

**ПРИМЕНЕНИЕ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ФКМ СИГНАЛОВ ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ
В РСА НЕОДНОЗНАЧНОСТИ ПО ДАЛЬНОСТИ****Савостьянов Владимир Юрьевич**

кандидат технических наук, доцент, ведущий инженер ЗАО «АЭРОКОН».

E-mail: v-savostyanov@yandex.ru

Адрес: 140180, Российская Федерация, Московская обл., г. Жуковский, ул. Жуковского, д. 1.

Аннотация: Для снижения помех неоднозначности по дальности в радиолокаторах с синтезированием апертуры антенны (РСА) и повышения качества синтеза радиолокационных изображений использованы ортогональные сигналы с фазо-кодовой модуляцией (ФКМ). Рассмотрены основные свойства ФКМ сигналов, проведено сравнение ряда ансамблей псевдослучайных последовательностей для РСА космического и авиационного базирования. Особое внимание уделено рассмотрению кодов Голда, которые позволяют получить большой набор последовательностей, а их боковые лепестки принимают только три значения. Рассмотрен пример использования ФКМ сигналов в авиационной импульсно-доплеровской РСА, для которого проведён выбор четырёх последовательностей с базами от 63 до 511 среди М-последовательностей, последовательностей Касами и Голда. Показано, что более эффективными оказались М-последовательности, которые обеспечивают дополнительное подавление сигналов с альтернативных дальностей на 12...20 дБ в зависимости от базы сигнала.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированием апертуры антенны, фазово-кодовая модуляция, неоднозначность по дальности, ортогональные сигналы, М-последовательность.

Сигналы с фазово-кодовой модуляцией (ФКМ) обладают многими практически привлекательными свойствами, поэтому они уже давно нашли применение в радиолокации, радиосвязи, радиоуправлении, сейсмологии и многих других областях. Изучению свойств их ФКМ сигналов посвящено большое количество научных работ [1–4].

Основой этого изучения является корреляционный анализ, позволяющий оценить временные свойства сигнала без применения спектрального анализа. Корреляционные свойства кодовых последовательностей, используемых в широкополосных системах, зависят от типа кодовой последовательности, её длины, частоты следования её символов и от её по-символьной структуры. Для оценки корреляционных свойств ФКМ сигналов используют автокорреляционную функцию (АКФ) и взаимную корреляционную функцию (ВКФ).

Принципиально важным является тот факт, что в телекоммуникационных и радиолокационных системах, как правило, отсутствует цикличность передачи-приёма кодов без пауз, т.е. имеется разрывность во временной области между посылками (излучениями) сигналов. Из

этого следует, что главной целью исследования свойств ФКМ сигналов является анализ их аperiodических АКФ и ВКФ.

Как было показано в [1–4], хорошими аperiodическими свойствами могут обладать только последовательности с хорошими периодическими корреляционными свойствами, т.е. имеющие достаточно низкий уровень боковых лепестков (УБЛ). Таким образом, ФКМ сигналы с хорошими периодическими АКФ дают возможность их использования в качестве исходного материала для поиска кодов с нужными свойствами аperiodических АКФ. Дальнейший поиск заключается в отборе из найденных последовательностей тех кодов, которые одновременно обеспечивают и хорошие аperiodические ВКФ.

К наиболее распространённым в радиолокационных приложениях ФКМ сигналам относятся кодовые последовательности Баркера, М-последовательности, последовательности Якоби, Лежандра и другие, а также кодовые системы Уолша, Голда, Касами и родственные им [2–4]. Средний УБЛ АКФ определяется выражением $\approx 1/\sqrt{N}$, где N — длина последовательности.

ВКФ для двух разных М-последо-

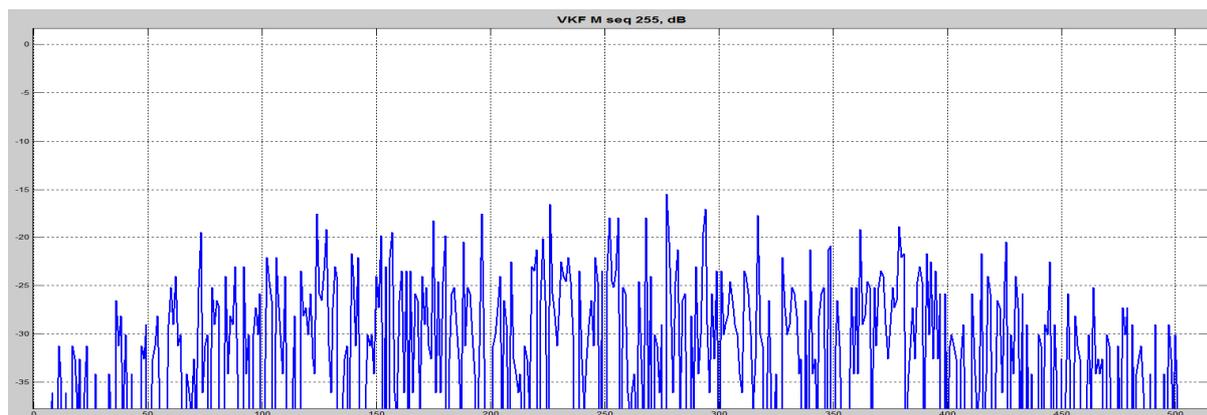


Рис. 1. ВКФ М-последовательностей длиной 255 элементов

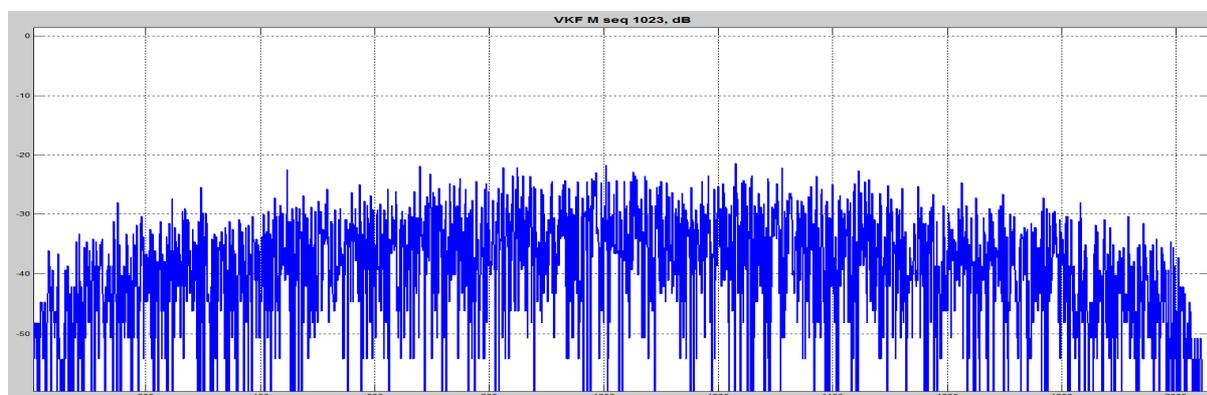


Рис. 2. ВКФ М-последовательности длиной 1023 элемента

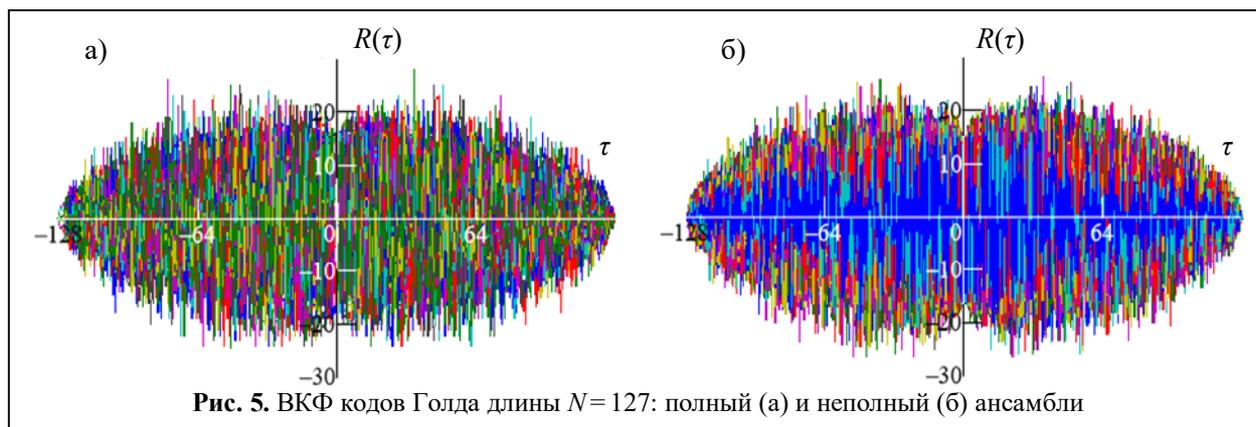
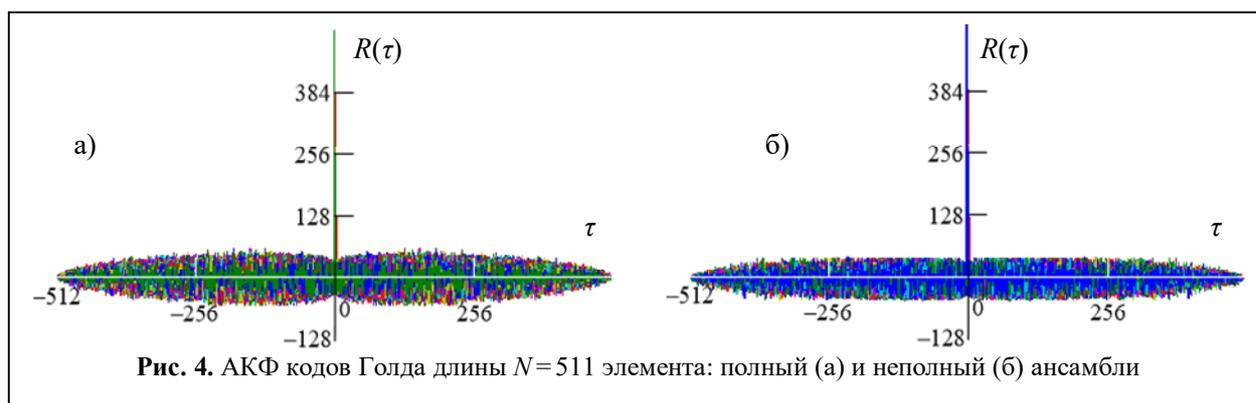
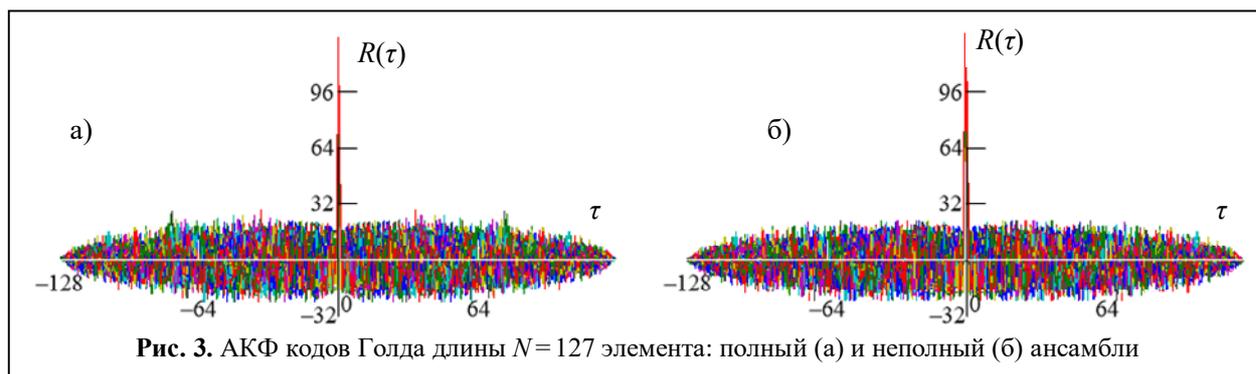
вательностей длиной 255 и 1023 элементов иллюстрируется рис. 1 и 2 соответственно. Видно, что полного взаимного подавления не наблюдается, но с ростом длины последовательности уровень ВКФ также снижается.

Для обеспечения большого набора кодов одинаковой длины с хорошими взаимокорреляционными свойствами используется особый класс псевдослучайных последовательностей, который называют последовательностями Голда [5, 6]. Коды Голда не только позволяют получить большой набор последовательностей, но также однородные и ограниченные значения ВКФ. Их значимость происходит из-за их очень низкой взаимной корреляции, поэтому они нашли широкое распространение в телекоммуникационных сетях CDMA и GPS. По этой же причине они заинтересовали и разработчиков РСА для космических аппаратов.

Метод Голда основан на выборе пары образующих М-последовательностей в соответствии со свойствами многочленов [2]. Если М-последовательности выбраны по методу Голда, то периодические ВКФ сформированных на их основе последовательностей ансамбля Голда являются трёхуровневыми, т.е. принимают только три значения:

$$Q_{\lambda} = \begin{cases} Q_1 = -1/N, \\ Q_2 = \sqrt{2/N} - 1/N, \\ Q_3 = -\sqrt{2/N} - 1/N. \end{cases} \quad (1)$$

Максимальные боковые лепестки для кодов Голда составляют примерно $\sqrt{2/N}$, в то время как для полного кода их значения равны $3/\sqrt{N}$, т.е. приблизительно в два раза больше [2].



На рис. 3 и 4 приведены наложенные друг на друга аperiodические АКФ минимаксных полных и неполных ансамблей кодов Голда [6] соответственно для $N=127$ и $N=511$. Здесь и далее графики построены при единичных амплитудах последовательностей ансамбля, τ — дискретное время. На рис. 5 приведены наложенные друг на друга аperiodические ВКФ ансамблей кодов Голда для $N=127$. Как следует из представленных рисунков, достигнутые значения боковых лепестков составили примерно $2/\sqrt{N}$ для АКФ и $2,8/\sqrt{N}$ для ВКФ.

Однако, как показали исследования, если не требуется большого количества последовательностей в ансамбле, то можно достичь существенно лучших авто- и взаимокорреляционных свойств.

Дело в том, что в малогабаритных РСА для космических аппаратов из-за высокой частоты повторения импульсов однозначно измеряемая дальность в десятки или даже сотни раз меньше расстояния до картографируемого участка поверхности.

Рассмотрим для примера маршрутный режим съёмки при высоте орбиты космического

аппарата — носителя РСА, равной 650 км, при угле визирования 40° и частоте повторения зондирующих импульсов 5,1 кГц. Наклонная дальность составит 880 км, а максимальная однозначно измеряемая дальность — 30,5 км. Отсюда следует, что расстояние до объекта в 28 раз превосходит однозначно измеряемую дальность. Соответственно, такое же количество кодов должно быть и в ансамбле последовательностей [7, 8].

В РСА авиационного базирования ситуация иная. Рассмотрим это на конкретном примере.

Пусть имеется цель, движущаяся с максимальной радиальной (в направлении РСА) составляющей скоростью v_{mr} . Тогда диапазон изменения доплеровской частоты для этой цели составит

$$\Delta f_{dm} = \pm \frac{2v_{mr}}{\lambda}, \quad (2)$$

где λ — длина волны несущей. Если значение v_{mr} равно 120 км/ч, то в X-диапазоне минимальная частота повторения зондирующих импульсов, при которой может быть обеспечено однозначное измерение скорости цели, составит

$$F_n = 2|\Delta f_{dm}| = \frac{4v_{mr}}{\lambda} \approx 5,8 \text{ кГц}. \quad (3)$$

Следовательно, однозначная измеряемая дальность не превысит значения $c/(2F_n) \approx 25$ км, где c — скорость света.

Предположим, что требуемая максимальная дальность обнаружения движущегося объекта должна быть не менее 100 км. Тогда целесообразным будет использование ансамбля ортогональных ФКМ сигналов, в котором необходимое количество последовательностей равно 4. Столь незначительное количество последовательностей позволяет, с одной стороны, ужесточить требования к аperiodическим АКФ и ВКФ ФКМ сигналов, а с другой — ускорить их поиск.

Основываясь на этом подходе, был проведён поиск ансамбля из четырёх ФКМ сигналов длины от 63 до 511 элементов, обладающих наилучшими авто- и взаимокорреляционными

свойствами среди M-последовательностей, последовательностей Касами и Голда. Проведённые исследования показали, что среди рассмотренных сигналов наименьший УБЛ в аperiodических АКФ и ВКФ обеспечивается при использовании M-последовательностей.

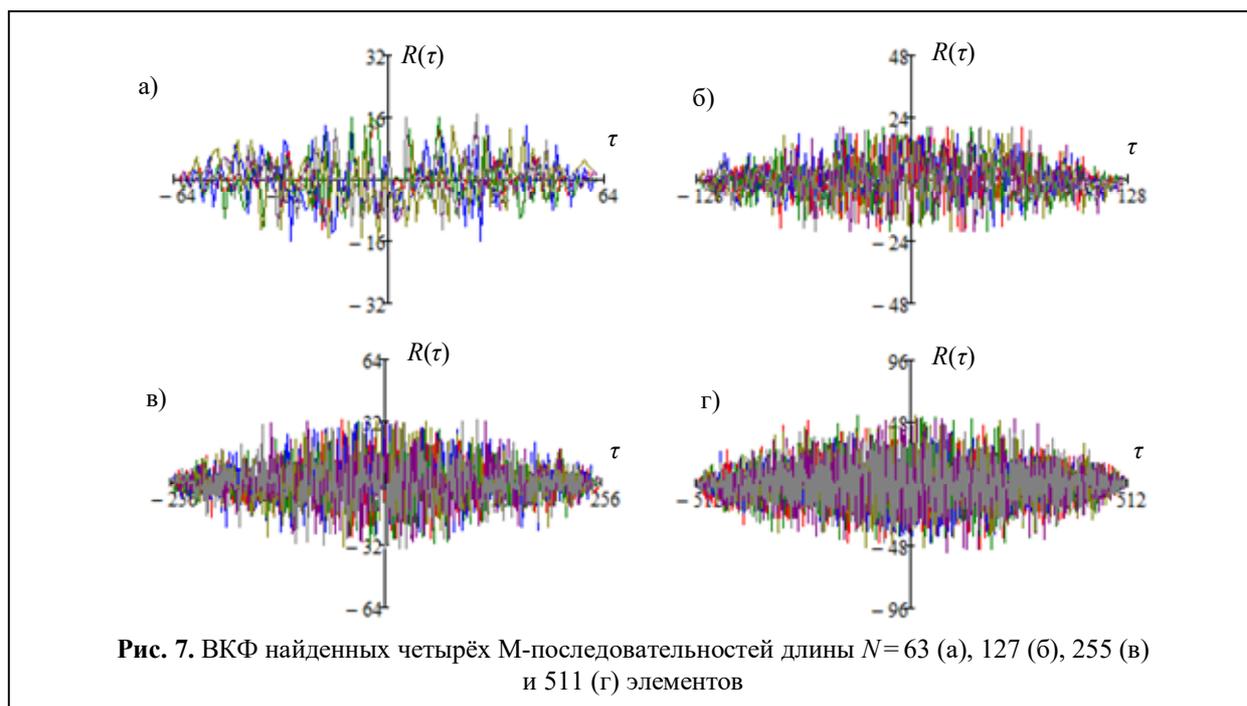
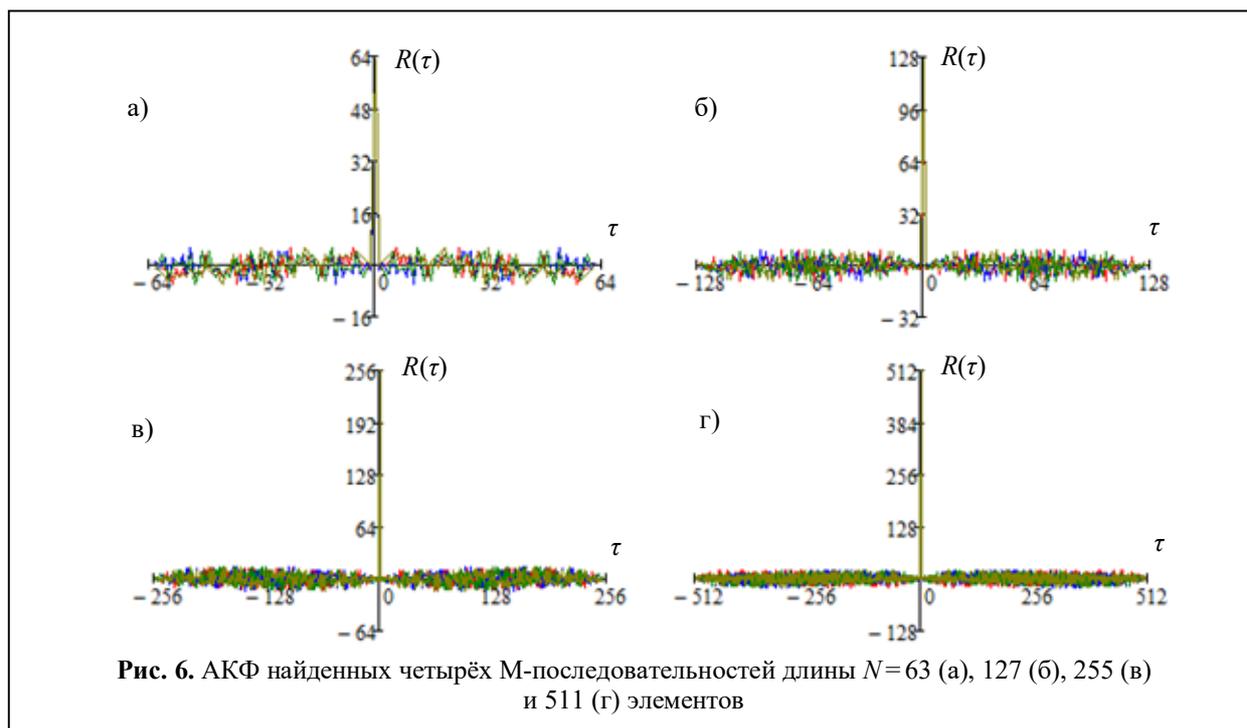
На рис. 6 и 7 приведены наложенные друг на друга аperiodические, соответственно, АКФ и ВКФ для найденных четырёх M-последовательностей при длине $N = 63, 127, 255$ и 511 .

Как следует из представленных рисунков, достигнутые значения максимальных боковых лепестков составили примерно $0,85/\sqrt{N}$ для АКФ и $2,04/\sqrt{N}$ для ВКФ, т.е. по отношению к кодам Голда выигрыш равен примерно 7,4 и 2,8 дБ соответственно для АКФ и ВКФ. Средний УБЛ при этом составил примерно $0,33/\sqrt{N}$ для АКФ и $0,53/\sqrt{N}$ для ВКФ, что также существенно меньше, чем в среднем по M-последовательностям.

Таким образом, из всех исследованных ФКМ сигналов найденные четыре M-последовательности продемонстрировали наилучшие свойства с точки зрения минимума УБЛ в их аperiodических АКФ и ВКФ. Использование этих кодов позволит в РСА авиационного базирования реализовать режим селекции наземных подвижных объектов на дальностях не менее 100 км с обеспечением диапазона однозначно измеряемой скорости цели до ± 120 км/ч.

Как следует из формулы (3), при повышении/понижении частоты повторения зондирующих импульсов диапазон однозначно измеряемой скорости цели может быть пропорционально увеличен/уменьшен за счёт соответствующего уменьшения/увеличения дальности обнаружения движущихся объектов.

Применение данных ортогональных M-последовательностей обеспечивает дополнительное подавление сигналов с альтернативных дальностей от 12 дБ (при $N = 63$) до 20 дБ (при $N = 511$).



Литература

1. *Вакман Д.Е., Седлецкий Р.М.* Вопросы синтеза радиолокационных сигналов. М.: Сов. радио, 1973. 312 с.
2. *Варакин Л.Е.* Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 1985. 384 с.
3. *Гантмахер В.Е., Быстров Н.Е., Чеботарёв Д.В.* Шумоподобные сигналы. Анализ, синтез, обработка. СПб.: Наука и техника, 2005. 400 с.
4. *Мазурков М.И.* Системы широкополосной

радиосвязи. Учебник для вузов. Одесса: Наука и техника, 2009. 344 с.

5. *Питерсон У., Уэлдон Э.* Коды, исправляющие ошибки. Пер. с англ. М.: Мир, 1976. 576 с.

6. *Зубарев В.Ю., Пономаренко Б.В., Шанин Е.Г., Вострецов А.Г.* Построение минимаксных ансамблей аperiodических кодов Голда // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23. №2. С. 26–37.

7. *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». Муром: МИ ВлГУ, 2023.

С. 375–384.

8. Толстов Е.Ф., Фёдоров В.С. Свойства кодов Голда и неоднозначность в РСА // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2023. № 4. С. 41–50.

Поступила 11 сентября 2023 г.

English

THE USE OF ORTHOGONAL PCM SIGNALS TO REMEDY SAR RANGE AMBIGUITY

Vladimir Yuryevich Savostyanov — PhD, Associate Professor, Senior Engineer, CJSC AEROKON.

E-mail: y-savostyanov@yandex.ru

Address: 140180, Russian Federation, Moscow Region, Zhukovsky, Zhukovsky st., 1.

Abstract: The article proposes using orthogonal PCM (phase-coded modulated) signals to enhance synthesis quality of radar images and that assists to solve interference reduction problem of SAR range ambiguity. Key properties of PCM signals are examined that are based on correlation analysis, which enables to estimate the signal timing properties without using spectral analysis. It is noted that correlation properties of the code chains used in broadband systems depend on the code chain type, its length, symbol repetition rate and its symbol-by-symbol structure. The autocorrelation function (ACF) and cross-correlation function (CCF) are applied to evaluate the correlation properties of PCM signals and remedy capabilities for SAR range ambiguity. The focus is placed on Gold codes' examination that enable to obtain a large set of sequences, and their side lobes assume only three values. Mathematical simulation resulted in achieving approximately $2/\sqrt{N}$ value for the side lobes in case of ACF and $2,8/\sqrt{N}$ value for those in case of CCF. It is demonstrated that using incomplete ensembles of codes enables to achieve significantly better auto- and cross-correlation properties and that essentially simplifies their search. This phenomenon is used in the airborne pulse-Doppler SAR where an unambiguous speed measurement of moving targets is ensured by high repetition rate. The selection of four base sequences from 63 up to 511 with the best auto- and cross-correlation properties was made among M-sequences, Kasami and Gold sequences. It is made clear that M-sequences then appeared to be more efficient. The gain amounted to be about 7.4 and 2.8 db for ACF and CCF, respectively, if compared to Gold codes. Calculations testified that using selected orthogonal M-sequences ensures extra suppression of signals (between 12 db (at $N=63$) and 20 db (at $N=511$) from alternative ranges.

Keywords: synthetic aperture radar, phase-code modulation, range ambiguity, orthogonal signals, M-sequence.

References

1. Vakman D.E., Sedletsky R.M. Questions of synthesis of radar signals. Moscow: Sovetskoe radio, 1973. 312 p.
2. Varakin L.E. Communication systems with noise-like signals. Moscow: Radio i Svaz', 1985. – 384 p.
3. Gantmacher V.E., Bystrov N.E., Chebotarev D.V. Noise-like signals. Analysis, synthesis, processing. St. Petersburg: Nauka i Tehnologiya, 2005. 400 p.
4. Mazurkov M.I. Broadband radio communication systems. Textbook for universities. Odessa: Nauka i Tehnologiya, 2009. 344 p.
5. Peterson W. W., Weldon E.J. Error-correcting codes. 2nd ed. MIT Press, Cambridge & London, 1972. 576 p.
6. Zubarev V.Yu., Ponomarenko B.V., Shanin E.G., Vostretsov A.G. Construction of minimax ensembles of aperiodic Gold codes. Izvestiya vuzov Rossii. Radio electronics. 2020. Vol. 23. No. 2. Pp. 26–37.
7. Karpov O.A., Rabochy A.N., Tolstov E.F., Fedorov V.S., Kostrov V.V. Problems of ambiguity in space RSAs and Gold codes. Armand Readings. All-Russian Open Scientific Conference "Modern problems of remote sensing, radar, wave propagation and diffraction". Murom: MI VISU, 2023. Pp. 375–384.
8. Tolstov E.F., Fedorov V.S. Properties of Gold codes and ambiguity in SAR. Radioengineering and telecommunication systems. 2023. No. 4. Pp. 41–50.