

## **Оценка азимутальной неоднозначности в РСА космического базирования при использовании круглой зеркальной антенны**

К.К. Храмов<sup>1</sup>, В.П. Макаров<sup>2</sup>, В.В. Костров<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> *Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых*  
602264, Владимирская обл., г. Муром, ул. Орловская, 23  
E-mail: hramovkk@gmail.com, kostrov.46@mail.ru

<sup>2</sup> *АО «НПО Лавочкина»*  
141402, Московская область, г. Химки, ул. Ленинградская, д. 24,  
E-mail: makarov951vyacheslav@yandex.ru

<sup>3</sup> *АО «НИИ «Субмикрон»*  
124498, Российская Федерация, г. Москва, Зеленоград, Георгиевский просп., д. 5, стр. 2.  
E-mail: vvk\_2004@rambler.ru

*Рассмотрен вопрос оценки неоднозначности по азимуту в радиолокаторах с синтезированием апертуры (РСА) космического базирования, использующих круглую зеркальную антенну. Проанализированы причины возникновения азимутальной неоднозначности. Выполнены расчеты проекции диаграммы направленности круглой антенны и достижимого уровня помех неоднозначности по азимуту для РСА X-диапазона, работающего в маршрутном режиме обзора. Проведено сравнение полученных значений с аналогичными данными для прямоугольной плоской апертуры.*

*Ключевые слова: радиолокатор с синтезированием апертуры (РСА), РСА космического базирования, помехи неоднозначности, азимутальная неоднозначность, антенна.*

## **Estimation of azimuth ambiguity of space-borne SAR using a circular mirror antenna**

К.К. Khramov<sup>1</sup>, V.P. Makarov<sup>2</sup>, V.V. Kostrov<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> *Murom Institute of Vladimir State University*

<sup>2</sup> *JSC Lavochkin Association*

<sup>3</sup> *JSC Research Institute Submicron*

*The issue of azimuth ambiguity estimation in space-borne synthetic aperture radar (SAR) using a circular dish antenna is considered. The reasons for the occurrence of azimuth ambiguity are analyzed. Calculations have been made of the projection of the radiation pattern of a circular antenna and the achievable azimuth ambiguity of X-band SAR operating in strip mode. The obtained values are compared with similar data for a rectangular aperture.*

*Key words: synthetic aperture radar (SAR), space-borne SAR, ambiguity, azimuth ambiguity, antenna.*

### **Введение**

Зеркальные антенны достаточно широко используются в радиолокационных устройствах, в том числе радиолокаторах с синтезированной апертурой антенны (РСА), из-за простоты их конструкции и изготовления. В качестве примеров космических аппаратов (КА) с РСА, в которых применяются гибридные зеркальные антенны, можно привести малый КА X-диапазона TecSAR (производство Израиль), созданные на его основе Asnago-2 (Япония) и RISAT II (Индия), отечественные малые КА серии «Кондор», китайский КА HJ-1C, немецкие спутники серии SAR-Lupe, а также аппараты SARah 2 и SARah 3 [1].



Согласно теореме В.А. Котельникова для передачи всего спектра доплеровских частот траекторного сигнала необходимо, чтобы частота повторения  $F_n$  зондирующих импульсов превышала значение  $\Delta F_\delta$ :

$$F_n \geq k_x \Delta F_\delta = k_x 2V_0/D_x, \quad (3)$$

где  $\Delta F_\delta = 2V_0/D_x$  – полоса доплеровских частот, определяемая диаграммой направленности реальной антенны РСА;

$D_x$  – линейный размер антенны РСА в азимутальной плоскости;

$k_x = 1,3 \dots 1,5$  – коэффициент избыточной дискретизации (передискретизации), обеспечивающий дополнительное подавление помех неоднозначности по азимуту [3].

С учетом сказанного, минимально допустимое значение частоты повторения зондирующих импульсов соответствует условию:

$$F_{n \min} = 2,8V_0/D_x. \quad (4)$$

В приведенном выражении положено  $k_x = 1,4$ , что формирует запас по частоте дискретизации для обеспечения коэффициента подавления помех неоднозначности по азимуту не менее 20 дБ [2]. Из последнего равенства также следует, что минимально допустимая частота повторения импульсов РСА не зависит от длины волны зондирующего сигнала.

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 [4, 5]. При этом увеличение азимутального размера антенны ограничивается не только возможностью ее размещения на носителе, но и другими факторами. Апертура антенны по азимуту определяет ширину ДН и, следовательно, максимальный размер синтезированной апертуры  $\Delta X = \theta_x R_n / \sin \theta_n = \lambda R_n / (D_x \sin \theta_n)$ , который, в свою очередь, определяет минимально возможный для маршрутного режима съемки размер элемента разрешения по азимуту [6]:  $\delta_x = \lambda R_n / (2\Delta X \sin \theta_n) = D_x / 2$ .

### Азимутальная неоднозначность

Азимутальная неоднозначность оценивается интегральным уровнем паразитных сигналов (отношение мощности сигналов неоднозначности к мощности сигнала в максимуме синтезированной ДН антенны) [3], который зависит от полосы доплеровских частот, используемой для синтеза радиолокационного изображения (РЛИ), отношения частоты повторения к полосе доплеровских частот, а также от уровня боковых лепестков антенны РСА по азимуту:

$$A_x = \frac{\int_{F_{\delta 1} + F_n}^{F_{\delta 2} + F_n} G_x^2(F_\delta) dF_\delta + \int_{F_{\delta 2} - F_n}^{F_{\delta 1} - F_n} G_x^2(F_\delta) dF_\delta}{\int_{F_{\delta 1}}^{F_{\delta 2}} G_x^2(F_\delta) dF_\delta}, \quad (5)$$

где  $\Delta F_\delta = F_{\delta 2} - F_{\delta 1}$  – полоса доплеровских частот, используемая для синтеза РЛИ (полоса обработки);

$G_x(F_\delta)$  – азимутальная форма ДН антенны, пересчитанная из угловой координаты  $\alpha$  к доплеровской частоте.

Если в качестве антенны РСА используется зеркальная антенна в виде круглой апертуры радиусом  $r$ , то функция, описывающая ее нормированную азимутальную

диаграмму направленности при равномерном распределении амплитуд сигнала, может быть записана в виде:

$$G_z(\theta_x) = \pi r^2 \frac{2J_1(kr \sin \theta_x)}{kr \sin \theta_x}, \quad (6)$$

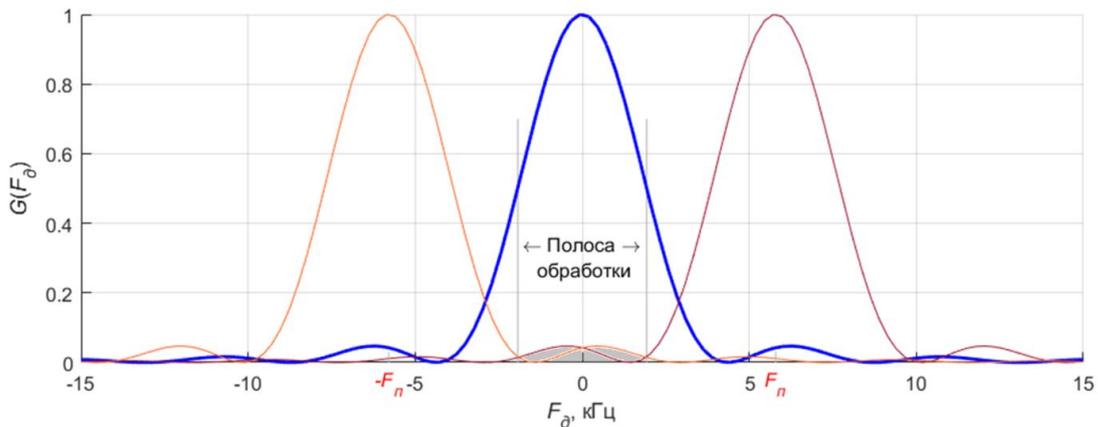
где  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число;

$J_1(m)$  – функция Бесселя первого рода первого порядка от аргумента  $m$ .

Зададимся значениями основных параметров РСА космического базирования для расчета (таблица 1) [1-2, 4-5, 7]. Полученная нормированная азимутальная диаграмма направленности антенны как функция доплеровской частоты  $G_x(F_\delta)$ , соответствующая параметрам таблицы 1, приведена на рис. 2 и обозначена жирной линией. Копии спектра с центральными частотами, равными  $\pm F_n$ , являются результатом дискретизации функции  $G_x(F_\delta)$  с частотой повторения зондирующих импульсов  $F_n$ . Заштрихованная область на рис. 2 шириной  $[F_n - \Delta F_\delta/2; F_n + \Delta F_\delta/2]$  соответствует энергии этих зависимостей, которая попадает в полосу обработки сигналов и определяет азимутальную неоднозначность [3, 6].

**Таблица 1. Исходные параметры РСА для расчета**

Параметр	Значение
Высота орбиты КА, $H$ , км	550
Длина волны зондирующего сигнала, $\lambda$ , см	3,14
Угол визирования, $\beta_0$ , градусы	45
Ширина луча ДН, $\theta_x$ , градусы	0,62
Длительность зондирующих импульсов, $\tau$ , мкс	20
Длительность интервалов коммутации, $\tau_1 = \tau_2$ , мкс	5



**Рис. 2. Азимутальное сечение нормированной ДН антенны как функция доплеровской частоты и копии спектра при  $F_n/\Delta F_\delta = 1,5$**

Значение уровня азимутальной неоднозначности РСА, рассчитанное по выражению (1) для относительной частоты повторения импульсов  $F_n = 1,5 \Delta F_\delta$ , составляет  $A_x = -32$  дБ, что может считаться достаточным уровнем для большинства практических задач [2, 4, 8].

### **Расчет проекции двумерной диаграммы направленности круглой антенны**

Для антенны с круглой апертурой была рассчитана двумерная диаграмма направленности, угловая спутниковая проекция которой на поверхность Земли приведена на рис. 3 для  $\theta_{-3\text{дБ}} = 0,62^\circ$ .

Для перехода от угловой спутниковой проекции к геоцентрической системе координат используем выражение для наклонной дальности до точки обзора [9]:

$$R_n = \sqrt{R_{КА}^2 - 2R_{КА}R_3 \cos(\Delta\varphi)\cos(\Delta l) + R_3^2}, \quad (7)$$

где  $R_3$  – радиус Земли;

$R_{КА}$  – радиус орбиты КА;

$\Delta\varphi$  – относительная широта точки обзора;

$\Delta l$  – разница долгот точки обзора и подспутниковой точки.

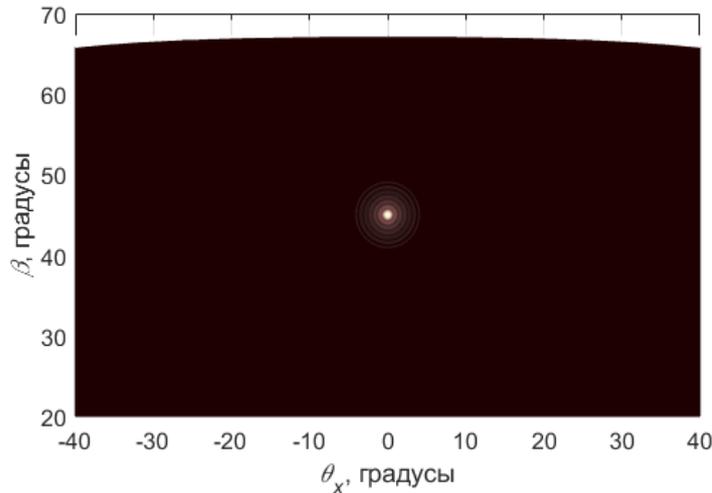


Рис. 3. Угловая спутниковая проекция двумерной ДН круглой антенны на Землю при  $\beta_0 = 45^\circ$ ,  $\theta_{-3дБ} = 0,62^\circ$

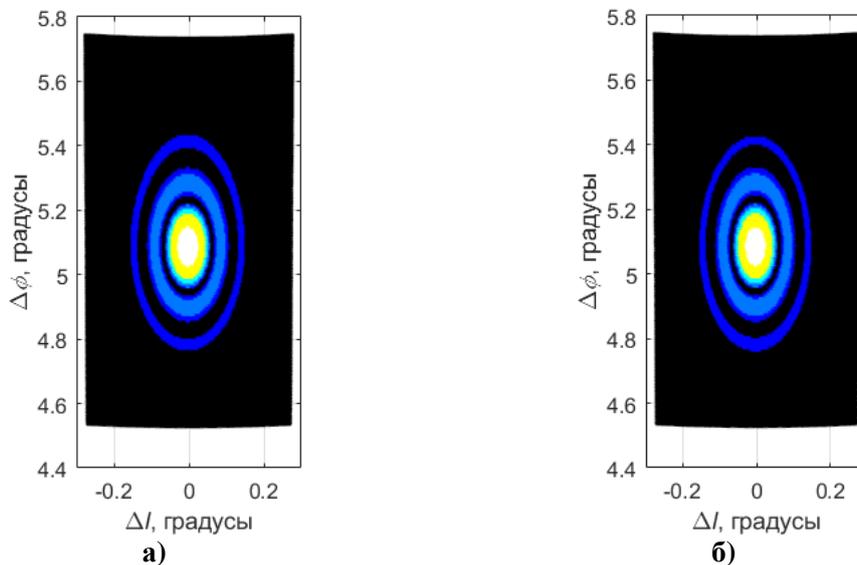


Рис. 4. Проекция на земной поверхности в геоцентрической системе координат: а) двумерная ДН антенны, б) относительные уровни мощности отраженного сигнала

Пересчет проекции диаграммы направленности круглой антенны в географические координаты дает яркостное изображение, приведенное на рис. 4а). Из этого рисунка видно, что вследствие кривизны Земли боковые лепестки ДН антенны, имеющие концентрическое расположение в плоскости  $(\beta, \theta_x)$ , приобретают характерную эллиптическую форму в плоскости  $(\Delta\varphi, \Delta l)$ . Относительные уровни мощности отраженного сигнала в геоцентрической системе координат приведены на рис. 4б). Эта диаграмма

наглядно иллюстрирует распределение энергии отраженного сигнала при изменении географической широты (угла визирования).

### Расчет уровня помех неоднозначности по азимуту

Выполним расчет неоднозначности по азимуту при использовании антенны с круглой апертурой, используя выражение (5), для ближайших двух зон неоднозначности с номерами  $n = \pm 1$ . Для этого построим нормированные зависимости мощности отраженного сигнала в азимутальной плоскости как функции угловой координаты  $\theta_x$ . Полученные графики приведены на рис. 5 в декартовых координатах в линейном и логарифмическом масштабах. Эти зависимости пропорциональны квадрату диаграммы направленности антенны в азимутальной плоскости  $P_x(\theta_x) \sim G_x^2(\theta_x)$ . При расчетах диаметр апертуры антенны полагался равным  $D = 3$  м, что соответствует ширине основного луча ДН  $\theta_{-3\text{дБ}} = 0,62^\circ$ . Функция  $P_0(\theta_x)$  определяет мощность отраженного сигнала, которая соответствует наклонной дальности  $R_0$ . Из рис. 5 следует, что функции  $P_x(\theta_x)$  и  $P_0(\theta_x)$  в области главного лепестка и ближайших боковых лепестков практически совпадают. Это обусловлено незначительным изменением наклонной дальности в пределах значений  $\theta_x = \pm 3^\circ$ .

Приведенные диаграммы позволяют найти относительный уровень первого бокового лепестка ДН по азимутальной координате для круглой антенны, который составляет  $PSLR = -17,57$  дБ, и относительный интегральный уровень боковых лепестков, равный  $ISLR = -13$  дБ. Аналогичные значения для антенны с прямоугольной апертурой равны, соответственно,  $-13,26$  дБ и  $-7,24$  дБ. Указанные особенности ДН антенны с круглой апертурой и ее параметры предопределяют специфику характеристик пространственной селекции РСА, который использует такую антенну.

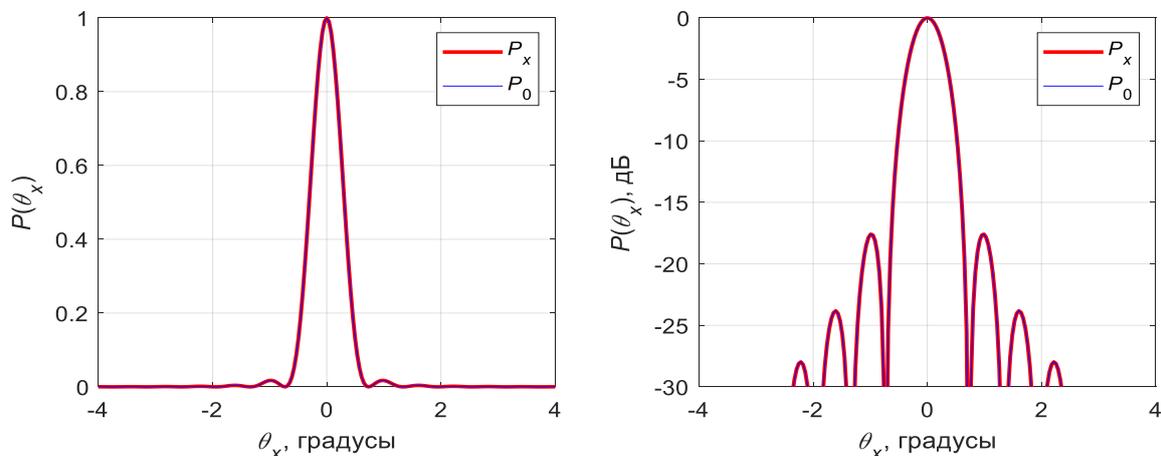


Рис. 5. Нормированные зависимости мощности отраженного сигнала в азимутальной плоскости при  $D = 3$  м

Уровни помех неоднозначности по азимуту  $A_x$ , рассчитанные для антенны с круглой апертурой при изменении относительной частоты повторения импульсов  $F_n/\Delta F_\partial$ , приведены на рис. 6. Из этого рисунка следует, что уровень неоднозначности по азимуту монотонно спадает с ростом  $F_n/\Delta F_\partial$ , достигая значения  $-35$  дБ при  $F_n/\Delta F_\partial = 2$ . При значениях  $F_n/\Delta F_\partial < 1,4$  наблюдается наибольшая крутизна спада уровня помех неоднозначности, а при бóльших значениях относительной частоты повторения импульсов зависимость является более полой. Такой характер функции  $A_x(F_n/\Delta F_\partial)$  объясняется тем, что при  $F_n/\Delta F_\partial < 1,4$  в полосу обработки сигнала попадают основные

лепестки копий спектра с центральными частотами  $\pm F_n$  (рис. 2), повышая уровень помех неоднозначности.

### Расчет уровня помех неоднозначности по азимуту в сечениях ДН

Для приведенных на рис. 4,б проекций двумерных ДН антенны с круглой апертурой выполним расчет уровня азимутальных помех в сечениях диаграммы в азимутальной плоскости для различных относительных приращений угла визирования:

$$\mathcal{G}_y = 2\Delta\beta/\theta_{-3\text{дБ}}, \quad (8)$$

где  $\Delta\beta$  – абсолютное приращение угла визирования.

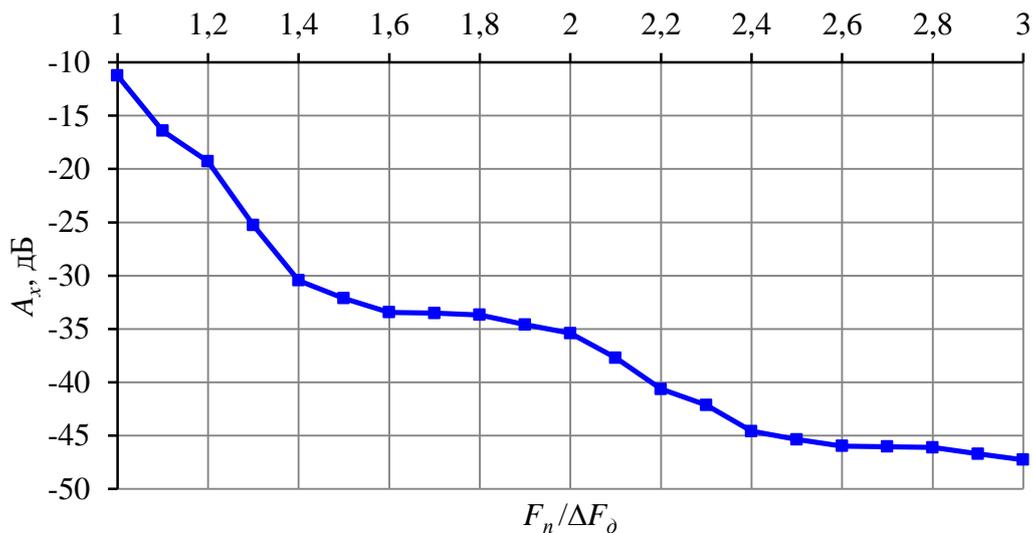


Рис. 6. Уровни помех неоднозначности по азимуту  $A_x$  при изменении относительной частоты повторения  $F_n / F_{\delta \max}$

На рис. 7 приведены графики функций  $P(\theta_x)$  при  $\mathcal{G}_y = 0$  ( $\Delta\beta = 0$ ) и  $\mathcal{G}_y = 1$  (сечение проходит по границе ширины ДН антенны) в линейном и логарифмическом масштабах. Из этого 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.

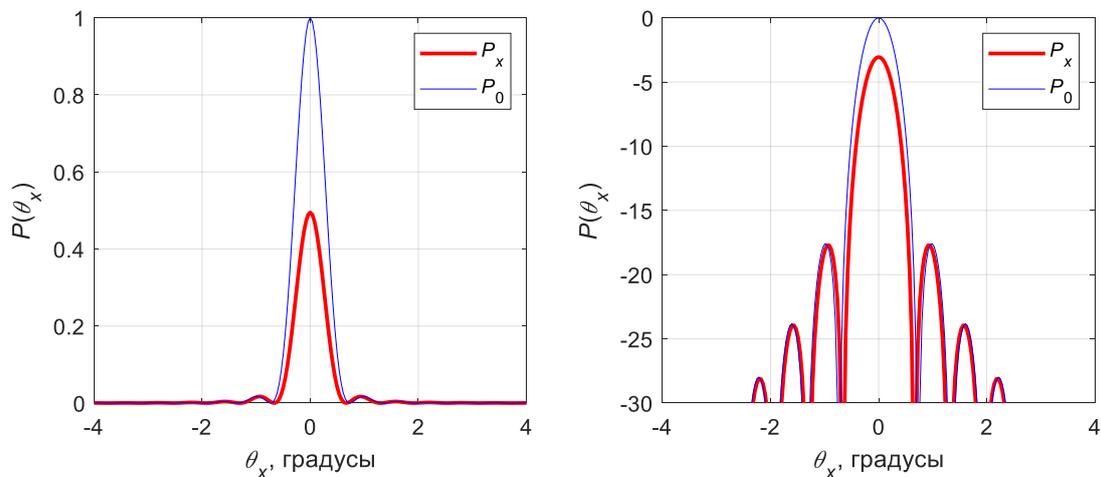
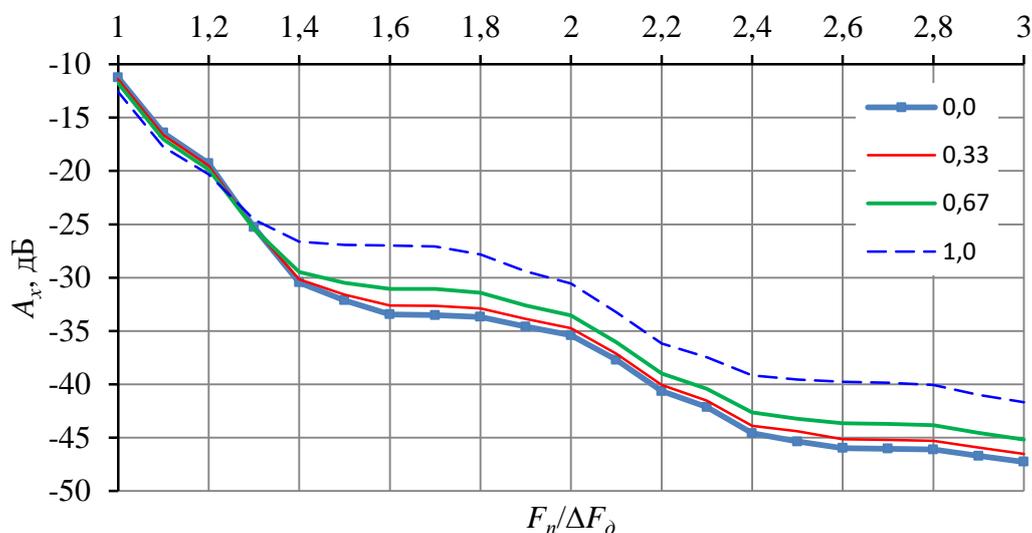


Рис. 7. Нормированные зависимости мощности отраженного сигнала в азимутальной плоскости при  $D = 3$  м в сечениях  $\mathcal{G}_y = 0$  (тонкая линия) и  $\mathcal{G}_y = 1$  (толстая линия)

Расчитанные уровни неоднозначности по азимуту  $A_x$  для сечений  $\mathcal{A}_y = 0; 0,33; 0,67; 1$  при изменении относительной частоты повторения импульсов показаны на рис. 8.



**Рис. 8.** Уровни неоднозначности по азимуту  $A_x$  для различных сечений  $\mathcal{A}_y$  при изменении нормированной частоты повторения  $F_n/\Delta F_\delta$

Из приведенных зависимостей следует, что при  $F_n/\Delta F_\delta < 1,2$  в сечениях наблюдается снижение (на 2...2,5 дБ) относительного уровня помех неоднозначности по азимуту. При увеличении отношения  $F_n/\Delta F_\delta$  помехи неоднозначности возрастают обратно пропорционально максимальному уровню мощности в сечении главного лепестка. При  $\mathcal{A}_y = 1$  относительный уровень помех неоднозначности превышает на 5...7 дБ значение, полученное при  $\mathcal{A}_y = 0$ .

### Заключение

На основании полученных результатов можно сделать ряд выводов. В первую очередь отметим, что помехи неоднозначности по азимутальной координате в РСА обусловлены периодической структурой зондирующего сигнала, а их уровень зависит от периода следования импульсов, ширины и формы ДН антенны по азимуту. Поэтому выбор этих параметров должен производиться совместно, причем с учетом других технических и системных параметров РСА. Все это делает процесс проектирования РСА и его режимов съемки итерационным, причем оптимизация производится по многокритериальным целевым функциям с учетом ограничений.

Рассмотренный вариант РСА с круглой апертурой антенны не является исключением. Уровень помех неоднозначности по азимуту, рассчитанный вдоль центральной азимутальной оси кадра, при использовании такой антенны и выборе частоты повторения импульсов в пределах  $1,4 < F_n/\Delta F_\delta < 2$  составляет (-30...-35) дБ, что меньше на 6...8 дБ, чем у РСА с прямоугольной плоской апертурой при той же ширине ДН антенны [10]. Это обусловлено более низким уровнем боковых лепестков ДН антенны с круглой апертурой и более высокой скоростью их ослабления с ростом азимутального угла. Вместе с тем при оценке уровня помех неоднозначности следует учитывать, что уровень помех будет расти на 2...2,5 дБ с увеличением отклонения от центра кадра.

Для дополнительного увеличения коэффициента подавления рассматриваемых помех неоднозначности по азимуту при некоторых ограничениях могут быть использованы традиционные методы: увеличение частоты повторения зондирующих

импульсов и/или формирование специального амплитудно-фазового распределения сигналов в азимутальной плоскости раскрыва антенны, позволяющего уменьшить уровень первых боковых лепестков ДН антенны.

В заключение заметим, круглые зеркальные антенны, не смотря на хорошие массогабаритные характеристики, простоту развертывания, не нашли широкого применения в РСА космического базирования. Это во многом связано с ограниченными возможностями гибридных зеркальных антенн по электронному сканированию лучом и, как следствие, со снижением функциональности ряда режимов съемки.

*Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 23-29-10114.*

### **Литература**

1. 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. DOI: 10.18698/2308-6033-2019-5-1881.
2. Груздов В.В., Колковский Ю.В., Криштопов А.В., Кудря А.И. Новые технологии дистанционного зондирования Земли из космоса. – М.: Техносфера, 2019. – 482 с.
3. 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.
4. Современные подходы к созданию малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли на базе унифицированных платформ: монография / С.Л. Сафронов [и др.]; под ред. засл. деятеля науки РФ, д-ра техн. наук, проф. В.В. Салмина. – Самара: Изд-во Самарского университета, 2019. – 276 с.
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. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли / Под ред. Г.С. Кондратенкова. – М.: Радиотехника, 2005. – 368 с.
7. 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. Н.Е. Жуковского, 2023. – С.471-476.
8. 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
9. Носов В.И. Обеспечение электромагнитной совместимости при частотно-территориальном планировании систем спутниковой связи с зональным обслуживанием: Монография. – Новосибирск: СибГУТИ, 2016. – 252 с.
10. 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.