

## Проблемы неоднозначности в космических РСА и коды Голда

О.А. Карпов<sup>1</sup>, А.Н. Рабочий<sup>2</sup>, Е.Ф. Толстов<sup>1</sup>, В.С. Фёдоров<sup>1</sup>, В.В. Костров<sup>3</sup>

<sup>1</sup>АО «Аэрокон», 140187 г. Жуковский, Московская обл., ул. Жуковского, 1

<sup>2</sup>АО «ВПК «НПО Машиностроения»

143966, Московская область, г. Реутов, ул. Гагарина, д.33

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

<sup>3</sup>Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых  
602263 г.Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, 23

*В докладе рассмотрены вопросы выбора базовых параметров радиолокаторов с синтезированием апертуры (РСА) космического базирования при их работе на малых космических аппаратах. Дан анализ минимальных размеров антенны, обеспечивающих условия однозначного приема по азимуту и дальности. Рассмотрены вопросы использования кодовых последовательностей Голда для снижения уровня помех неоднозначности. Проведено математическое моделирование процедуры синтеза РЛИ в маршрутном режиме обзора при четырехкратной неоднозначности по дальности.*

*Ключевые слова: радиолокатор с синтезированием апертуры (РСА), радиолокационное изображение (РЛИ), помеха неоднозначности, квазиортогональные сигналы, коды Голда*

## Problems of ambiguity in space SAR and Gold codes

O.A. Karpov<sup>1</sup>, A.N. Rabochiy<sup>2</sup>, E.F. Tolstov<sup>1</sup>, V.S. Fedorov<sup>1</sup>, V.V. Kostrov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>JSC «Aerocon», Zhukovsky

<sup>2</sup>JSC «MIC «NPO Mashinostroyeniya», Reutov

<sup>3</sup>Murom Institute (branch) Vladimir State University

*The report examines the issues of choosing the basic parameters of space-based synthetic aperture radars (SAR) when they work on small spacecraft. The analysis of the minimum antenna sizes providing conditions for unambiguous reception in azimuth and range is given. The issues of using Gold code sequences to reduce the level of ambiguity interference are considered. Mathematical modeling of the procedure for the synthesis of radar image in the strip mode of the survey with a fourfold ambiguity in range is carried out.*

*Keywords: synthetic aperture radar (SAR), radar image (RI), ambiguity interference, quasi-orthogonal signals, Gold codes*

## Введение

Наиболее распространённый тип современного космического радиолокатора с синтезированием апертуры антенны (РСА) – либо радиолокатор с активной фазированной антенной решеткой (АФАР), либо с сосредоточенным источником излучения и отражателем (гибридные зеркальные антенны). Такое положение позволяет обеспечить в  $X$  и  $S$  диапазонах очень приличный уровень шумового эквивалента при разрешении около метра порядка минус 20 дБ в  $X$  и минус 14 дБ в  $S$  диапазонах [1–3].

Вместе с тем настоящий этап развития радиолокаторов с синтезированием апертуры антенны (РСА), применяемых на космических аппаратах (КА), в том числе КА дистанционного зондирования земной поверхности из космоса (ДЗЗ), характеризуется тенденцией к уменьшению размеров антенны КА, что приводит к

уменьшению габаритов, а значит и снижению веса самого КА [3–7]. Поскольку вес полезной нагрузки и системы управления КА существенным образом влияет на стоимость запуска, данная тенденция способствует повышению экономической эффективности функционирования космической отрасли.

Вместе с тем при снижении габаритов антенны (и сопутствующем расширении ширины диаграммы направленности по азимутальной и угломестной координатам) начинают проявляться помехи неоднозначности. Данный класс помех ухудшает условия высококачественного дешифрирования снимков [1], существенно снижает достоверность получаемых радиолокационных изображений (РЛИ) [2]. В поляриметрических РСА помехи неоднозначности заметно снижают точность оценки поляризационной матрицы рассеивания [8], особенно кроссовых компонентов, имеющих низкое отношение сигнал-шум. Снижению уровня помех неоднозначности в современных РСА уделяется повышенное внимание.

### Минимальный размер антенны, обеспечивающий условия однозначного приема по азимуту и дальности

Рассмотрим вопрос минимизации размера антенны космического РСА, построенного на базе АФАР. Условия однозначного приема по азимуту и дальности определяются следующей системой неравенств

$$\frac{2W_{КА}\theta_a k_a}{\lambda} \leq F_n \leq \frac{C}{2\Delta R k_u}, \quad (1)$$

где  $W_{КА}$  – скорость КА относительно Земли;  $\theta_a \approx \lambda/d_a$  – ширина диаграммы направленности антенны (ДНА) по азимуту;  $d_a$  – азимутальный раскрыв антенны;  $\lambda$  – длина волны;  $F_n$  – частота повторения;  $C$  – скорость света;  $k_a$  – коэффициент избыточности по азимуту;  $k_u$  – коэффициент избыточности по дальности,  $k_u = 1, 2, \dots, 1, 4$ ;  $\Delta R = \theta_u R \cdot \text{tg} \gamma_n$  – интервал наклонной дальности, на котором присутствует отраженный от рассматриваемой поверхности сигнал (см. рис. 1).

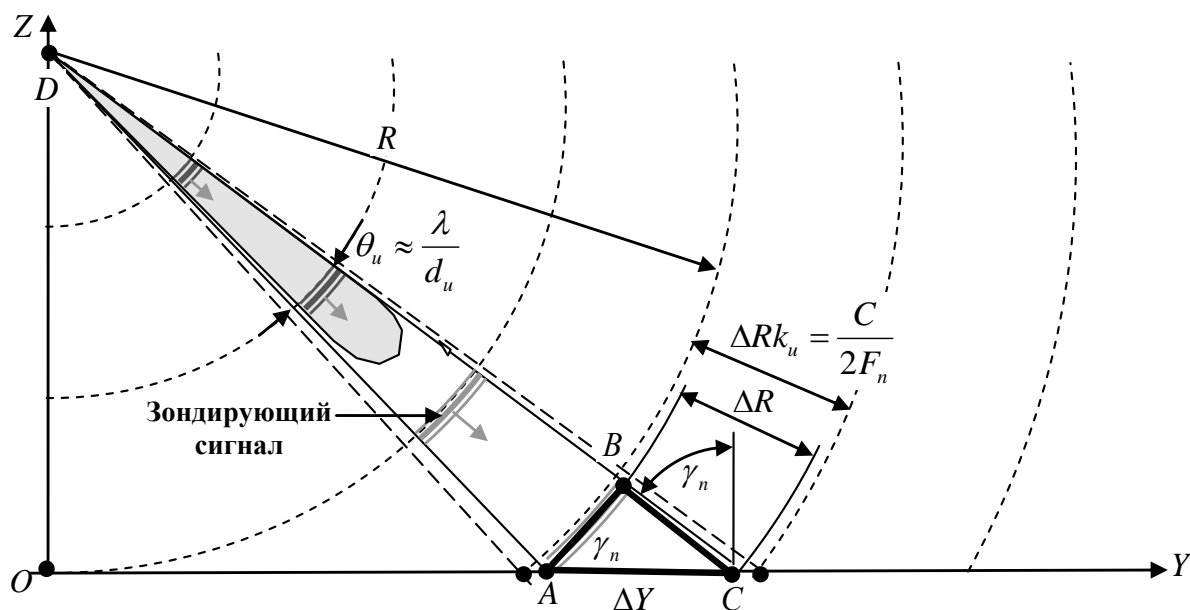


Рис. 1. Распространение сигнала в плоскости поперечной дальности

При маршрутной съемке допустимо выбирать  $k_a = 1$ . В прожекторном (Spot) и обзорном (ScanSar) режимах коэффициент избыточности по азимуту находится в пределах  $1 < k_a \leq 2$ . На рис. 1 также приняты обозначения:  $\theta_u \approx \lambda/d_u$  – ширина ДНА по углу места,  $d_u$  – угломестный раскрыв антенны,  $R$  – дальность от КА до зоны съемки.

Для учета при расчетах кривизны Земли рассмотрим решение треугольника  $O_zDA$  (рис. 2). По теореме косинусов рассчитаем дальность от КА до зоны съемки  $R^2 = R_{KA}^2 + R_Z^2 - 2R_{KA}R_Z \cos \alpha$ , где  $R_{KA} = R_Z + H_0$  – расстояние от КА до центра Земли,  $H_0$  – высота орбиты КА,  $R_Z$  – радиус Земли.

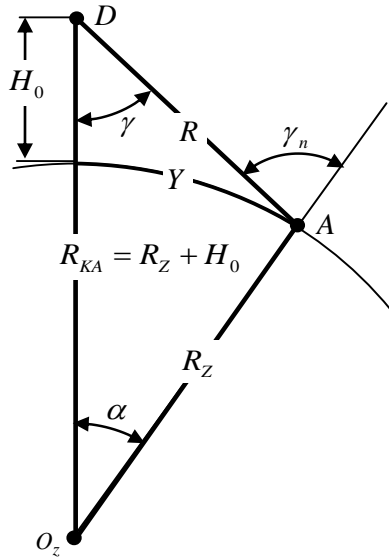


Рис. 2. Учет кривизны земной поверхности в зоне обзора

Из теоремы синусов следует соотношение  $\frac{\sin \gamma}{R_Z} = \frac{\sin(180^\circ - \gamma_n)}{R_{KA}} = \frac{\sin \alpha}{R}$ , где  $\gamma$  – угол визирования (угол отклонения луча ДНА от надира). Далее по теореме углов треугольника получаем  $\gamma + \alpha = \gamma_n$ .

Таким образом, с учетом кривизны земной поверхности получаем:

– угол падения луча ДНА от местной вертикали

$$\gamma_n = \arccos\left(\frac{2R_Z H_0 + H_0^2 - R^2}{2R_Z R}\right) = \arcsin\left(\frac{R_Z + H_0}{R_Z} \sin \gamma\right),$$

– дальность от подспутниковой точки до зоны съемки по земной поверхности

$$Y = R_Z \alpha = R_Z [\gamma_n - \gamma]_{\text{пад}}.$$

Приравняв левую и правую части в (1), получим

$$\frac{2W_{KA} k_a}{d_a} = \frac{C d_u}{2\lambda R k_u} \text{ctg}(\gamma_n),$$

откуда следует

$$S_{\min}(R) = \frac{4W_{KA} \lambda R k_u k_a}{C} \text{tg}\left(\arccos\left(\frac{2R_Z H_0 + H_0^2 - R^2}{2R_Z R}\right)\right), \quad (2)$$

или

$$S_{\min}(\gamma) = \frac{4W_{KA} \lambda k_u k_a}{C} r(\gamma) \text{tg}\left(\arcsin\left(\frac{R_Z + H_0}{R_Z} \sin \gamma\right)\right), \quad (3)$$

где  $r(\gamma) = \sqrt{(R_Z + H_0)^2 + R_Z^2 - 2R_Z(R_Z + H_0) \cos(\gamma_n - \gamma)}$ .

Соотношения (2), (3) определяют минимальную площадь раскрыва прямоугольной антенны РСА  $S_{\min} = d_a d_u$ , при которой еще выполняется условие однозначного приема по азимуту и дальности (1). Для антенны с круглой апертурой диаметр  $D_{\min} = d_a = d_u$  будет определяться формулой  $D_{\min} = \sqrt{S_{\min}}$ .

Графики зависимости  $S_{\min}(\gamma)$ , рассчитанные по формуле (3) при  $\lambda = 0,03$  м,  $W_{КА} = 7500$  м/с,  $k_a = 2$ ,  $k_u = 1,2$  для двух значений высоты орбиты  $H_0 = 500$  и  $700$  км, представлены на рис. 3.

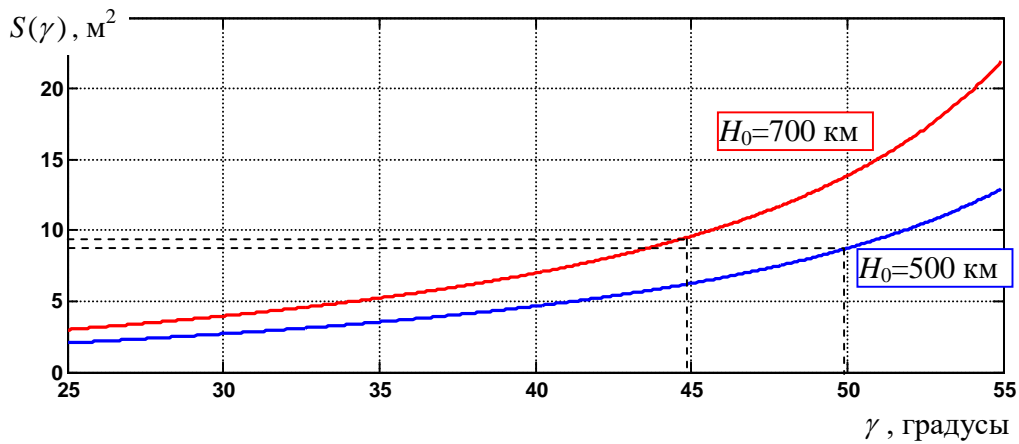


Рис. 3. Минимальная площадь антенны

Для примера рассмотрим один из проектных вариантов современного космического РСА с АФАР  $X$  диапазона, некоторые параметры которого представлены в таблице 1. Эти параметры РСА были положены в основу расчетов базовых режимов съемки.

Таблица 1. Исходные параметры для расчета характеристик РСА  $X$  диапазона

Параметр	Значение
Высота орбиты КА, км	525
Скважность, ед	8
Потери, дБ	4 дБ (на обработку)
Длина волны на центральной частоте, м	0,0314
Полоса рабочих частот для: детальный режим (ДР) и маршрутный режим (МР) высокого разрешения (МРВ) $\Delta f$ , МГц	300
МР среднего и низкого разрешения МРС, МРН и СР $\Delta f$ , МГц	100
Размер антенны, м	$3,43 \times 2,28$
Ширина ДН по углу места, при установке луча по нормали, градус	$0,78 \pm 0,1$
Ширина ДН по азимуту, при установке луча по нормали, градус	$0,46 \pm 0,05$
Число каналов АФАР, шт.	240
Импульсная мощность излучаемая 1-м каналом, Вт	16
Коэффициент шума, дБ	2,5
Углы электронного сканирования луча по углу места, градус	$\pm 15$
Углы электронного сканирования луча по азимуту, градус	$\pm 0,7$
Эквивалентная изотропно излучаемая мощность (ЭИИМ) в максимуме диаграммы направленности при установке луча: по нормали, дБВт	$78,6 \pm 0,5$
при отклонении по азимуту на предельный угол, дБВт	$78,0 \pm 0,5$
при отклонении по углу места на предельный угол, дБВт	$77,9 \pm 0,5$
Параметр качества на прием (G/Кш) в максимуме диаграммы направленности при установке луча: по нормали, дБВт	$40,3 \pm 0,5$
при отклонении по азимуту на предельный угол, дБВт	$40,0 \pm 0,5$
при отклонении по углу места на предельный угол, дБВт	$39,5 \pm 0,5$

Анализ проведенных расчетов позволяет сформулировать следующие неутешительные выводы, которые характеризуют технические противоречия при проведении многокритериальной оптимизации. Прежде всего отметим, что для обеспечения однозначного приема по дальности и азимуту и получения максимального качества формируемого РЛИ при полосе обзора по горизонтальной дальности до 400 км РСА сантиметрового диапазона длин волн для КА, работающего на орбитах до 700 км (работа на углах  $\gamma = 25^\circ \dots 45^\circ$ ), требуется антенная система площадью не менее  $9,5 \text{ м}^2$  (см. рис. 3). При работе на орбитах до 500 км ( $\gamma = 25^\circ \dots 50^\circ$ ) площадь антенны должна составлять не менее  $8,75 \text{ м}^2$  (см. рис. 3).

Для обеспечения разрешающей способности по азимуту в маршрутном режиме не хуже 2 м одна из сторон антенной системы должна быть не более 4 м (без учета компрессии ДНА за счет движения КА и кривизны Земли). С учетом размера выбранных антенных панелей с приемо-передающими модулями (ППМ)  $686 \times 570$  мм приемлемый размер антенны должен составлять  $3,43 \times 2,28$  м (количество панелей с ППМ  $5 \times 4$ ). При этом площадь антенны составит порядка  $7,8 \text{ м}^2$ . Следовательно, полученные проектные размеры антенной системы не обеспечивают требуемых показателей, оптимальных с точки зрения условий однозначного приема по азимуту и дальности по соотношению (1).

В рассматриваемом случае недостаток площади сравнительно небольшой (около  $1 \text{ м}^2$ ), поэтому его можно без существенных потерь качества компенсировать использованием межпериодной смены знака в законе изменения частоты сигнала с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ).

В обзорном режиме (ScanSAR) при заданном разрешении по азимуту (путевой дальности)  $\Delta_{x0} = 15$  м и  $d_a = 3,43$  м может быть организовано  $L = 8$  полос захвата при ширине каждой по наклонной дальности  $\Delta R = 14,3$  км. Таким образом, в обзорном режиме при заданном разрешении возможно формирование полосы захвата не более 114 км, что также не может считаться наилучшим показателем.

Отсюда видно, что минимизация размера антенны космического РСА для обеспечения однозначного приема по азимуту и дальности является достаточно сложно реализуемой задачей, решение которой существенно влияет и на другие тактико-технические характеристики РСА. Эффективным методом снижения помех неоднозначности является применение сложных сигналов с различными видами внутриимпульсной модуляции, которые обладают свойством ортогональности или квазиортогональности. Один из таких сигналов – сигнал с линейной частотной модуляцией – уже упоминался выше. Последовательная смена знака скорости изменения частоты зондирующих импульсов с ЛЧМ позволяет снизить уровень помех на 27...40 дБ при изменении базы в пределах 350...10000. Известно, что ЛЧМ сигналы обладают хорошими изобразительными свойствами, позволяют получить высококачественные РЛИ, однако с точки зрения подавления помех наложения их возможности ограничены, поскольку в ансамбле содержится всего два сигнала. Более широким набором квазиортогональных сигналов обладают фазокодоманипулированные (ФКМ) сигналы, использующие для модуляции различные псевдослучайные последовательности. Широко используемые  $m$ -последовательности позволяют получить подавление 16...31 дБ при значениях базы 511...16383, причем число «хороших» порождающих полиномов в 11...18 раз меньше значения базы сигнала. Как видим, ФКМ сигналы заметно превосходят ЛЧМ сигналы по количеству в ансамбле, однако уступают им по качеству подавления помех неоднозначности второго порядка. Число ФКМ сигналов в ансамбле можно существенно увеличить, если использовать коды Голда. Они обеспечивают генерацию ансамбля уникальных сигналов, по

количеству практически равного базе сигнала, что дает возможность в типовых режимах использовать для зондирования весь ансамбль.

### Некоторые свойства последовательностей Голда

Коды Голда представляют собой пример ансамбля ФКМ сигналов и отличаются небольшим уровнем взаимной корреляции между последовательностями в ансамбле, причем периодическая взаимная корреляционная функция (ПВКФ) может принимать только 3 значения [9, 10]. Для генерации кода Голда порядка  $m$  используется пара последовательностей максимальной длины ( $m$ -последовательностей), причем следует выбирать особые пары  $m$ -последовательностей одинаковой длины  $2^m - 1$ , так называемые предпочитаемые пары [11]. Две  $m$ -последовательности, составляющие такую пару, включаются в ансамбль. Остальные члены ансамбля определяются как результат побитового сложения этих двух последовательностей по модулю 2, с дальнейшим циклическим сдвигом одной из последовательностей. Таким образом, число кодов, составляющих ансамбль Голда, равно  $2^m + 1$ . Ансамбли кодов Голда существуют при целых значениях порядка  $m$ , не кратных 4. Для  $m$ , кратных 4, не существует кодов Голда, однако имеются подобные им коды, для которых ПВКФ между последовательностями ансамбля может принимать четыре значения. Ансамбль последовательностей называется  $(l, v, \sigma)$  – ансамблем, где  $l$  – длина последовательностей,  $v$  – объем ансамбля, а  $\sigma$  – максимальная корреляция между последовательностями внутри ансамбля. Ансамбль кодов Голда является

$(2^m - 1, 2^m + 1, 2^{\lfloor \frac{m+2}{2} \rfloor} + 1)$  – ансамблем, а ПВКФ между двумя любыми последовательностями ансамбля может принимать не более трех значений  $(\pm 2^{\lfloor \frac{m+2}{2} \rfloor} - 1, -1)$ . Если нормировать уровни ВКФ на величину  $N = 2^m - 1$ , получим уровни максимальных значений ПВКФ:

$$R_{\max}^{(p)} = \begin{cases} (2\sqrt{N+1} + 1)/N, & m \equiv 0 \pmod{2}, \\ (\sqrt{2N+1} + 1)/N, & m \equiv 1 \pmod{2}. \end{cases} \quad (4)$$

В апериодическом случае максимальные значения апериодической взаимной корреляционной функции (АВКФ) несколько выше. Максимальные уровни периодических ВКФ  $q = 20 \lg R_{\max}^{(p)}$  и примерные уровни превышения апериодических ВКФ над периодическими  $r = 20 \lg (R_{\max}^{(a)} - R_{\max}^{(p)})$  указаны в таблице 2.

**Таблица 2. Максимальные уровни ПВКФ и превышение уровней АВКФ над ПВКФ в децибелах**

$m$	5	6	7	9	10	11	13	14	15
$N$	31	63	127	511	1023	2047	8191	16383	32767
$q$	-10,7	-11,4	-17,5	-23,8	-23,9	-30,0	-36,1	-36,1	-42,1
$r$	0,5÷1	0,5÷1	2÷2,5	2,5÷4	2,5÷3	4÷5	5÷5,5	3÷3,5	5,5÷6

Как видим из данных таблицы 2, для кода нечетного порядка уровень ПВКФ практически такой же, как для следующего за ним кода четного порядка. С другой стороны, у кодов Голда четных порядков меньше превышение максимального уровня АВКФ над максимальным уровнем ПВКФ. Кроме того, у кодов Голда четных порядков относительно большие (не равные -1) значения ПВКФ встречаются вдвое реже, чем у

кодов Голда нечетных порядков. В таблице 3 приведены значения усредненных частот появления каждого из трех значений ПВКФ для разных порядков [9–11].

**Таблица 3. Усредненные частоты появления каждого из трех значений ПВКФ**

четные m	значение ПВКФ	-1	$2^{(m+2)/2} - 1$	$-2^{(m+2)/2} - 1$
	частота	75%	12,5%	12,5%
нечетные m	значение ПВКФ	-1	$2^{(m+1)/2} - 1$	$-2^{(m+1)/2} - 1$
	частота	50%	25%	25%

Это свойство ПВКФ влияет и на распределение значений апероидических ВКФ, так что в четном случае относительно больших значений ВКФ будет примерно вдвое меньше, чем в нечетном случае. Это должно способствовать подавлению корреляционного шума при дальнейшей обработке сигнала по азимуту. Отметим также, что для целей снижения помех неоднозначности могут использоваться коды порядков, кратных 4 (“Goldlikecodes”), однако их ПВКФ являются по уровням четырехзначными.

#### **Результаты моделирования использования кодов Голда в случае неоднозначности по дальности**

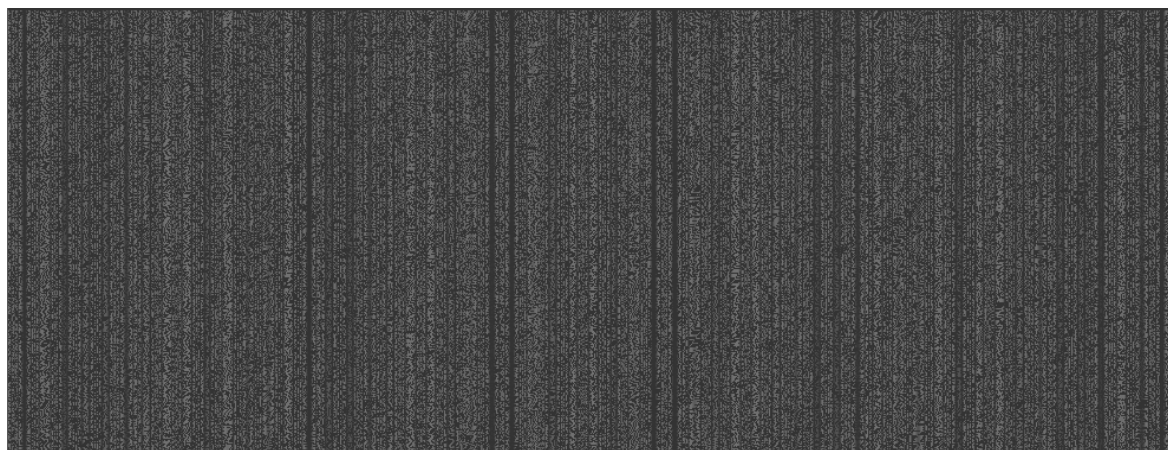
С целью проверки корректности процедур формирования и обработки в случае применения радиосигналов Голда было проведено математическое моделирование. При моделировании реализован нормальный боковой обзор, а в космическом РСА использована одна секция из пяти, которые содержит АФАР. Следует отметить основные характеристики, связанные с неоднозначностью. Частота зондирования 20 кГц и диапазон углов места  $15^\circ \dots 25^\circ$  выбраны таким образом, что обеспечивается возникновение четырёхкратной неоднозначности по дальности, шумовой эквивалент во всём диапазоне углов менее минус 20 дБ. Ширина полосы захвата составила 30 км при ширине зоны неоднозначности 7,5 км. В качестве модели зондирующих сигналов использовалась комплексная огибающая радиосигналов, модулированных с помощью кодов Голда с базой 2047. Для наглядности получаемых результатов уровни эхосигналов всех целей предполагаются одинаковыми. Ниже показаны результаты исследования работы такого РСА, начиная с формирования радиоголограмм и заканчивая построением полного РЛИ.

Начнём рассмотрение с радиоголограмм. На рис. 4а показана радиоголограмма одиночной точечной цели (ОТЦ), а на рис. 4б – радиоголограмма с четырёхкратной неоднозначностью. По существу, радиоголограмма рис. 4б представляет собой сумму четырёх радиоголограмм, образованных отражёнными сигналами от четырех зон неоднозначности. В 1-ой зоне неоднозначности содержится одна ОТЦ. Во второй зоне неоднозначности расположено 3 одиночных точечных цели, причем 2 из них находятся на одинаковой дальности, отстоят от первой на 30 дискрет, близко расположены, но разрешимы по азимутальной координате. В 3-ей зоне содержится 6 точечных целей и, наконец, в 4-ой зоне – 10 одиночных точечных целей. О пространственном расположении этих 10 точечных целей можно судить по рис. 5, где показано РЛИ, синтезированное только для отдельно взятой 4-ой зоны без дополнительных помех неоднозначности.

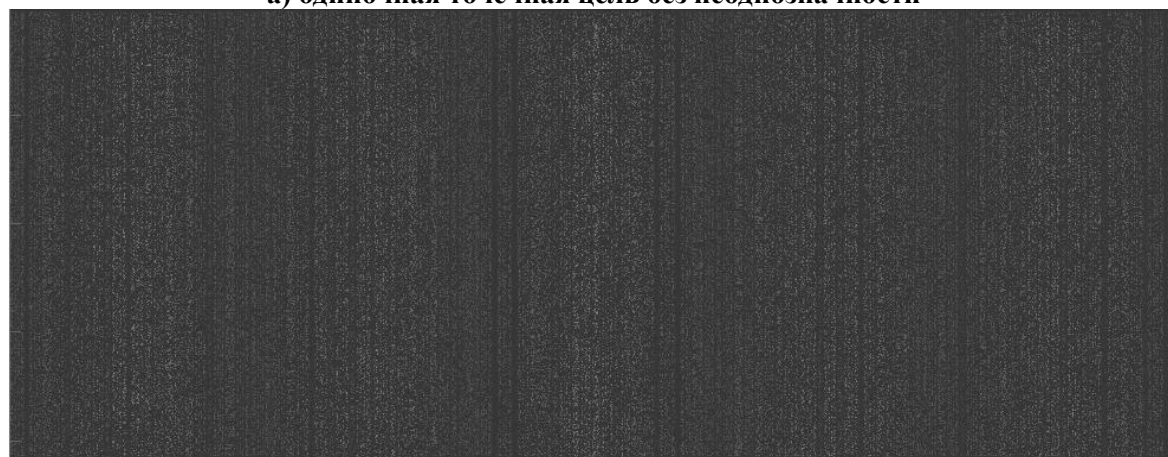
Далее представлены результаты обработки одной и той же радиоголограммы, показанной на рис. 4б. На рис. 6 показаны радиолокационные изображения, синтезированные из этой радиоголограммы. Поскольку каждая зона неоднозначности облучалась своим набором сигналов Голда, удалось получить РЛИ для каждой зоны неоднозначности, т.е. из одной и той же радиоголограммы (рис. 4б) можно вычлени-

РЛИ каждой из зон. Чтобы получить РЛИ всей полосы захвата достаточно убрать пробелы между РЛИ всех зон неоднозначности. На рис. 7 представлены трехмерные представления модулей сигналов (в дБ относительно максимального значения) РЛИ каждой из зон неоднозначности.

На всех радиоголограммах и РЛИ по горизонтали представлена азимутальная координата, по вертикали – дальностная.



**а) одиночная точечная цель без неоднозначности**



**б) четырёхкратная неоднозначность**

**Рис. 4. Радиоголограммы РСА**



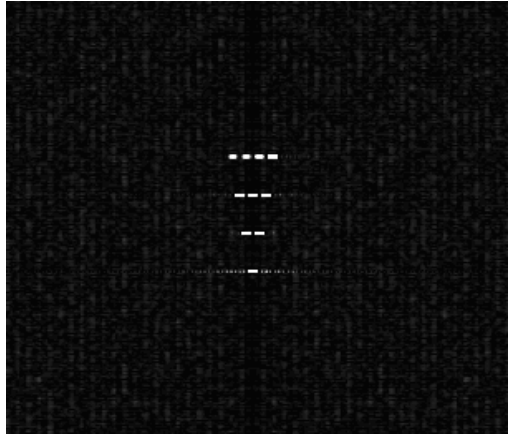
**Рис. 5. Расположение точечных целей в четвёртой зоне неоднозначности**

Прежде, чем делать выводы, следует напомнить, что в модели РСА с малогабаритной АФАР не учтён ряд процессов и особенностей космических РСА, главными из которых являются:

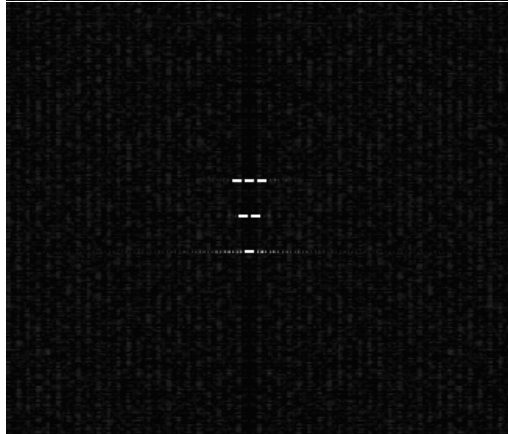
- 1) внутренний шум приёмного канала РСА;
- 2) миграции сигналов по каналам дальности при детальном разрешении;
- 3) разные параметры фокусировки по зонам неоднозначности.



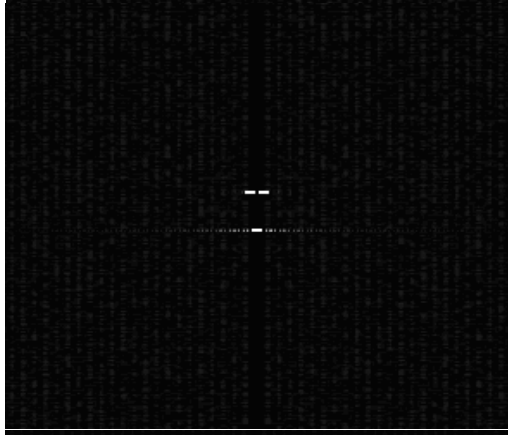
4-ая зона



3-я зона



2-я зона



1-я зона

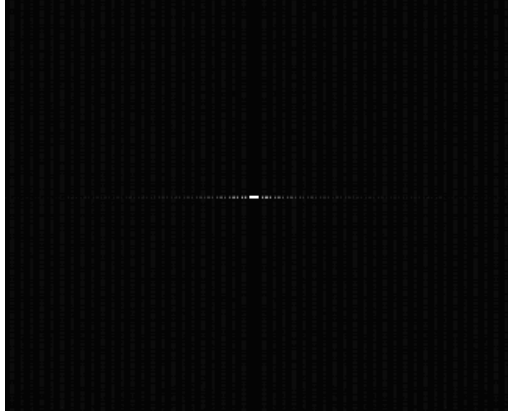


Рис. 6. РЛИ по зонам неоднозначности

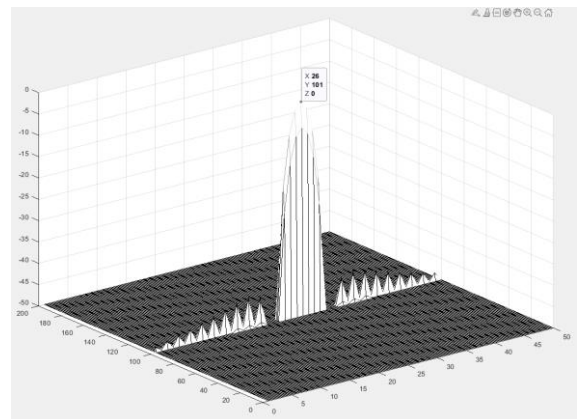
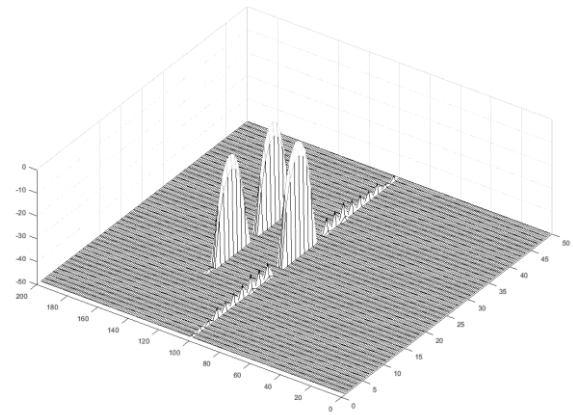
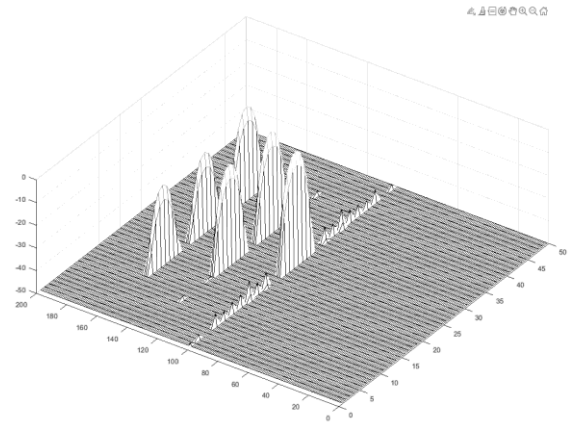
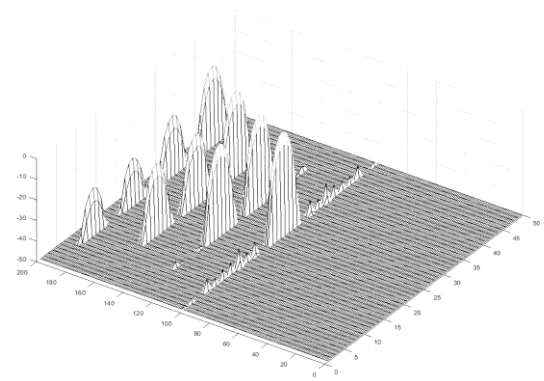


Рис. 7. Нормированный сигнал РЛИ четырёх зон неоднозначности

Однако результаты моделирования впечатляют. Сам по себе факт, что при 10 ОТЦ боковые лепестки по дальности в четвёртой зоне неоднозначности после формирования РЛИ находятся на уровне лучше минус 50 дБ, подтверждает возможность формирования высококачественного РЛИ в варианте РСА с одной секцией вместо пяти. Кроме того, четырёхкратная система неоднозначности устойчиво преодолевается в случае применения зондирующего сигнала в виде радиосигналов Голда.

### Литература

1. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений / Под ред. Л.А. Школьного. – М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. – 531 с.
2. 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.
3. Внотченко С.Л., Коваленко А.И., Риман В.В., Смирнов С.Н., Шишанов А.В. Возможности создания широкозахватных радиолокаторов с синтезированной апертурой для малых космических аппаратов // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2013. Т.134, № 3, с. 21–26.
4. Yang X.V., Patel V.M., Petropulu A.P. Spaceborne SAR antenna size reduction enabled by compressive sampling // 2016 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP), Washington, DC, USA. 2016. Pp. 297-301.
5. Freeman A. Design Principles for Smallsat SARs // 32nd Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2018, Logan, UT, 2018.
6. Голов Н.А., Усачев В.А., Корянов В.С.Вл., 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. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. №5. С.1-20.
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.
8. Zhao P., Deng Y., Wang W., Zhang Y., Wang R. Ambiguity Suppression Based on Joint Optimization for Multichannel Hybrid and  $\pm \pi/4$  Quad-Pol SAR Systems // Remote Sens. 2021, 13, 1907.
9. Gold R. Maximal recursive sequences with 3-valued recursive cross-correlation functions (corresp.) // IEEE Trans. Inform. Theory. 1968. Vol. 14. No. 1. Pp.154-156.
10. Дядюнов Н.Г., Сенин А.И. Ортогональные и квазиортогональные сигналы. Под ред. Е.М. Тарасенко. – М.: Связь, 1977. – 224 с.
11. Кузнецов В.С., Шевченко И.В., Волков А.С., Солодков А.В. Генерация ансамблей кодов Голда для систем прямого расширения спектра // Труды МАИ. Вып. № 96. 18 с.