

## СВОЙСТВА КОДОВ ГОЛДА И НЕОДНОЗНАЧНОСТЬ В РСА

**Толстов Евгений Федорович**доктор технических наук, профессор, начальник отдела АО «Аэрокон»<sup>1</sup>.E-mail: [e\\_tolstov@mail.ru](mailto:e_tolstov@mail.ru)**Федоров Владимир Сергеевич**кандидат технических наук, начальник лаборатории АО «Корпорация «Фазотрон-НИИР»<sup>2</sup>.E-mail: [fedorov@phasotron.com](mailto:fedorov@phasotron.com)<sup>1</sup>Адрес: 140187, Российская Федерация, г. Жуковский, Московская обл., ул. Жуковского, д. 1.<sup>2</sup>Адрес: 115516, Российская Федерация, г. Москва, б-р Кавказский, д. 59.

**Аннотация:** В статье рассматривается ряд вопросов, связанных с учётом явления неоднозначности при построении радиолокационных изображений с использованием РЛС с синтезированием апертуры антенны. В частности, описан подход, предполагающий использование фазоманипулированных сигналов, а именно ансамблей последовательностей Голда при наличии неоднозначности по дальности. Приводится методика расчёта параметров ансамбля кодов Голда, приведён пример расчёта параметров и результаты моделирования.

**Ключевые слова:** радиолокационная станция с синтезированием апертуры, радиолокационное изображение, неоднозначность по дальности, фазоманипулированный сигнал, коды Голда.

**Введение**

Настоящий этап развития радиолокационных станций 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. Поскольку вес полезной нагрузки существенным образом влияет на стоимость запуска КА, данная тенденция способствует повышению экономической эффективности функционирования космической отрасли.

Хорошо известна связь между размером  $d_a$  антенны РЛС, длиной волны  $\lambda$  и шириной луча диаграммы направленности антенны (ДНА)  $\theta_a \approx \lambda/d_a$  [1–4]. Таким образом, уменьшение размера антенны приводит, вообще говоря, к расширению ДНА. Следовательно, чтобы сохранить плотность энергии облучения единицы подстилающей поверхности и обеспечить требуемый уровень чувствительности, требуется повысить излучаемую антенной мощность. Развитие технологии производства

в последние годы позволило значительно увеличить мощность приёмопередающих модулей (ППМ) современных АФАР, и это ставит на повестку дня обсуждение проблем, связанных с особенностями обработки сигналов в РСА малых КА.

Характерная особенность обработки сигналов в РСА состоит в том, что работать приходится в условиях проявления неоднозначности принимаемого РЛС сигнала по основным координатам — наклонной дальности и азимуту. Эта неоднозначность связана с периодической структурой зондирующего сигнала, представляющего собой последовательность одинаковых импульсов, следующих через равные промежутки времени и, как правило, модулированных по частоте или по фазе. Неоднозначность есть нарушение взаимно однозначного соответствия между координатой (задержкой или доплеровской частотой) принятого сигнала в системе обработки и положением соответствующего объекта на облучаемой поверхности. Зоной однозначности называется интервал значений наклонной дальности или азимута, на котором взаимно однозначное соответствие имеет место.

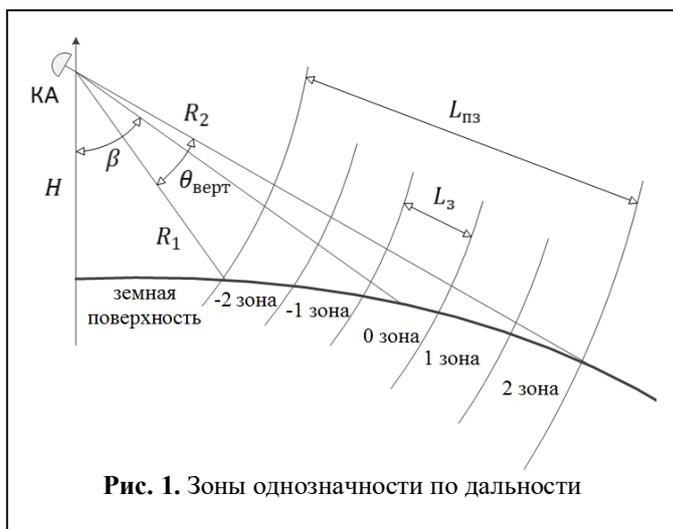


Рис. 1. Зоны однозначности по дальности

**Неоднозначность по дальности при обработке принятого сигнала в РСА**

Рассмотрим механизм появления неоднозначности по дальности. Ширина зоны однозначности составляет  $L_3 = \frac{c}{2F_p}$ , где  $c$  — скорость распространения радиоволн,  $F_p$  — частота повторения импульсов. Обозначим через  $R_1$  и  $R_2$  расстояния от фазового центра антенны (ФЦА) до, соответственно, ближней и дальней границы полосы захвата (см. рис. 1). Интервал наклонных дальностей  $L_{пз} = R_2 - R_1$  может превышать ширину зоны однозначности по дальности  $L_3$ . В этом случае интервал  $L_{пз}$  разбивается на  $N_{одн} = \left[ \frac{L_{пз}}{L_3} \right] + 1$  зон однозначности.

Зоны нумеруются целыми числами от  $-\left[ \frac{N_{одн} - 1}{2} \right]$  до  $\left[ \frac{N_{одн}}{2} \right]$ . Через  $[x]$  мы обозначаем целую часть действительного числа  $x$ . На рис. 1  $N_{одн} = 5$ .

В области наблюдения, размер которой пропорционален длительности периода повторения импульсов, присутствуют сигналы, отражённые от участков подстилающей поверхности, находящихся во всех зонах однозначности, попадающих внутрь полосы захвата. Возникает задача определения для каждого наблюдаемого сигнала области однозначности,

содержащей участок поверхности, от которого отразился данный сигнал.

**Фазоманипулированные сигналы, корреляционные функции**

В современных РЛС для повышения разрешения повсеместно применяются широкополосные зондирующие сигналы. Большую группу таких сигналов составляют так называемые фазоманипулированные сигналы (ФМ-сигнал, ФМС) [5, 6]. Такой сигнал представляет собой высокочастотный импульс относительно большой длительности, состоящий из отдельных частей (элементов) малой длительности. Фаза сигнала при переходе от одного элемента к другому изменяется скачком, в соответствии с выбранным кодом. Комплексная огибающая ФМ-сигнала

$$U(t) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n u_0(t - n\Delta), \quad (1)$$

где  $u_0(t)$  — комплексная огибающая элемента ФМС;  $a_n$  — комплексная амплитуда  $n$ -го элемента, причём  $|a_n| = const$ ;  $\Delta$  — длительность элемента.

Последовательность амплитуд  $\{a_n\}_{n=0}^{N-1}$  называется кодовой последовательностью ФМС. Сигнал, определённый выражением (1), называют импульсным или финитным ФМС, в отличие от периодического ФМС, у которого кодовая последовательность периодична с периодом  $N$ . Если члены кодовой последовательности принимают только значения  $\pm 1$ , ФМ-сигнал называется бинарным.

Обработка отражённого сигнала по дальности, оптимальная по отношению сигнал-шум, заключается в сжатии при помощи согласованного фильтра на каждом периоде повторения. Импульсная характеристика (ИХ) согласованного фильтра представляет собой ФМ-сигнал, кодовая последовательность которого повторяет код зондирующего сигнала в обратном порядке, и комплексно сопряжена по отношению к нему. Результат обработки [5] вы-

ражается через аperiodическую взаимно корреляционную функцию (АВКФ) кодовых последовательностей отражённого и зондирующего сигналов, которая для бинарных ФМС с  $|a_n|=1$  записывается следующим образом:

$$R_{kl}^{(a)}(m) = \frac{1}{N} \sum_{n=m}^{N-1} a_{kn} a_{ln-m} \quad \text{при } m \geq 0$$

или (2)

$$R_{kl}^{(a)}(m) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1+m} a_{kn} a_{ln-m} \quad \text{при } m < 0.$$

Здесь  $a_{kn}$  —  $n$ -й элемент кодовой последовательности  $k$ -го ФМС.

Для периодических ФМС вводится периодическая ВКФ (ПВКФ):

$$R_{kl}^{(p)}(m) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} a_{kn} a_{ln-m}, \quad (3)$$

где  $\{a_{kn}\}_{n=-\infty}^{\infty}$  — периодическая с периодом  $N$  кодовая последовательность  $k$ -го ФМС. Как АВКФ, так и ПВКФ суть симметричные функции  $R_{kl}(m) = R_{kl}(-m)$ .

При работе в условиях неоднозначности по дальности важно различать сигналы, отражённые от участков подстилающей поверхности, принадлежащих различным зонам однозначности. Для этого при зондировании нередко используются наборы из нескольких ФМС (в количестве, не меньшем числа обрабатываемых зон однозначности) со слабой взаимной корреляцией. Если каждый излучаемый импульс модулируется соответствующим кодом из набора, то при обработке принятого сигнала можно выделить те составляющие, которые относятся к различным зонам однозначности.

#### Некоторые свойства последовательностей Голда

Коды Голда [7–9] представляют собой пример ансамбля ФКМ сигналов и отличаются небольшим уровнем взаимной корреляции между последовательностями в ансамбле, причём ПВКФ может принимать только 3 значения. Для генерации кода Голда порядка  $m$  исполь-

зуется пара последовательностей максимальной длины ( $m$ -последовательностей), причём следует выбирать особые пары  $m$ -последовательностей одинаковой длины  $2^m - 1$ , так называемые предпочитаемые пары. 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  $\left(2^m - 1, 2^m + 1, 2^{\lfloor \frac{m+2}{2} \rfloor} + 1\right)$  — ансамблем, а

периодическая взаимная корреляция (ПВКФ) между двумя любыми последовательностями ансамбля может принимать не более трёх значений  $\left\{\pm 2^{\lfloor \frac{m+2}{2} \rfloor} - 1, -1\right\}$ . Если нормировать

уровни ВКФ на величину  $N = 2^m - 1$ , получим уровни максимальных значений ПВКФ:

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

В аperiodическом случае максимальные значения ВКФ несколько выше. Максимальные уровни периодических ВКФ и примерные уровни превышения аperiodических ВКФ над периодическими указаны в таблице 1.

**Таблица 1.** Максимальные уровни ПВКФ и превышение уровней АВКФ над ПВКФ в децибелах  $q = 20\lg R_{\max}^{(p)}$  и  $r = 20\lg(R_{\max}^{(a)} - R_{\max}^{(p)})$ .

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

**Таблица 2.** Усреднённые частоты появления каждого из трёх значений ПВКФ.

чётные <i>m</i>	значение ПВКФ	-1	$2^{(m+2)/2} - 1$	$-2^{(m+2)/2} - 1$
	частота	75%	12,5%	12,5%
нечётные <i>m</i>	значение ПВКФ	-1	$2^{(m+1)/2} - 1$	$-2^{(m+1)/2} - 1$
	частота	50%	25%	25%

Как видим из данных в таблице 1, для кода нечётного порядка уровень ПВКФ практически такой же, как для следующего за ним кода чётного порядка. С другой стороны, у кодов Голда чётных порядков меньше превышение максимального уровня АВКФ над максимальным уровнем ПВКФ. Кроме того, у кодов Голда чётных порядков относительно большие (не равные -1) значения ПВКФ встречаются вдвое реже, чем у кодов Голда нечётных порядков. В таблице 2 приведены значения усреднённых частот появления каждого из трёх значений ПВКФ для разных порядков (см. также TABLE II в [6]).

Это свойство ПВКФ влияет и на распределение значений аperiodических ВКФ, так что в чётном случае относительно больших значений ВКФ будет примерно вдвое меньше, чем в нечётном случае. Это должно способствовать подавлению корреляционного шума при дальнейшей обработке сигнала по азимуту. Могут использоваться также коды порядков, кратных 4 (“Gold like codes”), их ПВКФ четырёхзначные.

**Использование кодов Голда для модулирования зондирующих импульсов, и обработка сигнала при наличии неоднозначности по дальности**

Зондирующий импульс представляет собой ФКМ сигнал. При излучении каждый импульс

модулируется кодовой последовательностью Голда, причём на каждом интервале зондирования используется свой код. После исчерпания ансамбля Голда коды повторяются. Использование для кодирования сигнала последовательностей Голда обусловлено следующими обстоятельствами. Во-первых, коды, принадлежащие одному ансамблю, имеют сравнительно невысокий, а главное, стабильный уровень взаимной корреляции, что упрощает задание порогов. Во-вторых, ансамбль Голда содержит достаточно много кодов, что позволяет ослабить влияние периодичности при обработке сигнала по азимуту.

Обработка принятого сигнала по дальности в условиях неоднозначности производится следующим образом. Как было сказано выше, импульсная характеристика согласованного фильтра представляет собой ФМ-сигнал, кодовая последовательность которого повторяет код зондирующего сигнала в обратном порядке. Сначала на каждом периоде повторения используется ФКМ сигнал, модулированный кодом Голда, использованным при зондировании на этом периоде повторения. Если есть сигнал, отражённый от цели, находящейся в нулевой зоне однозначности, он будет усилен и превысит пороговое значение. При этом все сигналы, отражённые от целей, находящихся в остальных зонах однозначности, подавляются из-за низкой корреляции кодирующих после-

довательностей, и не превысят порог. Для получения картины, соответствующей  $k$ -й зоне однозначности, для обработки используем исходную последовательность кодов, сдвинутую на  $k$  позиций. Тогда превысят порог сигналы от целей, находящихся в  $k$ -й зоне однозначности. Для сокращения вычислений можно разбить последовательность номеров периодов повторения на подпоследовательности, количество которых равно количеству учитываемых зон однозначности. В этом случае для получения РЛИ в  $k$ -й зоне однозначности вышеописанную процедуру применяем к  $k$ -й подпоследовательности.

Для азимутальной обработки сигналов от целей, находящихся в разных зонах однозначности, при синтезировании нужно использовать соответствующие опорные функции.

### Моделирование системы обработки сигнала, алгоритм расчёта характеристик ансамбля кодов Голда

Моделирование системы обработки ФМ-сигнала, принятого космической РСА, проводилось при значениях параметров, указанных в таблице 3.

Расчёт параметров модели и характеристик ансамбля кодов Голда производится в ниже следующем порядке.

1. Будем исходить из требования сохранения однозначности по азимуту. Тогда значение частоты зондирования должно удовлетворять условию [10]

$$F_3 \geq \frac{2V_{КА} \theta_{гор} k_a}{\lambda}, \quad (5)$$

где  $V_{КА} = \sqrt{g(R_3 + H)}$  — линейная скорость КА;  $g = \gamma \frac{M_3}{(R_3 + H)^2}$ , — ускорение свободного падения на высоте  $H$ ;  $R_3 = 6\,731\,000$  м — ради-

Таблица 3. Значения заданных параметров модели РСА.

Параметр	Значение	Размерность
Импульсная мощность, $P_{имп}$	1 800	Вт
Скважность, $q$	8	
Шум-фактор, $F_{ш}$	2,5	дБ
Длина волны, $\lambda$	0,0314	м
Высота орбиты, $H$	520 000	м
Угол наблюдения, $\beta$	55	град
Общие потери в канале распространения сигнала, $L$	4	дБ
Эффективная площадь антенны, $S_{эфф}$	2,1	м <sup>2</sup>
Азимутальное разрешение, $\delta_x$	4.4	м
Разрешение по горизонтальной дальности, $\delta_y$	5,0	м
Ширина диаграммы направленности антенны по азимуту, $\theta_{гор}$	0,45	град
Ширина диаграммы направленности антенны по углу места, $\theta_{верт}$	2,64	град
Число отсчетов на элемент разрешения, $n_c$	2	
Корректирующий коэффициент, $k_a$	1,065	

ус Земли;  $M_3 = 5,972 \cdot 10^{24}$  кг — масса Земли;  $\gamma = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1} \text{ с}^{-2}$  — гравитационная постоянная.

2. Значения длительностей во времени  $T_3 = 1/F_3$  и протяжённостей в пространстве зон однозначности по дальности  $L_3 = (cT_3/2)$ , где  $c$  — скорость света в вакууме.

3. Значение ширины полосы захвата, соответствующее углу места  $\beta$  (см. рис. 1 и рис. 2):

$$L_{пз} = R_2 - R_1,$$

где  $R_i = (R_3 + H) \cos \beta_i - \sqrt{R_3^2 - (R_3 + H)^2 \sin^2 \beta_i}$ ,  $i = 1, 2$ ,  $\beta_1 = \beta - \theta_{верт}/2$ ,  $\beta_2 = \beta + \theta_{верт}/2$ .

4. Значение наклонной дальности до центра снимаемого участка (см. рис. 2)

$R_0 = \sqrt{(R_3 + H)^2 + R_3^2 - 2(R_3 + H)R_3 \cos \alpha}$ , где  $\alpha = (\alpha_1 + \alpha_2)/2$ ,  $\alpha_{1,2} = \arcsin(R_{1,2}/R_3 \cdot \sin \beta_{1,2})$ .

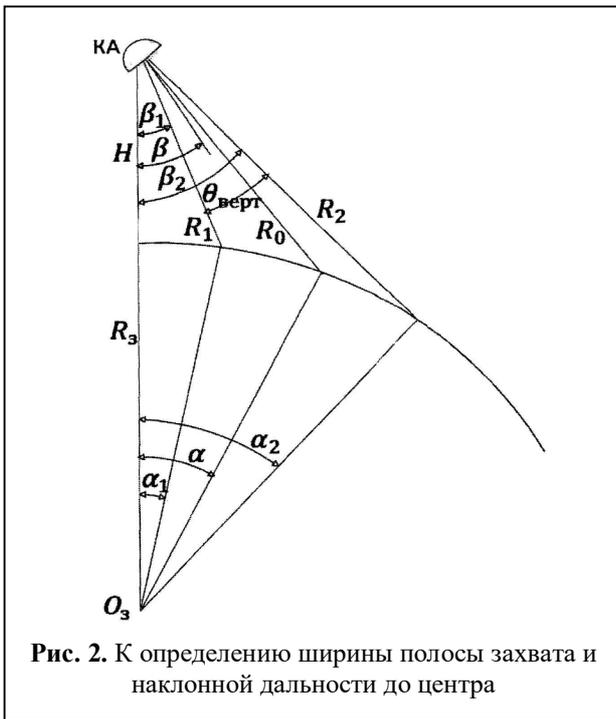


Рис. 2. К определению ширины полосы захвата и наклонной дальности до центра

5. Максимальное число периодов однозначности в полосе захвата, при выбранной частоте зондирования  $F_3$ , определяется по условию

$$N_{\text{одн}}^{\text{max}} = \left[ L_{\text{пз}}^{\text{max}} / L_3 \right] + 1,$$

где  $L_{\text{пз}}^{\text{max}}$  — ширина полосы захвата антенной РСА, соответствующая максимальному значению угла места;  $[\cdot]$  — символ выделения целой части.

6. Число ортогональных зондирующих сигналов должно удовлетворять условию

$$N_{\text{орт}} \geq N_{\text{одн}}^{\text{max}}.$$

7. Длительность зондирующего импульса  $\tau_{\text{зи}} = T_3 / q$ .

8. Длительность элементарного импульса  $\tau_3 = 2\delta_r / c$ , где  $\delta_r = \delta_y \cdot \sin \beta$  — разрешение по наклонной дальности.

9. Число элементарных импульсов длительностью  $\tau_3$

$$N_3 = \left[ \tau_{\text{зи}} / \tau_3 \right] + 1.$$

10. База (число символов) кода Голда

$$N_{\text{кг}} = 2^m - 1,$$

где  $m$  — наименьшее натуральное число такое,

что  $2^m - 1 \geq N_3$ .

11. Скорректированная длительность элементарного импульса (длительность элемента кода Голда)

$$\tau_{\text{эг}} = \tau_{\text{зи}} / N_{\text{кг}}.$$

12. Число стробов дальности в зоне однозначности

$$M_c = \frac{2(T_3 - \tau_{\text{зи}})}{\tau_{\text{эг}}}.$$

13. Время синтезирования апертуры определяется условием достижения заданной разрешающей способности по азимуту  $\delta_x$

$$T_c = \frac{\lambda R_0}{2V_{\text{КА}} \delta_x}.$$

14. Число периодов зондирования, которое укладывается в интервале синтезирования апертуры

$$N_3 = T_c / T_3.$$

15. Число кодов Голда в ансамбле

$$N_{\text{к}} = N_{\text{кг}} + 2.$$

16. Число ансамблей на интервале синтезирования

$$N_a = \left[ N_3 / N_{\text{к}} \right] + 1.$$

Результат выбора характеристик ансамбля кодов Голда, исходя из заданных в таблице 3 параметров модели РСА, приведён в таблице 4.

### Результаты моделирования.

1. Согласно п. 6 алгоритма расчёта характеристик, количество используемых «ортогональных» кодов должно удовлетворять условию  $N_{\text{орт}} \geq N_{\text{одн}}^{\text{max}} = 3$ . При этом наилучшего результата можно добиться, используя максимально возможное число кодов, то есть весь ансамбль кодов Голда. В данном случае  $N_{\text{орт}} = N_{\text{к}} = 1025$ . При обработке по азимуту, которая представляет собой свёртку сигнала с опорной функцией, уровень боковых лепестков, образовавшихся в результате сжатия отражённого сигнала по дальности, существенно снижается. Дело в том, что при использовании большого числа кодов значения сжатого по

азимуту сигнала в каналах дальности, не содержащих сигнала цели, образуют последовательность, подобную дискретному белому шуму, модулированному ЛЧМ-сигналом. Воспользуемся этой аналогией и представим себе последовательность  $n_k, k = 0, \dots, N-1$ , некоррелированных случайных величин, с дисперсией  $\sigma^2$ , периодическую с периодом  $M = N/L$ , где  $L$  целое число и  $1 \leq L \leq N$ . Дисперсия среднего значения  $E = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} n_k$  такой последовательности равна  $\sigma_E^2 = \sigma^2/M$ . Минимальная дисперсия получается при максимальном значении периода  $M$ . Аналогично, для минимизации боковых лепестков свёртки сигнала в канале дальности с опорным сигналом, следует использовать для кодирования зондирующего сигнала все имеющиеся в наличии кодовые последовательности Голда. В таблице 5 приведены значения отношения  $\gamma$  амплитуды сигнала цели к максимальному уровню боковых лепестков в децибелах после обработки по азимуту, в середине интервала синтеза. Моделирование проводилось при параметрах, приведённых в таблицах 3 и 4 при  $N_{\text{орт}} = 3, 500, 1025$ . Шум не добавлялся.

Отношение амплитуды сигнала к максимальному уровню боковых лепестков при  $m = 10$  согласно таблице 1 составляет примерно  $\gamma = -21$  дБ (АВКФ). Обработка этих БЛ в поперечном направлении, по азимуту, при  $N = 2048$  приводит к снижению этого отношения до  $\gamma = -63$  дБ.

На рис. 3, 4 показан обработанный сигнал от точечной цели по дальности в середине интервала синтеза, для двух первых зон однозначности, 0-й и 1-й при  $N_{\text{орт}} = 1025$ . Наклонная дальность до цели  $D = 1035000$  м (цель находится в 1-й зоне однозначности). На рис. 3 сигнал в 0-й зоне однозначности, на рис. 4 сигнал в 1-й зоне однозначности. По горизонтальной оси отложены номера стробов  $m$ .

2. Проводилось моделирование системы

Таблица 4. Значения рассчитанных параметров модели РСА

Параметр	Значение	Размерность
$F_3$	4200	Гц
$L_3$	35 690	м
$L_{\text{пз}}^{\text{max}}$	88 205	м
$R_0$	1 000 783	м
$N_{\text{одн}}^{\text{max}}$	3	
$\tau_{\text{зи}}$	30	мкс
$\tau_3$	0,0334	мкс
$N_3$	893	
$N_{\text{кг}}$	1023	
$m$	10	
$\tau_{\text{эг}}$	0,0291	мкс
$M_c$	14322	
$T_c$	0,47	с
$N_3$	1973	
$N_k$	1025	
$N_a$	3	

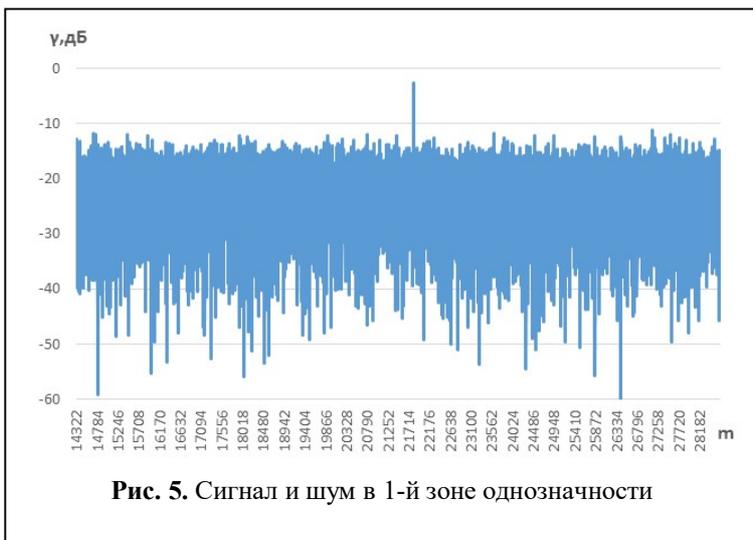
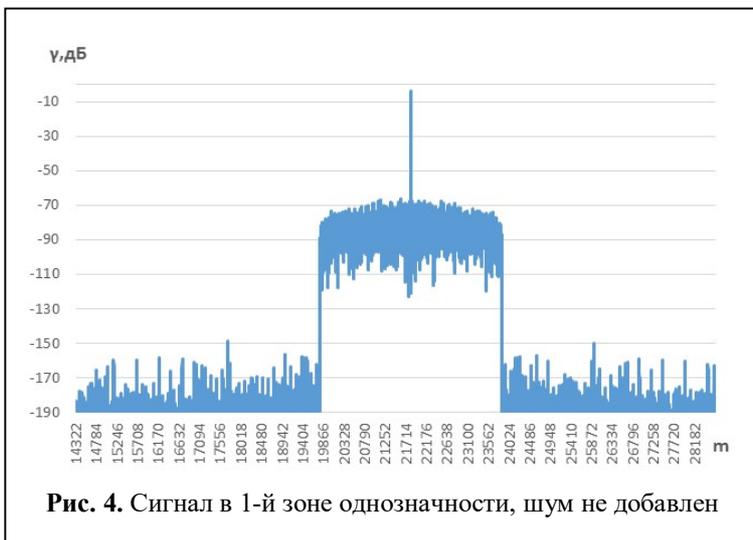
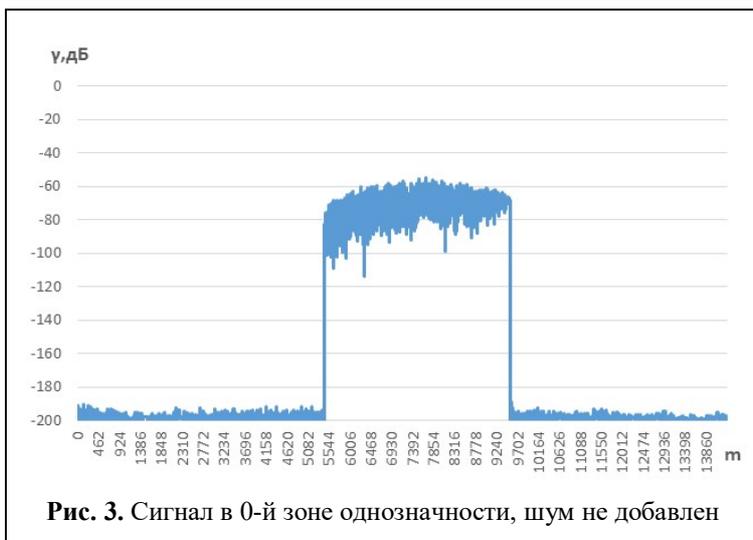
Таблица 5. Максимальные значения отношения амплитуды сигнала цели к уровню боковых лепестков.

$N_{\text{орт}}$	Значение отношения $\gamma$ , дБ
3	-31
500	-49
1025	-65

обработки сигнала при наличии неоднозначности по дальности с добавлением шума. Отношение сигнал-шум по мощности на выходе системы обработки полагалось  $(S/N) = 100$  (20 дБ). Тогда, полагая мощность сигнала на входе  $P_{\text{вх}} = 1$ , можем найти мощность шума

$$\sigma^2 = \frac{P_{\text{вх}} N_{\text{кг}} N_3}{(S/N)} = \frac{1 \cdot 1023 \cdot 1973}{100} = 20184.$$

На рис. 5 показан обработанный сигнал от точечной цели по дальности в середине интервала синтеза для 1-й зоны однозначности, при  $N_{\text{орт}} = 1025$ . Наклонная дальность до



цели  $D = 1035000$  м. Амплитуда входного сигнала равна 1, добавлен дискретный белый шум

$$\sigma = \sqrt{20184} = 142.$$

### Заключение

Статья посвящена явлению неоднозначности, возникающей при обработке сигнала, принятого импульсно-доплеровской РЛС. Рассмотрен механизм возникновения неоднозначности по дальности, описан один из возможных подходов к работе в условиях наличия этого типа неоднозначности. Дано краткое описание одной из разновидностей ФМС, а именно, сигналов, модулированных при помощи так называемых кодовых последовательностей Голда, перечислены некоторые свойства этих последовательностей, главное из которых состоит в том, что они образуют множества (ансамбли), элементы которых попарно имеют невысокие и стабильные уровни корреляции. Показано, в том числе с использованием моделирования, что применение ансамблей кодов Голда для фазовой модуляции зондирующих сигналов при наличии неоднозначности по дальности позволяет эффективно выделять сигналы от целей, находящихся в разных зонах однозначности. При этом оказывается, что если использовать для зондирования максимально возможное число кодов, то есть все коды, составляющие ансамбль, то при обработке сигнала по азимуту происходит весьма существенное снижение уровня боковых лепестков, образовавшихся после сжатия сигнала по дальности. В нашем случае дополнительное подавление составило более 40 дБ. Проведенное моделирование для точечной цели показало, что обработка принятых сигналов в условиях неоднозначности по дальности и выделение цели с

использованием такого подхода происходит вполне эффективно и при наличии шумового воздействия.

#### Литература

1. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. Под общей ред. В.С. Вербы. М.: Радиотехника, 2010.

2. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений: учебник для курсантов ВВИА имени профессора Н.Е. Жуковского. / Под ред. Л. А. Школьного. М.: изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008.

3. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / В.Н. Антипов, В.Т. Горяинов, А.Н. Кулин и др.; Под ред. В.Т. Горяинова. М.: Радио и связь, 1988.

4. Цифровая обработка сигналов в РСА / Под ред. Е.Ф. Толстова. Смоленск: ВА ВПВО ВС РФ, 2005. 232 с.

5. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподоб-

ными сигналами. М.: Радио и связь, 1985.

6. Ипатов В.П. Периодические дискретные сигналы с оптимальными корреляционными свойствами. М.: Радио и связь, 1992.

7. Кузнецов В.С., Шевченко И.В., Волков А.С., Солодков А.В. Генерация ансамблей кодов Голда для систем прямого расширения спектра // Труды МАИ. 2017. № 96.

8. Hounam D., Mittermayer J. Techniques for Reducing SAR Antenna Size // EUSAR 2006 / Microwaves and Radar Institute German Aerospace Center (DLR), Oberpfaffenhofen, Germany.

9. Gold R. Optimal binary sequences for spread spectrum multiplexing // IEEE Trans. 1967. Vol. IT-13, No. 4. Pp. 619–621.

10. Карпов О.А., Рабочий А.Н., Толстов Е.Ф., Фёдоров В.С., Костров В.В. Проблемы неоднозначности в космических РСА и коды Голда // Армандовские чтения, Всероссийская открытая научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» (27.06-29.06.2023, г. Муром). Муром: МИ ВлГУ, 2023. С. 375–384.

Поступила 26 июля 2023 г.

English

## PROPERTIES OF GOLD CODES AND AMBIGUITY IN SAR

**Evgeny Fedorovich Tolstov**— Grand Dr. in Engineering, Professor, Head of the Department of JSC "Aerocon"<sup>1</sup>.

E-mail: [e\\_tolstov@mail.ru](mailto:e_tolstov@mail.ru)

**Vladimir Sergeevich Fedorov** — PhD, the Head of Laboratory, Corporation Phasotron-NIIR<sup>2</sup>.

E-mail: [fedorov@phasotron.com](mailto:fedorov@phasotron.com)

<sup>1</sup>Address: 140187 Zhukovsky, Moscow region, Zhukovsky str., 1.

<sup>2</sup>Address: 115516, Moscow, Kavkazsky b., 59, str. 1.

*Abstract:* Sometimes there is a range ambiguity while processing a signal in SAR, when the signal reception area deals not only with signals emitted in the current repeating period, but also with those signals that were emitted in several previous or subsequent periods. When this is case, there is no one-to-one association between the observed signal delay time and slant range to the observed object, which is defined with an accuracy to the value multiple of unambiguity area width. The task arises to determine unambiguity area for each observed signal where the surface area is located from which this signal was reflected. One of the possible approaches involves using a set of phase-shift keyed (PSK) signals as probing pulses with low-level cross correlation. The article evolves an approach when using such set of signals modulated by the so-called Gold code sequences. Using Gold sequences for signal coding is accounted for as follows. First, the codes pertaining to one ensemble have a relatively low, and most importantly, stable level of cross correlation. Second, Gold ensemble contains quite a number of codes, which enables to lessen the effect of periodicity when processing the signal by azimuth. When radiated the pulses are modulated by Gold code sequences and a certain code from the ensemble is used at each sounding interval. The codes are repeated after Gold ensemble expiration. Since each radiated pulse is a PSK signal from a given set, then when processing the received signal, one can tell the repetition period when a probing signal was used correlating with the received signal. Thus, we can find an unambiguity area where the surface area is located, which is our concern. The article has a performance calculation algorithm for Gold codes' ensemble with the preset SAR parameters. Simulation results of signal processing for the point target are given, that demonstrate that using Gold codes for phase modulation of sounding signals of ambiguity in case of range ambiguity enables to effectively select signals among targets located in various unambiguity areas. Thereby it turns out that in case of using maximum possible number of

codes for sounding, that is, all the codes that make up the ensemble then when processing the signal by the azimuth there is quite a significant level decrease of side-lobes formed after range signal compression, which can be dozens of decibels. Simulation laced with white noise showed that signal processing using this approach is quite efficient amid noise impact as well.

*Keywords:* Synthetic Aperture Radar, radar image, range ambiguity, phase-shift keyed signal, Gold codes.

### References

1. *Verba V.S., Neronskiy L.B., Osipov I.G., Turuk V.E.* Space-borne Earth Surveillance Radar Systems. Ed. by V.S. Verba. Moscow: Radiotekhnika, 2010. 680 p.
2. Radar systems of aerial reconnaissance, decoding of radar images: a textbook for cadets of the VVIA named after Professor N.E. Zhukovsky. Ed. by L.A. Shkolny. Moscow: VVIA named after Prof. N.E. Zhukovsky, 2008. 531 p.
3. Radar stations with digital synthesis of the antenna aperture. *V.N. Antipov, V.T. Goryainov, A.N. Kulin, etc.;* Ed. by V.T. Goryainov. Moscow: Radio i svyaz', 1988. 304 p.
4. Digital Signal Processing in SAR / Ed. by E.F. Tolstov. Smolensk: VA VPVO RF Armed Forces, 2005. 232 p.
5. *Varakin L.E.* Communication systems with noise-like signals. Moscow: Radio i svyaz', 1985. 384 p.
6. *Ipatov V.P.* Periodic discrete signals with optimal correlation properties. Moscow: Radio i svyaz', 1992. 152 p.
7. *Kuznetsov V.S., Shevchenko I.V., Volkov A.S., Solodkov A.V.* Generation of Gold code ensembles for systems of direct spectrum expansion. Proceedings of MAI. 2017. No. 96.
8. *Hounam D., Mittermayer J.* Techniques for reducing SAR antenna size. Proc. of International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 03). 2003. Vol. 3. Pp. 2143–2145.
9. *Gold R.* Optimal binary sequences for spread spectrum multiplexing. IEEE Trans. 1967. Vol. IT-13, No. 4. Pp. 619–621.
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. Armand readings, All-Russian Open scientific Conference "Modern problems of remote sensing, radar, propagation and diffraction of waves" (27.06-29.06.2023, Murom). Murom: MI VISU, 2023. Pp. 375–384.