

**ОЦЕНКА УРОВНЯ ПОМЕХ НЕОДНОЗНАЧНОСТИ В КОСМИЧЕСКИХ РСА С АФАР****Костров Виктор Васильевич**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»<sup>1</sup>.

*E-mail:* [kostrov.46@mail.ru](mailto:kostrov.46@mail.ru)**Храмов Константин Константинович**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»<sup>1</sup>.

*E-mail:* [hramovkk@gmail.com](mailto:hramovkk@gmail.com)**Макаров Вячеслав Петрович**

кандидат технических наук, заместитель главного конструктора АО «НПО Лавочкина»<sup>2</sup>.

*E-mail:* [makarov951vyacheslav@yandex.ru](mailto:makarov951vyacheslav@yandex.ru)<sup>1</sup>*Адрес:* 602264, Российская Федерация, Владимирская область, г. Муром, ул. Орловская, д. 23.<sup>2</sup>*Адрес:* 141402, Российская Федерация, Московская область, г. Химки, ул. Ленинградская, д. 24.

*Аннотация:* Задачи учёта помех неоднозначности и разработки методов борьбы с ними особенно остро стоят в РСА, работающих на базе малых космических аппаратов и имеющих высокое или сверхвысокое разрешение. Целью работы является оценка уровня помех неоднозначности по дальности и по азимуту в РСА космического базирования, использующих активную фазированную антенную решётку (АФАР) с прямоугольным раскрытием и работающих в режиме нормального бокового обзора. В работе оцениваются уровни помех неоднозначности по дальности и по азимуту в полосе обзора при изменении параметров съёмки, формулируются требования по снижению уровня помех неоднозначности. Отмечается, что достижимый уровень помех неоднозначности по азимутальной координате  $-24$  дБ достигается при условии, что частота повторения импульсов на 40...50% превышает ширину доплеровского спектра частот.

*Ключевые слова:* радиолокатор с синтезированной апертурой антенны (РСА), РСА космического базирования, помехи неоднозначности по дальности, помехи неоднозначности по азимуту, активная фазированная антенная решётка (АФАР), диаграмма направленности, доплеровский спектр.

**Введение**

Современные радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны (РСА) обладают широкими информационными возможностями [1–5], причём от бортовых РСА космического базирования требуется одновременно обеспечить высокое пространственное разрешение и широкую полосу охвата съёмкой земной поверхности [4]. Эти, в общем-то, технически противоречивые требования приводят к компромиссному решению проблемы неоднозначности по дальности и азимуту. Действительно, для снижения уровня помех неоднозначности по дальности требуется увеличивать период следования зондирующих импульсов, в то время как в случае азимута, период следования

требуется уменьшать, поэтому чаще всего задачи снижения помех неоднозначности решаются отдельно по дальности и по азимуту. В любом случае сигналы целей, находящихся в зонах неоднозначных измерений, приводят к ухудшению радиолокационных изображений (РЛИ) [4].

Сложность проблемы усугубляется разнообразием РСА, тем, что системы дистанционного зондирования Земли работают в различных режимах съёмки земной поверхности, имеют разные типы антенных систем, могут использовать полно поляризованный сигнал, реализовать различные методы интерферометрии. Перспективные космические комплексы ориентированы на применение активных фази-

рованных антенных решёток (АФАР), характеристики и параметры которых отличаются от характеристик зеркальных антенн. Поэтому оценки уровня неоднозначности по дальности и азимуту для разных систем и режимов работы в рамках одной системы могут отличаться друг от друга.

Большинство РСА космического базирования работает с импульсным зондирующим сигналом (ЗС), период следования  $T_n$  которого много меньше времени, необходимого для однозначного измерения задержки отражённого сигнала. Отсюда видно, что импульсные РСА космического базирования всегда работают в режиме неоднозначности:  $R_0 > R_n = cT_n / 2$ , где  $R_0$  — наклонная дальность от космического аппарата (КА) до объекта съёмки;  $R_n$  — максимально однозначно измеряемое расстояние;  $c$  — скорость света. Параметр  $T_n$  является одним из ключевых параметров РСА [6].

Рассмотрим временные диаграммы работы РСА космического базирования (рис. 1), антенная система которого представляет собой плоскую АФАР, построенную на базе одноканальных приёмо-передающих модулей (ППМ) [7]. На этом рисунке обозначены:  $\tau$  — длительность зондирующего импульса;  $T_{np}$  — длительность строба приёмника;  $T_{np \min}$  — минимальная длительность строба приёмника;  $T_1$  — время задержки отражённого сигнала;  $N$  — количество зондирующих импульсов, излучённых за время  $T_{ca}$  синтезирования апертуры. В каждом цикле зондирования предусматриваются временные интервалы  $\tau_1$  и  $\tau_2$ , предназначенные для переключения режимов «передача-приём» (ПД/ПР), положения луча в зоне обзора, а также режима поляризации.

Из приведённых на рис. 1 временных диаграмм следует, что при выборе частоты (пери-

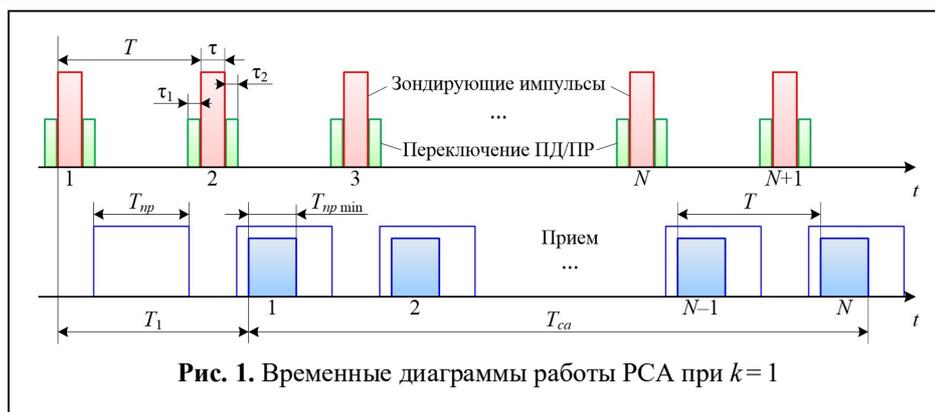


Рис. 1. Временные диаграммы работы РСА при  $k = 1$

ода) повторения зондирующих импульсов необходимо, чтобы траекторный сигнал длительностью  $T_{np \min}$  не превышал длительность строба приёмника  $T_{np}$ , т.е. выполнялись неравенства (с учётом интервала  $T_1$ ) [8]:

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

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

где  $F_n = 1/T_n$  — частота повторения зондирующих импульсов;  $k = 1, 2, \dots, N_1$ ;  $N_1$  — количество зондирующих импульсов, излучённых за время  $T_1$  до начала приёма.

Аналогичные соотношения могут быть получены для других поляризационных конфигураций ППМ. Так для варианта общего передатчика и двух каналов приёма  $\frac{k}{T_1 - \tau} \leq F_n \leq \frac{k + 1}{T_1 + T_{np \min} + \tau_1}$ , а для двухканального ППМ, работающего в полнополяризационном режиме с ортогональными сигналами,

$$\frac{k}{T_1 - \tau} \leq F_n \leq \frac{k + 1}{T_1 + T_{np \min}}.$$

Ещё одним фактором, влияющим на уровень помех неоднозначности, является ширина луча диаграммы направленности антенны (ДНА) в угломестной  $\theta_y$  и азимутальной  $\theta_x$  плоскостях (рис. 2). Ширина луча ДНА по углу места (рис. 2, а) в первую очередь должна обеспечивать получение РЛИ сцены, которая подлежит съёмке. Это выполняется неравенством  $\Delta Y < R_n / \cos \gamma$ , где  $\Delta Y$  — ширина следа ДНА на поверхности Земли;  $\gamma$  — угол падения электромагнитной волны на объект съёмки. С дру-

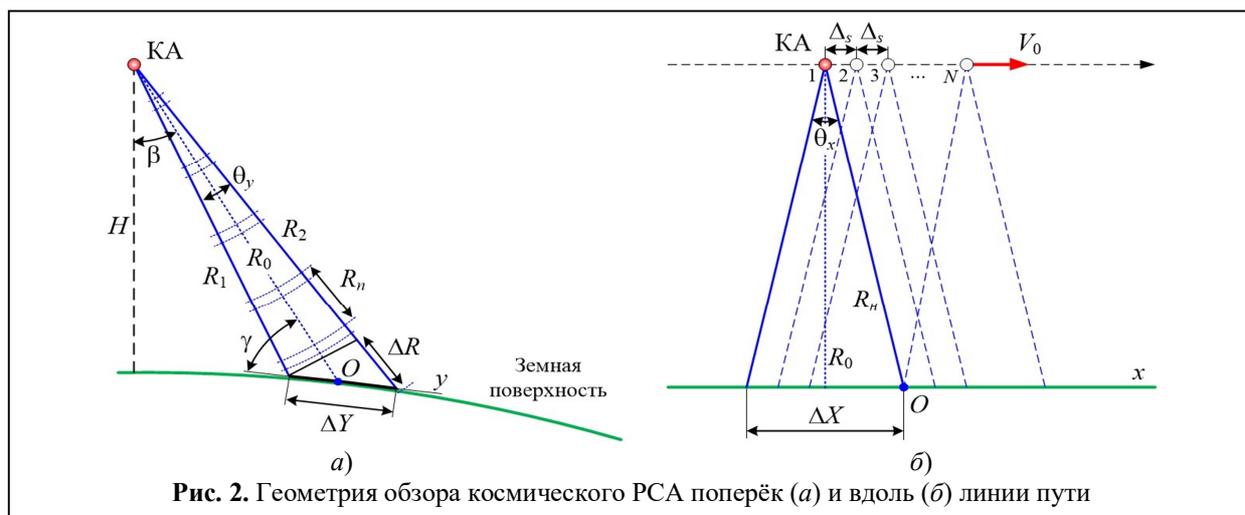


Рис. 2. Геометрия обзора космического РСА поперёк (а) и вдоль (б) линии пути

гой стороны, величина  $\theta_y$  должна удовлетворять условию снижения помех неоднозначности по дальности. Эта идея пространственной селекции сигналов основной зоны обзора и ослабления (подавления) вне луча ДНА положена в основу работы большинства РСА. Очевидно, что размер следа луча ДНА на поверхности Земли  $\Delta Y$  будет увеличиваться с увеличением высоты орбиты КА  $H$  и угла визирования  $\beta$ , что приводит к сложной многопараметрической и нелинейной зависимости уровня помех неоднозначности по дальности.

Несколько другую природу имеет происхождение неоднозначностей по азимуту. В соответствии с геометрией обзора (рис. 2, б, где  $\Delta_s$  — расстояние, которое преодолевает РСА за интервал  $T_n$ ;  $\Delta X$  — ширина следа ДНА в азимутальной плоскости) доплеровское смещение частоты сигнала, отражённого от элемента разрешения  $O$ , при нормальном боковом обзоре изменяется в пределах от  $-2V_0 \sin(\theta_x/2)/\lambda$  до  $+2V_0 \sin(\theta_x/2)/\lambda$ . Нетрудно заметить, что полная ширина обрабатываемой части доплеровского спектра отражённого сигнала составляет  $\Delta F_0 = 4V_0 \sin(\theta_x/2)/\lambda$ . Для передачи всего спектра доплеровских частот комплексного траекторного сигнала необходимо, чтобы частота дискретизации (частота повторения  $F_n$  зондирующих импульсов) превышала значение  $\Delta F_0$

$$F_n \geq \Delta F_0 \approx 2V_0/D_x, \quad (2)$$

где  $D_x = \lambda/\theta_x$  — физическая длина апертуры антенны РСА в азимутальной плоскости.

В силу того, что спектр траекторного сигнала является периодическим, а его основная часть не ограничивается полосой  $\Delta F_0$ , возникает эффект наложения, что соответствует азимутальной неоднозначности. Чтобы снизить уровень помех неоднозначности по азимуту, вводится коэффициент запаса  $k_x > 1$  [4], который увеличивает частоту дискретизации, при этом соотношение (2) приобретает вид  $F_n \geq k_x \Delta F_0$ .

Проблемы учёта помех неоднозначности и разработки методов борьбы с ними особенно остро стоят в РСА, работающих на базе малых КА, где актуальным является вопрос снижения массогабаритных характеристик аппаратуры и, прежде всего, антенны [9]. При этом уменьшение размеров антенны в азимутальной и угломестной плоскостях приводит к увеличению ширины ДНА и возрастанию помех неоднозначности. Оценка уровня помех неоднозначности в частных случаях и некоторые меры по их снижению, улучшение за счёт этого качества дешифрирования и повышения достоверности получаемых РЛИ рассматривались в [3, 4, 8, 10–14].

Целью работы является оценка уровня помех неоднозначности по дальности и по азимуту в РСА  $X$ -диапазона космического базирования, использующего АФАР с прямоугольным

раскрывом и работающего в режиме нормального бокового обзора.

### Расчёт проекции двумерной ДНА

Пусть КА с РСА  $X$ -диапазона движется по орбите с постоянной скоростью  $V_0$  на высоте  $H$  (рис. 2) и осуществляет съёмку в маршрутном режиме (угол визирования  $\beta$ ). Для двумерного массива излучателей АФАР, образующего прямоугольную эквидистантную сетку размером  $M \times K$  элементов или полотно размером  $D_x \times D_y$ , нормированная диаграмма направленности определяется выражением

$$F(\theta, \phi) = \frac{1}{M \cdot K} \left| \frac{\sin(0,5Mkd_x \sin \theta \cos \phi)}{\sin(0,5kd_x \sin \theta \cos \phi)} \right| \times \left| \frac{\sin(0,5Kkd_y \sin \theta \sin \phi)}{\sin(0,5kd_y \sin \theta \sin \phi)} \right|, \quad (3)$$

где  $\theta, \phi$  — угол места и азимут анализируемой точки в дальней зоне;  $k = 2\pi/\lambda$  — волновое число;  $d_x, d_y$  — расстояния между соседними излучателями вдоль осей  $x$  и  $y$ ; индекс « $x$ » соответствует размерности в азимутальной плоскости, а « $y$ » — в угломестной.

Нормированная функция множителя решётки в логарифмическом масштабе определяется выражением

$$G(\theta, \phi) = 20 \lg(F(\theta, \phi)/F(0, 0)).$$

Для математического моделирования, числовых расчётов и оценки уровня помех неоднозначности далее используются параметры РСА, приведённые в таблице 1.

Как отмечалось выше, на уровень помех неоднозначности оказывает существенное влияние форма ДНА, поэтому значениям её параметров, в частности, уровню боковых лепестков (УБЛ), уделяется повышенное внимание. На рис. 3 представлена рассчитанная по соотношению (3) ДНА как 2D яркостное изображение, наблюдаемое из фазового центра антенны на картинной плоскости. Область на изображении, где УБЛ более  $-25$  дБ, ограничена светлым прямоугольником. В целом приведён-

ная ДНА соответствует идеализированной АФАР и отличается симметрией.

Если рассматривать проекцию ДНА на земную поверхность, то симметрия нарушается. Это даёт основание полагать, что мощность сигналов, отражённых из зон неоднозначных измерений, также будет зависеть от параметров орбиты, угла визирования и других параметров РСА. Для определения мощности отражённого сигнала как функции угла визирования воспользуемся одной из форм записи основного уравнения радиолокации для активного РСА [4]:

$$R = \sqrt[4]{\frac{P_u G S_{eff} \sigma}{(4\pi)^2 P_{np} L}}, \quad (4)$$

где  $R$  — дальность до цели;  $P_u, P_{np}$  — излучаемая и принимаемая мощности;  $G$  — коэффициент усиления АФАР на передачу;  $S_{eff}$  — эффективная площадь раскрыва АФАР при приёме сигналов;  $\sigma$  — эффективная площадь рассеяния цели;  $L$  — коэффициент потерь, учитывающий не идеальность конструкции, потери при обработке, затухание и рассеивание радиоволн в атмосфере.

Поскольку коэффициент  $G$  зависит от площади антенны, то для мощности получаем

$$P(\beta, \theta_x) = K_0 \frac{G^2(\beta, \theta_x)}{R_n^4(\beta, \theta_x)}, \quad (5)$$

где  $K_0$  — коэффициент, зависящий от параметров РСА и трассы распространения;  $R_n$  — наклонная дальность.

Чтобы показать возникающие эффекты

Таблица 1. Базовые параметры РСА

Параметр	Значение
Высота орбиты КА, $H$	520 км
Длина волны ЗС, $\lambda$	3,1 см
Угломестное положение ДНА $\beta_0$	40°
Ширина луча ДНА АФАР – в азимутальной плоскости, $\theta_{x-3дБ}$ – в угломестной плоскости, $\theta_{y-3дБ}$	0,33° 2,3°
Расстояние между элементами АФАР	$\lambda/2$
Зондирующий сигнал	ЛЧМ
Длительность ЗС, $\tau$	20 мкс
Время коммутации, $\tau_1 = \tau_2$	8 мкс

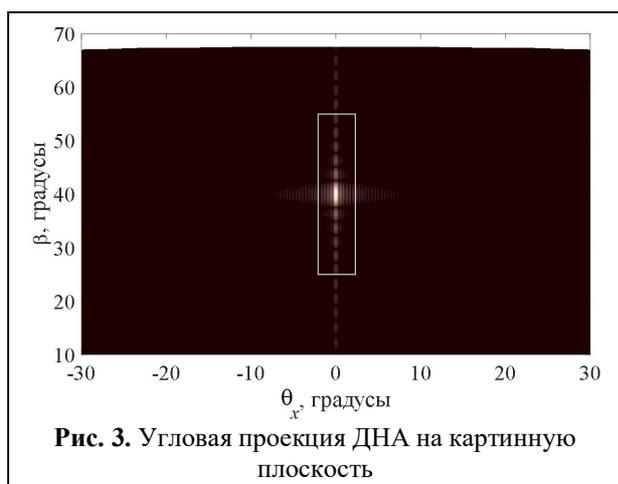


Рис. 3. Угловая проекция ДНА на картинную плоскость

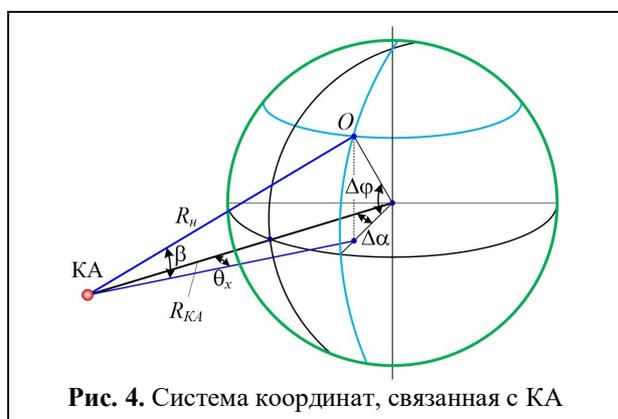


Рис. 4. Система координат, связанная с КА

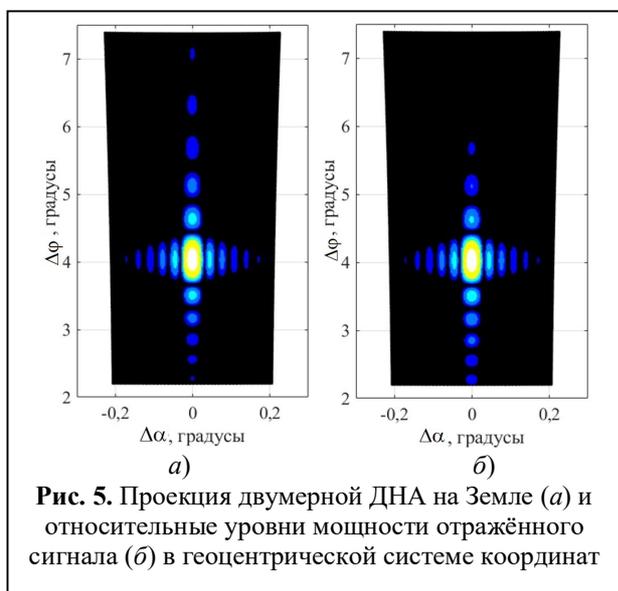


Рис. 5. Проекция двумерной ДНА на Земле (а) и относительные уровни мощности отражённого сигнала (б) в геоцентрической системе координат

асимметрии ДНА, воспользуемся геометрическими построениями, приведёнными на рис. 4. С учётом введённых обозначений можно записать выражение для нахождения наклонной дальности  $R_n$  до точки обзора  $O$  [12]

$$R_n = \sqrt{R_{KA}^2 - 2R_{KA}R_3 \cos(\Delta\phi)\cos(\Delta\alpha) + R_3^2}, \quad (6)$$

где  $R_{KA} = H + R_3$  — радиус орбиты КА;  $R_3$  — радиус Земли;  $\Delta\phi$  — широта точки  $O$ ;  $\Delta\alpha$  — разница долгот точки  $O$  и подспутниковой точки.

Выражение (6) позволяет перейти от угловой спутниковой проекции ДНА (рис. 3) к географическим координатам. В этих координатах прямоугольный фрагмент ДНА, выделенный на рис. 3, и сечения уровней мощности становятся несимметричными (рис. 5, а и 5, б).

Полученные диаграммы наглядно иллюстрируют перераспределение энергии эхосигнала при изменении географической широты (угла визирования) полосы обзора, что свойственно системам космического базирования.

#### Уровень помех неоднозначности по дальности

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

$$A_y(\beta) = \frac{R_n^4}{G_y^2[\beta(R_n)]} \times \left\{ \frac{G_y^2[\beta(R_n + R_n)]}{(R_n + R_n)^4} + \frac{G_y^2[\beta(R_n - R_n)]}{(R_n - R_n)^4} \right\}, \quad (7)$$

где  $R_1 \leq R_n \leq R_2$  — наклонная дальность;  $G_y(\beta)$  — коэффициент усиления антенны в направлении угла визирования  $\beta$  в угломестной плоскости;  $(R_n + R_n)$  и  $(R_n - R_n)$  — расстояния до целей, находящихся в зонах неоднозначности.

Используя неравенства (1), рассчитаем реализуемые для заданных в таблице 1 параметров съёмки значения частоты повторения импульсов [8]. Диапазоны допустимых значений

$F_n$  при изменении угла визирования приведены на рис. 6 и обозначены тёмными полосами. Минимальная частота повторения  $F_{n \min}$  определяется из соотношения (2), когда оно обращается в равенство. При  $k_x = 1$  получаем  $F_{n \min} = 2V_0 \Delta X / (\lambda R_0)$ .

На рис. 7, а представлено сечение функции (7) в угломестной плоскости, которое соответствует  $F_{n \min} = 3,33$  кГц в центральной области съёмки.

Области ближайших зон неоднозначности по дальности ( $n = \pm 1$ ) и основной области ( $n = 0$ ) обозначены на рис. 7, а темным фоном. Протяжённость этих зон вдоль оси абсцисс соответствуют длительности строка приёмника  $T_{np}$ , пересчитанной в значение угла визирования  $\beta$ . Из рис. 7, а видно, что ширина каждой последующей зоны неоднозначности увеличивается. Различие ширины областей неоднозначности и их асимметричное расположение относительно  $\beta_0$  обусловлены изменением ширины следа ДН антенны на поверхности Земли при изменении угла визирования, в то время как рекуррентная дальность  $R_n$  остаётся неизменной, если  $T = const$  (рис. 2).

С использованием соотношения (6) и построений рис. 7, а проведён расчёт уровней помех неоднозначности по дальности, резуль-

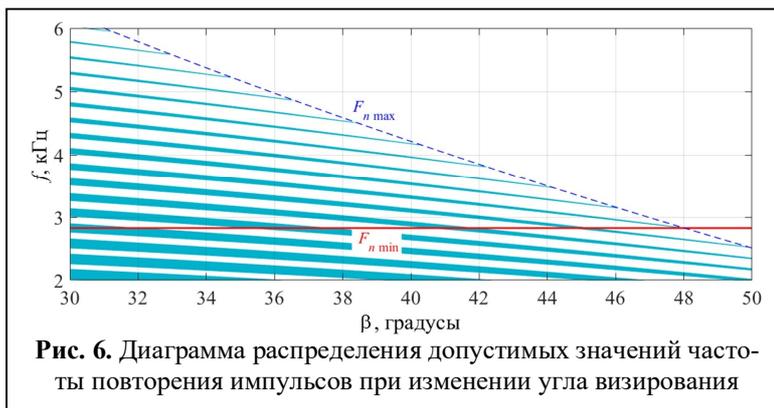


Рис. 6. Диаграмма распределения допустимых значений частоты повторения импульсов при изменении угла визирования

таты которого в виде зависимости  $A_y(\beta)$  в основной области съёмки  $\beta = 38,2^\circ \dots 41,6^\circ$  представлены на рис. 7, б. Из этого рисунка следует, что уровень помех изменяется в широких пределах: только в полосе обработки изменение составляет почти 22 дБ ( $A_y(\beta) = -40,5 \dots -18$  дБ). Асимметрия функции  $A_y(\beta)$  в полосе обработки объясняется различной шириной ближайших зон неоднозначности. При этом интегральный уровень помех неоднозначности по дальности в полосе обработки для рассматриваемого угла визирования и частоты зондирования равен  $A_{y0}(\beta) = -23,7$  дБ.

С ростом частоты повторения зондирующих импульсов  $F_n$  наблюдается уменьшение ширины зон неоднозначности. На рис. 8, а приведены нормированные зависимости  $P(\beta)$  и обо-

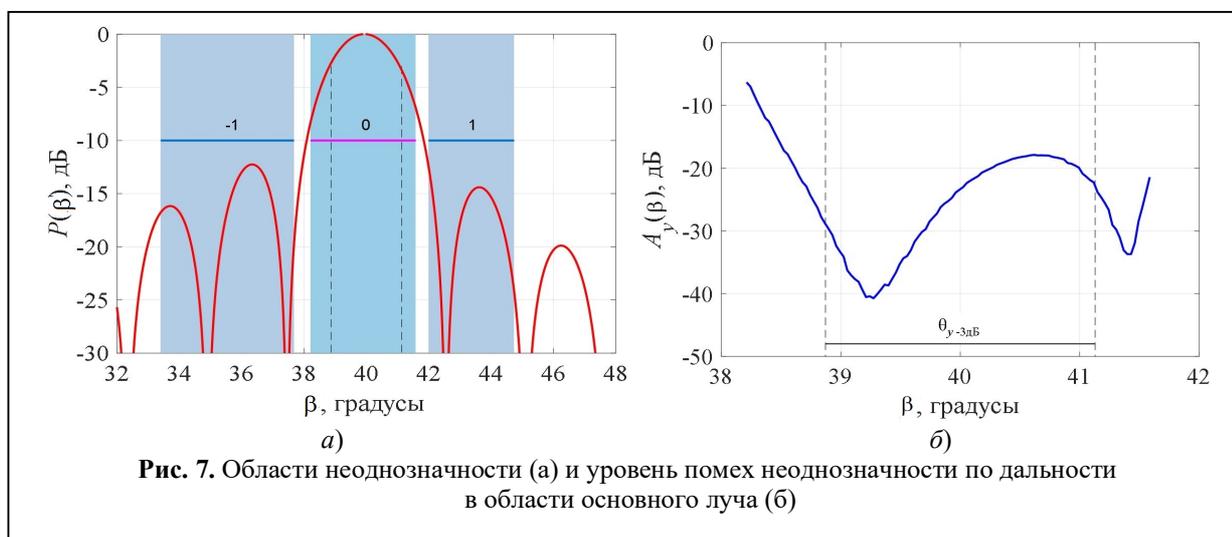
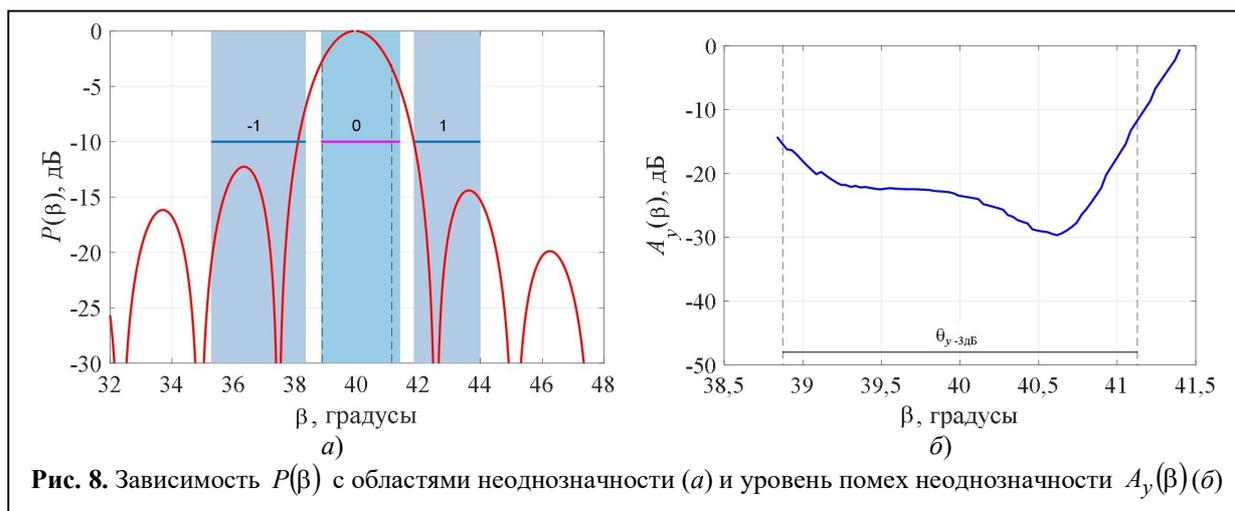


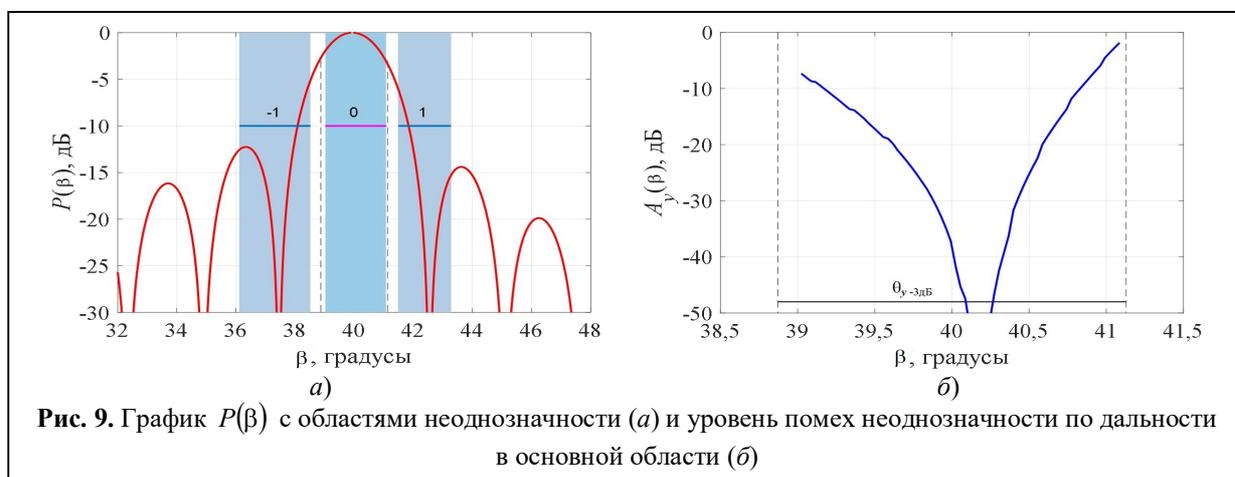
Рис. 7. Области неоднозначности (а) и уровень помех неоднозначности по дальности в области основного луча (б)



значены области неоднозначности, полученные при максимально возможной для заданных параметров частоте зондирования  $F_n = 4,175$  кГц. Соответствующие этой частоте зависимости  $A_y(\beta)$  в основной области неоднозначности представлены на рис. 8, б. Минимальное значение уровня неоднозначности составляет  $A_{y\min} = -30$  дБ, а на краях основной области съёмки это значение возрастает до  $A_{y\max} = -12$  дБ, что является недопустимо высоким уровнем. Также наблюдается асимметрия функции  $A_y(\beta)$  относительно значения  $\beta_0$ . Отметим также, что интегральный уровень помех неоднозначности в полосе обработки сигналов составляет  $A_{y0} = -22,7$  дБ, т.е. по сравнению со случаем пониженной частоты возрос на 1 дБ.

Если выбрать частоту зондирующих импульсов выше максимально допустимой (для принятых параметров РСА она равна  $F_{n\max} = 4,2$  кГц), то полоса захвата  $\Delta Y$ , соответствующая ширине ДН антенны в угломестной плоскости, превышает ширину зоны неоднозначности. При этом требование  $T_{np\min} \leq T_{np}$  не выполняется и эхо-сигнал, отражённый от краёв полосы обзора, не может быть принят и обработан системой РСА. В качестве примера на рис. 9, а показано взаимное расположение функции  $P(\beta)$  и областей неоднозначности  $n = \pm 1$  при частоте зондирующих импульсов  $F_n = 5,04$  кГц. Зависимости  $A_y(\beta)$  для этого случая представлены на рис. 9, б.

Как следует из этого рисунка, минимально достижимый уровень помех неоднозначности находится ниже  $-60$  дБ, а его максимальное



значение в основной области равно  $A_{y_{\max}} = -2$  дБ. Такой разброс значений  $A_y(\beta)$  обусловлен тем, что зоны неоднозначности с номерами  $n = \pm 1$  попадают одновременно на нули и главный лепесток ДНА (рис. 9,а). При этом интегральный уровень помех неоднозначности по дальности в полосе обработки увеличился до значения  $A_{y0} = -15,5$  дБ.

### Уровень помех неоднозначности по азимуту

Уровень помех азимутальной неоднозначности представим как отношение мощности сигналов неоднозначности к мощности сигнала в максимуме  $G_{x_{\max}}$  синтезированной ДНА для ближайших двух зон неоднозначности с номерами  $n = \pm 1$ . Равенство для интегрального уровня  $A_x$  паразитных сигналов (азимутальной неоднозначности) можно записать в виде

$$A_x = \frac{\int_{F_{01}+F_n}^{F_{02}+F_n} G_x^2(F_\delta) dF_\delta + \int_{F_{01}-F_n}^{F_{02}-F_n} G_x^2(F_\delta) dF_\delta}{\int_{F_{01}}^{F_{02}} G_x^2(F_\delta) dF_\delta}, \quad (8)$$

где  $\Delta F_\delta = F_{02} - F_{01}$  — полоса доплеровских частот, используемая для синтеза РЛИ (полоса обработки);  $F_\delta$  — доплеровская частота, связанная с угловой азимутальной координатой выражением  $F_\delta = 2V_0 \sin \theta_{x-3\text{дБ}} / \lambda$ .

Если функции передающей и приёмной антенн совмещены в одной антенне, то абсолютное значение нормированной ДНА АФАР с прямоугольным раскрытием в азимутальном сечении будет определяться выражением

$$G(\theta_x) = \left| \frac{\sin(0,5Mkd_x \sin \theta_x)}{M \sin(0,5kd_x \sin \theta_x)} \right|^2.$$

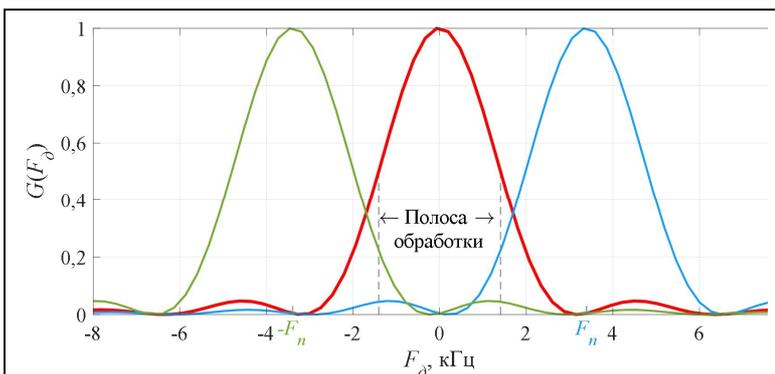


Рис. 10. Азимутальное сечение ДНА  $G_x(F_\delta)$  и копии спектра

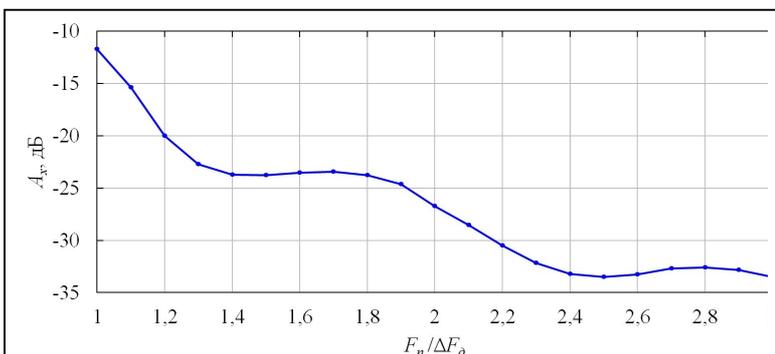


Рис. 11. Уровни неоднозначности по азимуту при различных значениях нормированной частоты повторения импульсов

Нормированная азимутальная ДНА как функция доплеровской частоты  $G_x(F_\delta)$  приведена на рис. 10 и обозначена жирной линией. Зависимости с центральными частотами, равными  $\pm F_n$ , являются результатом естественной дискретизации функции  $G_x(F_\delta)$  с частотой  $F_n$  повторения зондирующих импульсов. Участки этих зависимостей, которые попадают в полосу обработки сигналов, определяют азимутальную неоднозначность. Приведённые на рис. 10 зависимости соответствуют относительному значению частоты повторения  $F_n / \Delta F_\delta \approx 1,2$ .

Используя выражение (7), рассчитана зависимость величины  $A_x$  от изменения частоты повторения импульсов (рис. 11) с параметрами съёмки, соответствующими данным таблицы 1. Из приведённого рисунка следует, что уровень неоднозначности по азимуту монотонно спадает с ростом частоты повторения  $F_n$  зондирующих импульсов. При этом зависимость имеет

локальные экстремумы, повторяющиеся через интервалы  $F_n/\Delta F_0 \approx 1,1$ .

При практической реализации РСА предпочтительно выбирать минимально допустимое значение частоты повторения, поскольку этот параметр будет влиять на объём и скорость обработки данных. Как видно из рис. 11, ближайший локальный минимум уровня азимутальной неоднозначности, равный примерно минус 23,8 дБ, приходится на относительное значение частоты  $F_n/\Delta F_0 \approx 1,5$ . Это означает, что наименьшая частота повторения импульсов, которую целесообразно реализовать в РСА с прямоугольной ФАР, должна примерно в 1,5 раза превышать полосу обрабатываемых доплеровских частот.

### Заключение

В отличие от антенн с круглой или эллиптической апертурой [11] АФАР с прямоугольным раскрытием имеет малый уровень боковых лепестков в диагональных направлениях, поэтому основные расчёты проведены для сечений в угломестной и азимутальной плоскостях, в которых возникают наиболее интенсивные помехи неоднозначности. Оба вида помех неоднозначности, возникающих в РСА, вызваны импульсным характером зондирующего сигнала, однако помехи неоднозначности по дальности есть проявление эффекта наложения во временной области, а помехи неоднозначности по азимуту — в частотной.

Анализ энергетики эхо-сигналов и учёт кривизны земной поверхности показал, что при углах  $\beta > \beta_0$  вклад в уровень помех неоднозначности по дальности от боковых лепестков ДНА на 3...5 дБ меньше, чем от боковых лепестков из области  $\beta < \beta_0$ , причём увеличение угла визирования  $\beta > \beta_0$  даёт рост относительного уровня помех. Для уменьшения азимутальной неоднозначности необходимо увеличивать частоту повторения импульсов. Достижение приемлемого, порядка минус 24 дБ, уровня помех неоднозначности по азимуту

наблюдается при соотношении  $F_n/\Delta F_0 \geq 1,5$ , а уровень минус 30 дБ обеспечивается при  $F_n/\Delta F_0 \approx 2,2$ .

Таким образом, задача снижения помех неоднозначности с точки зрения выбора параметров режима работы РСА является технически противоречивой: увеличение (уменьшение) частоты повторения импульсов приводит к одновременному повышению (снижению) уровня помех неоднозначности по дальности и уменьшению (увеличению) азимутальной неоднозначности. Для малых космических аппаратов решение данной задачи в ряде случаев не имеет компромиссного результата и приводит к необходимости использования дополнительных мер по снижению помех неоднозначности. Использование полученных результатов на стадии проектирования режимов работы РСА дают возможность обосновать необходимость применения и требования к уровню дополнительного подавления помех неоднозначности по дальности и азимуту в РСА с АФАР.

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

### Литература

1. Антипов В.И., Горяинов В.Т., Кулин А.Н., Толстов Е.Ф., Титов М.П. и др. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны. Под ред. В.Т. Горяинова. М.: Радио и связь, 1988. 304 с.
2. Цифровая обработка сигналов в РСА. Под ред. Е.Ф. Толстова. Смоленск: ВА ВПВО ВС РФ, 2005. 232 с.
3. Школьный Л.А., Толстов Е.Ф., Титов М.П. и др. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений: учебник для курсантов ВВИА им. профессора Н.Е. Жуковского. Под ред. Л.А. Школьного. М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. 531 с.
4. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турок В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. Под ред. В.С. Вербы. М.: Радиотехника, 2010. 680 с.
5. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. Под ред. Г.С. Кондратенкова. М.: Радиотехника, 2005. 368 с.

6. *Khramov K.K., Kostrov V.V.* Achievable parameters of the X-band synthetic aperture radar based on small satellite // E3S Web Conf. 2023. Vol. 431. No. 02026. DOI: 10.1051/e3sconf/202343102026.

7. *Гришин В.Ю., Костров В.В.* Архитектура приемно-передающих модулей АФАР поляриметрических радиолокационных станций // Перспективные технологии в средствах передачи информации: Материалы 14-ой международной научно-технической конференции. Владимир: ВлГУ, 2021. С. 48–54.

8. *Храмов К.К., Смирнов М.С.* Оценка уровня помех неоднозначности по дальности в РСА космического базирования // 79-я Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио: сб. докладов. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Санкт-Петербург. 2024. С. 43–47.

9. *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.

10. *Карпов О.А., Рабочий А.Н., Толстов Е.Ф., Фёдоров В.С., Костров В.В.* Проблемы неоднозначности в космических РСА и коды Голда // Современные проблемы дистанционного зондирования,

радиолокации, распространения и дифракции волн. Материалы Всероссийской открытой научной конференции. Муром: МИ ВлГУ, 2023. С. 375–384.

11. *Храмов К.К., Макаров В.П., Костров В.В.* Оценка азимутальной неоднозначности в РСА космического базирования при использовании круглой зеркальной антенны // Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн. Материалы Всероссийской открытой научной конференции. Муром: МИ ВлГУ, 2024. С. 348–356.

12. *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.

13. *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. 2020. Vol. 168. No. 107323. DOI: 10.1016/j.sigpro.2019.107323.

14. *Jeon S-Y., Glatz F., Villano M.A.* Waveform-Encoded SAR Implementation Using a Limited Number of Cyclically Shifted Chirps // Remote Sensing. 2021. Vol. 13(15). No. 3038. DOI:10.3390/rs13153038

Поступила 3 октября 2024 г.

English

## ESTIMATION OF AMBIGUITY LEVEL IN SPACE-BORNE SAR WITH ACTIVE PHASED ARRAY ANTENNA

**Viktor Vasilyevich Kostrov** — Grand Dr. in Engineering, Professor, Professor of the Department of Radio Engineering of the Murom Institute (branch) of the “Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs”<sup>1</sup>.

E-mail: [kostrov.46@mail.ru](mailto:kostrov.46@mail.ru)

**Konstantin Konstantinovich Khramov** — PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Radio Engineering of the Murom Institute (branch) of the “Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs”<sup>1</sup>.

E-mail: [hramovkk@gmail.com](mailto:hramovkk@gmail.com)

**Vyacheslav Petrovich Makarov** — PhD in Engineering, Deputy Chief Designer of JSC “NPO Lavochkina”<sup>2</sup>.

E-mail: [makarov951vyacheslav@yandex.ru](mailto:makarov951vyacheslav@yandex.ru)

<sup>1</sup>Address: 602264, Russian Federation, Vladimir region, Murom, Orlovskaya str., 23

<sup>2</sup>Address: 141402, Russian Federation, Moscow region, Khimki, Leningradskaya str., 24

**Abstract:** Active phased array antennas (APAA) are widely used in radar devices, including space-based synthetic aperture radar (SAR). For space-based pulse radars, the problem of reducing the effects of interference arising from range ambiguity and azimuthal ambiguity is relevant. The aim of the work is to assess the level of ambiguity interference in range and azimuth in space-based radar systems using an active phased array antenna with a rectangular aperture. A normal side view (strip mode) is considered, which is carried out using the X-band space radar. The paper evaluates the levels of ambiguity interference in range and azimuth in the field of view when shooting parameters change, and formulates requirements for reducing the level of ambiguity interferences. The necessary mathematical calculations are given. The calculations of the projec-

tion of the APAA directional pattern onto the Earth's surface are done. The achievable levels of interference ambiguity in azimuth and range for space radars are performed. It is noted that the achievable level of ambiguity interference in the azimuthal coordinate of  $-24$  dB is achieved provided that the pulse repetition frequency exceeds the width of the Doppler frequency spectrum by 40... 50%. The results obtained make it possible to assess the level of ambiguity interferences in range and azimuth in a space-borne SAR and to make demands on the need and level of additional suppression of them.

**Keywords:** synthetic aperture radar (SAR), space-borne SAR, range ambiguity interference, azimuth ambiguity interference, active phased array antenna (APAA), radiation pattern, Doppler spectrum.

*The work was partially supported by the Russian Science Foundation, project No. 23-29-10114*

### References

1. Antipov V.I., Goryainov V.T., Kulin A.N., Tolstov E.F., Titov M.P. et al. Digital synthetic aperture radars. Ed. by V.T. Goryainov. Moscow: Radio i svyaz, 1988. 304 p.
2. SAR digital signal processing. Ed. by E.F. Tolstov. Smolensk, VPVO WA Publishing house of Russian Armed Forces, 2005. 232 p.
3. Shkolny L.A., Tolstov E.F., Titov M.P. et al. Radar systems of aerial reconnaissance, decoding of radar images. Moscow: Publishing House of the VVIA named after Prof. N.E. Zhukovsky, 2008. 531 p.
4. Verba V.S., Neronskiy L.B., Osipov I.G., Turuk V.E. Space-based ground survey radar systems. Ed. by V.S. Verba. Moscow: Radiotekhnika, 2010. 680 p.
5. Kondratenkov G.S., Frolov A.Yu. Radiovision. Space-borne Earth Surveillance Radar Systems. Moscow: Radiotekhnika, 2005. 368 p.
6. Khramov K.K., Kostrov V.V. Achievable parameters of the X-band synthetic aperture radar based on small satellite. E3S Web Conf. 2023. Vol. 431. No. 02026. DOI: 10.1051/e3sconf/202343102026.
7. Grishin V.Yu., Kostrov V.V. Architecture of Tx/Rx modules of APAA for polarimetric radars. Promising technologies in the media of information transmission: Materials of the 14th International Scientific and Technical Conference. Vladimir: VISU, 2021. Pp. 48–54.
8. Khramov K.K., Smirnov M.S. Assessment of the level of ambiguity interference in the space-based RSA. 79th Scientific and Technical Conference of the St. Petersburg NTO RES named after A.S. Popov, dedicated to Radio Day: collection of reports. SPbSETU "LETI". St. Petersburg. 2024. Pp. 43–47.
9. Kostrov V.V., Rakitin A.V. Radar space segment of remote sensing of the Earth in 2023: state and prospects of development. Radio engineering and telecommunication systems. 2023. No. 4. Pp. 11–31. DOI 10.24412/2221-2574-2023-4-11-31
10. Karpov O.A., Rabochy A.N., Tolstov E.F., Fedorov V.S., Kostrov V.V. Problems of ambiguity in space SAR and Gold codes. Modern problems of remote sensing, radar, propagation and diffraction of waves. Materials of the All-Russian Open Scientific Conference. Murom: MI VISU, 2023. Pp. 375–384. DOI: 10.24412/2304-0297-2023-1-375-384
11. Khramov K.K., Makarov V.P., Kostrov V.V. Estimation of azimuth ambiguity of space-borne SAR using a circular mirror antenna. Modern problems of remote sensing, radar, propagation and diffraction of waves. Proceedings of the All-Russian Open Scientific Conference. Murom: MI VISU, 2024. Pp. 348–356. DOI: 10.24412/2304-0297-2024-1-348-356
12. Petrov A.S., Prilutsky A.A., Volchenkov A.C. Angular and azimuthal ambiguities of the signal received by the synthesized aperture space radar equipment. Bulletin of the JSC named after S.A. Lavochkin. 2019. No. 1. Pp. 39–47.
13. 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. 2020. Vol. 168. No. 107323. DOI: 10.1016/j.sigpro.2019.107323.
14. Jeon S-Y., Glatz F., Villano M.A. Waveform-Encoded SAR Implementation Using a Limited Number of Cyclically Shifted Chirps. Remote Sensing, 2021. Vol. 13(15). No. 3038. DOI: 10.3390/rs13153038