radar based on small satellite, E3S Web Conf., 431 (2023) 02026. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343102026>
- [6] 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. DOI: 10.24412/2304-0297-2023-1-375-384
- [7] Wang H., Zhang Y., Xu J., Liao G., Zeng C. A novel range ambiguity resolving approach for high-resolution and wide-swath SAR imaging utilizing space-pulse phase coding, Signal Processing 168 (2020) 107323, <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2019.107323>
- [8] Wen X., Qiu X., Han B., Ding C., Lei B., Chen Q. A Range Ambiguity Suppression Processing Method for Spaceborne SAR with Up and Down Chirp Modulation, Sensors 2018, 18, 1454; Pp.1-15. DOI:10.3390/s18051454
- [9] Носов В.И. Обеспечение электромагнитной совместимости при частотно-территориальном планировании систем спутниковой связи с зональным обслуживанием: Монография. Новосибирск, СибГУТИ. 2016 г. 252 с.