

# Модифицированные импульсные последовательности на основе кодов Баркера

С.В. Дворников<sup>1, 2</sup>, С.С. Дворников<sup>1, 2</sup>, Е.В. Марков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация

<sup>2</sup>Военная академия связи им. С.М. Буденного, Санкт-Петербург, 194064, Российская Федерация

\*Адрес для переписки: practicsv@yandex.ru

## Информация о статье

Поступила в редакцию 05.12.2021

Поступила после рецензирования 11.01.2022

Принята к публикации 14.01.2022

**Ссылка для цитирования:** Дворников С.В., Дворников С.С., Марков Е.В. Модифицированные импульсные последовательности на основе кодов Баркера // Труды учебных заведений связи. 2022. Т. 8. № 1. С. 8–14. DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-1-8-14

**Аннотация:** Рассмотрен подход к модифицированию манипулирующих импульсных последовательностей, построенных на основе кодов Баркера. Предложено изменять структуру кодируемых импульсов на длительности элементарной посылки с учетом изменения скважности их следования при сохранении общей средней энергии. Получены численные соотношения, определяющие спектральные и временные параметры для семиэлементной импульсной последовательности при увеличении скважности следования импульсов в два и три раза. Рассчитаны численные значения, определяющие соотношения длительности пиков функций взаимной корреляции между модифицированной и канонической формой импульсных последовательностей. Представлены обоснованные оценки, характеризующие повышение разрешающей способности пиков функций взаимной корреляции в 4,43 раза при переходе к предлагаемой модифицированной структуре импульсной последовательности.

**Ключевые слова:** структура манипулирующих импульсов, последовательности на основе кодов Баркера, функция взаимной корреляции.

## Введение

Коды Баркера, благодаря их уникальным корреляционным свойствам, находят широкое применение в различных областях радиотехники. Их активно используют в радиолокации [1–3], в радиосвязи, при формировании широкополосных сигналов [4, 5] и радионавигации [6, 7].

Несмотря на глубокую проработку данного научного направления (впервые представлены научной общественности в 1953 г.), продолжается активное совершенствование методов и способов, основанных на последовательностях Баркера [8–11]. В частности, интерес вызывают работы [12–15], в которых предложен оригинальный подход к синтезу кодов с уникальными корреляционными свойствами на основе квазиортогональных матриц Мерсенна и Рагхаварао, позволяющий формировать новый класс вложенных кодовых конструкций с улучшенными характеристиками.

Однако анализ указанных работ показывает, что дальнейшее развитие данного научного направления, как правило, связано с использованием последовательностей Баркера как информационной кодирующей функции, без непосредственного учета особенностей их амплитудно-временной структуры. Так, в [16] представлены инверсные и зеркальные формы кодов Баркера, а также комбинированные конструкции, формируемые перемножением канонических последовательностей. Но при этом структура самих кодовых последовательностей остается неизменной.

Учитывая указанные обстоятельства, предлагаются результаты исследования корреляционных и спектральных свойств последовательностей Баркера при изменении их импульсной структуры, определяемой скважностью следования локальных максимумов и минимумов в формируемой конструкции.

### Общие сведения о кодах Баркера

Практическое применение кодов Баркера обусловлено тем, что для заданного набора комбинации символов они обеспечивают построение корреляционных функций с максимальным соотношением главного пика к пикам боковых лепестков [1]. Класс кодов Баркера включает семь последовательностей длиной 2, 3, 4, 5, 7, 11 и 13 символов. При этом 2- и 4-элементные последовательности имеют два варианта результирующих конструкций, см. таблицу 1.

ТАБЛИЦА 1. Последовательности Баркера

TABLE 1. Barker Code Sequences

Количество символов	Вид (структура) последовательности	
2	+1 -1	+1 +1
3	+1 +1 -1	
4	+1 -1 +1 +1	+1 -1 -1 -1
5	+1 +1 +1 -1 +1	
7	+1 +1 +1 -1 -1 +1 -1	
11	+1 +1 +1 -1 -1 +1 -1 -1 +1 -1	
13	+1 +1 +1 +1 +1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 -1 +1	

Важным свойством, объединяющим последовательности Баркера в единый класс, является выполнение следующего требования:

$$\sum_{n=1}^{N-m} |a_n a_{n+m}| \leq 1, \text{ для всех } 1 \leq m < N, \quad (1)$$

где  $a_n$  – текущий элемент последовательности;  $N$  – общая длина последовательности.

В общем случае, выражение (1) представляет собой дискретную форму модуля функции корреляции, в которой первый и второй множители могут быть различными последовательностями. Практика реализации технических процедур формирования широкополосных сигналов на основе кодов Баркера предполагает синтез двуполярных последовательностей, которые перемножаются, например, с высокочастотной несущей, как это делается в [4].

В качестве примера на рисунке 1 представлен принцип формирования фазоманипулированного сигнала  $z_n$  путем перемножения несущего колебания  $s_n$  и двуполярной последовательности импульсов семиэлементного кода Баркера  $u_n$ , здесь и далее  $n = 0, \dots, N$  – временные отсчеты. Заметим, что в данном случае последовательность Баркера является канонической, поскольку импульсы, определяющие ее структуру, строго следуют друг за другом с единичной скважностью. Здесь и далее представлены результаты моделирования в среде Mathcad с указанием временных и частотных отсчетов по оси абсцисс.

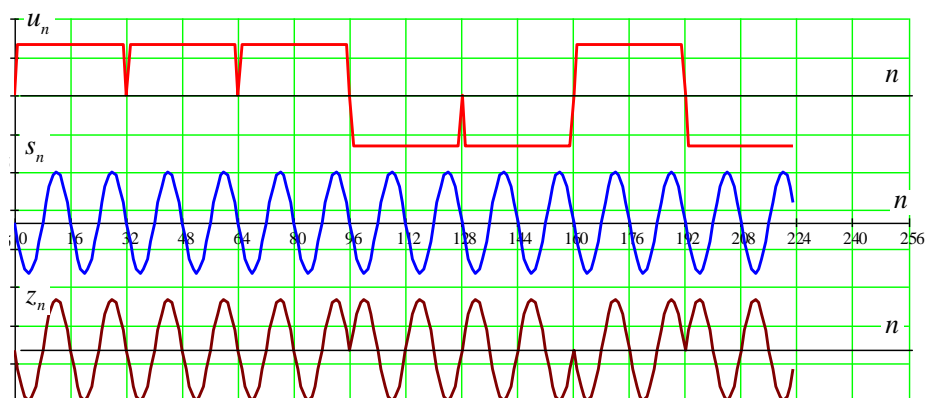


Рис. 1. Временные фрагменты, поясняющие принцип формирования широкополосных сигналов на основе кодов Баркера

Fig. 1. Principle of Formation of Broadband Signals Based on Barker Codes

Проведенный анализ показал, что, как правило, объектом исследования в научных работах выступают импульсные последовательности, сформированные на основе кодов Баркера, а также их корреляционные и спектральные функции [11, 16]. Здесь и далее  $k = 0, \dots, K$  – спектральные отсчеты. Так, на рисунках 2 и 3 представлены вектор модуля спектральной функции импульсной последовательности  $|U_k|$ , сформированной на основе 7-элементного кода, и вектор ее корреляционной функции  $R_n$ .

Очевидно, что при таком подходе амплитудные значения манипулирующих импульсов остаются постоянными на длительности информационного элемента.

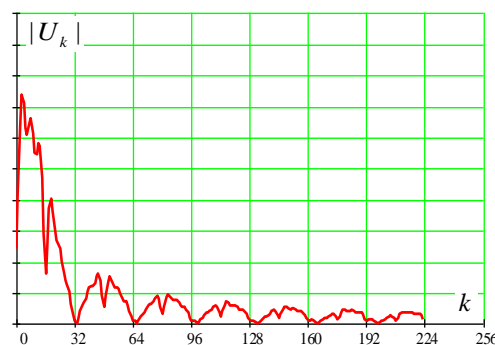


Рис. 2. Спектр функции импульсной последовательности 7-элементного кода Баркера

Fig. 2. The Module of the Spectral Function of the Pulse Sequence of the 7-Element Barker Code

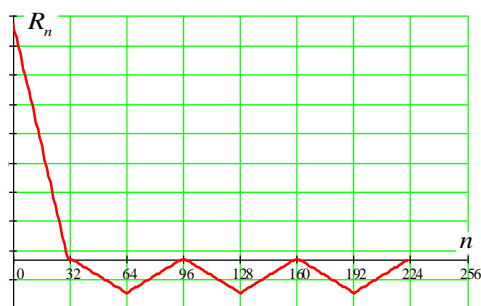


Рис. 3. Корреляционная функция импульсной последовательности 7-элементного кода Баркера

Fig. 3. Correlation Function of the Pulse Sequence of the 7-Element Barker Code

Можно предположить, что изменение структуры манипулирующего импульса приведет к наделению формируемой последовательности новыми свойствами при сохранении общности, характерной для семейства кодов Баркера.

### Предложения по модификации структуры импульсных последовательностей

Предлагаемая модификация основана на изменении формы кодируемого импульса на длительности элементарной посылки с учетом изменения скважности следования их максимумов (рисунок 4).

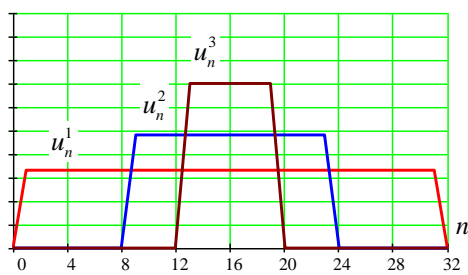


Рис. 4. Структуры импульсов на длительности элементарной посылки

Fig. 4. Structures of Impulses on the Duration of an Elementary Parcel

Другими словами, предлагается изменить скважность следования максимумов импульсов при сохранении принципа их кодирования последовательностями Баркера. Так, на рисунке 4 показаны исходный импульс  $u_n^1$  и два модифицированных  $u_n^2$  и  $u_n^3$  на длительности элементарной посылки. Здесь и далее верхний индекс указывает на размерность скважно-

сти следования максимумов импульсов, а  $n$  – параметр дискретных отсчетов. Действительно, если в исходной последовательности временные границы максимума импульса совпадают с его длительностью, т. е. импульсы следуют строго друг за другом, и их скважность равна 1, то у модифицированных импульсов временные границы их максимумов локализованы в более узком интервале, поэтому скважность следования возрастает. Для примера, представленного на рисунке 4, скважность импульсов  $u_n^2$  и  $u_n^3$  равна 2 и 3, соответственно. Заметим, что все импульсы нормированы по средней энергии.

### Анализ временных соотношений в модифицированных структурах импульсных последовательностей

Очевидно, что изменение скважности приведет к другому распределению частотных составляющих спектров модифицированных импульсов, что демонстрируется на рисунке 5, и изменению характера их корреляционных свойств.

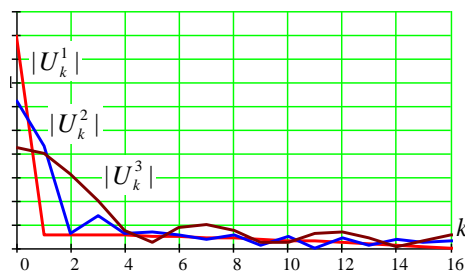


Рис. 5. Спектр импульсов на длительности элементарной посылки

Fig. 5. The Spectrum of Impulses on the Duration of an Elementary Parcel

В частности, для исследования зависимости корреляционных свойств от степени модификации структуры импульсов на основе 7-элементного кода Баркера синтезировались последовательности  $u_n^1$ ,  $u_n^2$  и  $u_n^3$  (рисунок 6), для которых были рассчитаны корреляционные функции  $R_n^1$ ,  $R_n^2$ ,  $R_n^3$  по формуле (1) (рисунок 7).

Согласно полученным результатам, между длительностью импульса  $\tau$  и шириной главного лепестка корреляционной функции  $\Delta$  существует обратная зависимость, что согласуется с теорией. Результаты соотношений представлены в таблицах 2 и 3.

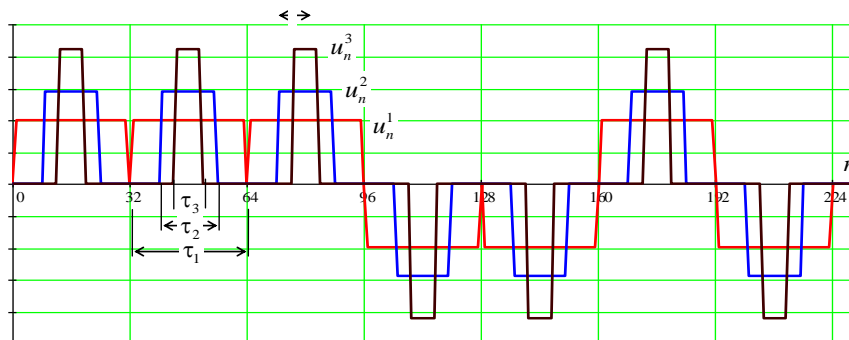


Рис. 6. Импульсные последовательности на основе 7-элементного кода Баркера

Fig. 6. Pulse Sequences Based on the 7-Element Barker Code

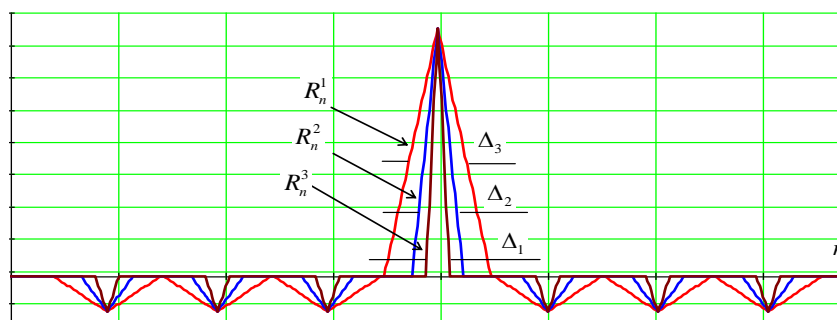


Рис. 7. Корреляционные функции последовательностей на основе 7-элементного кода Баркера

Fig. 7. Sequence Correlation Functions Based on the 7-Element Barker Code

ТАБЛИЦА 2. Соотношение  $\tau_p / \tau_i$ , %

TABLE 2. Pulse Width Ratio (%)

$\tau_p / \tau_i$	$\tau_1$	$\tau_2$	$\tau_3$
$\tau_1$	100	50	25
$\tau_2$	200	100	50
$\tau_3$	400	200	100

ТАБЛИЦА 3. Соотношение  $\Delta_p / \Delta_i$ , %

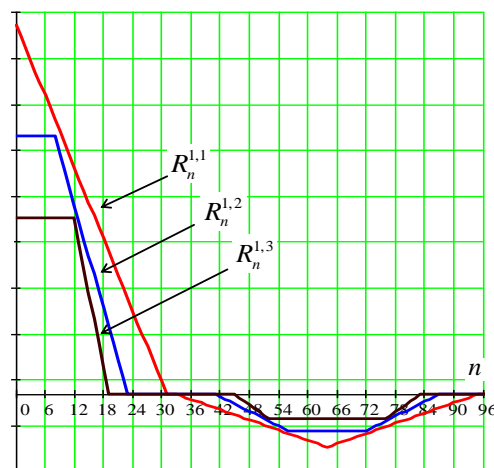
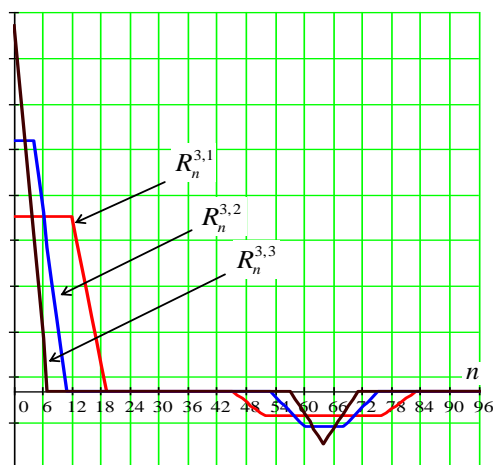
TABLE 3. Correlation Peak Ratio (%)

$\Delta_p / \Delta_i$	$\Delta_1$	$\Delta_2$	$\Delta_3$
$\Delta_1$	100	200	400
$\Delta_2$	50	100	200
$\Delta_3$	25	50	100

Наиболее интересным результатом исследования является структура функции взаимной корреляции (ФВК) модифицированной импульсной последовательности с ее канонической формой. Так, на рисунке 8 представлены структуры ФВК, рассчитанные для различных форм модифицированных последовательностей. В качестве эталонной функции здесь выступала каноническая последовательность. А на рисунке 9 демонстрируются результаты, полученные при условии, что в качестве эталонной функции выступала модифицированная последовательность, у которой скважность следования максимумов равна 3.

Анализ ФВК, сформированных на основе различных форм модифицированных последовательностей, показывает, что они обладают достаточной структурной контрастностью, позволяющей их использование в задачах распознавания сигналов. Поэтому полученные результаты могут иметь интерес для практических приложений, связанных с реализацией технологий CDMA.

В таблице 4 представлены результаты оценки ширины главного лепестка ФВК  $R_n^{1,1}$ ,  $R_n^{1,2}$ ,  $R_n^{1,3}$ ,  $R_n^{2,1}$ ,  $R_n^{2,2}$ ,  $R_n^{2,3}$ ,  $R_n^{3,1}$ ,  $R_n^{3,2}$ ,  $R_n^{3,3}$  (здесь первая цифра верхнего индекса идентифицирует эталонную последовательность, а вторая – обрабатываемую), выраженной в процентах, при очередном использовании в качестве эталонной функции при расчете ФВК импульсных последовательностей  $u_n^1$ ,  $u_n^2$  и  $u_n^3$ .

Рис. 8. ФВК с последовательностью  $u_n^1$ Fig. 8. Sequence Cross-Correlation Functions  $u_n^1$ Рис. 9. ФВК с последовательностью  $u_n^3$ Fig. 9. Sequence Cross-Correlation Functions  $u_n^3$ 

Данные, представленные в таблице 4, дают достаточно полное представление о характере изменения ширины пиков ФВК от структуры импульсной последовательности, используемой в качестве эталонной функции. Поэтому, учитывая, что пик  $R_n^{1,1}$  в 4,43 раза шире пика  $R_n^{3,3}$ , однозначно можно делать вывод о целесообразности использования в качестве эталонных функций при вычислении ФВК, модифицированных импульсных последовательностей.

ТАБЛИЦА 4. Соотношение протяженности/амплитуды пиков ФВК, %

TABLE 4. The Ratio of Cross-Correlation Functions Peaks' Length (%)

		Эталонная последовательность		
		$u^1_n$	$u^2_n$	$u^3_n$
Обрабатываемая последовательность	$u^1_n$	100/100	153/68	271/47
	$u^2_n$	74/68	100/100	157/67
	$u^3_n$	61/47	73/67	100/100

В частности, обработка канонической последовательности кода Баркера с использованием модифицированной последовательности, у которой скважность следования максимума возрастает до 3, позволяет снизить ширину пика результирующей функции взаимной корреляции в 2,71 раза. Но при этом следует учитывать снижение амплитудного значения пика результирующей ФВК и увеличение мощности, выделяемой на формирование ее боковых лепестков.

В таблице 5 представлены результаты оценки зависимости снижения значения амплитуды пика ФВК от вида обрабатываемой последовательности, выраженной в процентах. Полученные результаты указывают на отсутствие оптимальных решений для рассматриваемой ситуации. Это связано с тем, что приходится выбирать компромисс между точностью измерения (определяемой шириной основного

пика ФВК), и вероятностью обнаружения (определяемой энергией основного пика ФВК). Следовательно, окончательный выбор должен приниматься исходя из условий практического применения.

### Заключение

Обоснованность предложенного подхода к модифицированию импульсных последовательностей за счет увеличения скважности следования их максимумов базируется на возможности последующей корреляционной обработки с использованием единого эталона. Такой подход позволит расширить алфавит кодовых конструкций, используемых в радиотехнических системах на основе технологии CDMA. При этом амплитудные различия пиков функций взаимных корреляций могут выступать в качестве одного из признаков разделения таких сигналов.

Другое прагматичное направление применимости способа видится в целенаправленной обработке входных сигналов на основе эталонных последовательностей с большой скважностью следования максимумов импульсов при сохранении порядка смены их полярности. Это позволит в радиолокационных системах повысить разрешающую способность, а в телекоммуникационных – изначально снизить требования к полосе пропускания канала.

Дальнейшие исследования авторы связывают с совместной частотно-временной обработкой функций взаимной корреляции на основе методов, рассмотренных в [17–20].

### Список используемых источников

1. Ненашев В.А., Сергеев А.М., Васильев И.А. Моделирование сложных кодо-модулированных сигналов для современных систем обнаружения и передачи информации // Научная сессия ГУАП (Санкт-Петербург, Россия, 08–12 апреля 2019 г.). Сборник докладов научной сессии, посвященной Всемирному дню авиации и космонавтики. СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2019. С. 413–417.
2. Иванников А.П., Иванников Д.А. Способ формирования и обработки широкополосных сигналов в радиолокаторах с антенными решетками // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2018. № 3(31). С. 17–25.
3. Фридман Л.Б., Синицин Е.А. Минимизация влияния искажений фазоманипулированных сигналов в приёмо-передающих трактах радиолокаторов на эффективность их согласованной и подоптимальной обработки // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2020. № 1-2. С. 473–474.
4. Крячко А.Ф., Дворников С.В., Пшеничников А.В., Маненко С.С., Глухих И.Н., Дворников С.С. Способ формирования структурно-скрытых, помехозащищенных радиосигналов однополосной модуляции с использованием кодов Баркера. Патент на изобретение RU 2749877 C1 от 01.06.2020. Опубл. 18.06.2021.
5. Сьянов В.А. Подавление боковых лепестков составных фазокодомодулированных сигналов на основе кодов Баркера // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2017. № 2. С. 53–56.
6. Коренчук А.С., Дмитриев В.Ф. Применение сигналов с кодами Баркера для опроса радиометок на ПАВ в системах радиочастотной идентификации // Радиопромышленность. 2016. № 2. С. 29–35.
7. Садченко А.В., Кушниренко О.А., Кошелев Е.К., Бондар В.И. Быстродействующий алгоритм восстановления несущей частоты и кадровой синхронизации в модемах с QPSK-модуляцией // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2018. № 1. С. 28–35. DOI:10.15222/TKEA2018.1.28
8. Tsmots I., Rabyk V., Riznyk O., Kynash Y. Method of Synthesis and Practical Realization of Quasi-Barker Codes // Proceeding of the 14th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT 2019, Lviv, Ukraine, 17–19 September 2019). IEEE, 2019. PP. 76–79. DOI:10.1109/STC-CSIT.2019.8929882
9. Tsmots I., Riznyk O., Kynash Y., Myaus O., Rabyk V., Dendiuk M., Gregus M. Simulation Model and Practical Realization of Barker-Like Codes // Proceedings of the 1st International Workshop on Digital Content and Smart Multimedia (DCSMart 2019, Lviv, Ukraine, 23–25 December 2019). CEUR WORKSHOP PROCEEDINGS, 2019. PP. 172–182.
10. Osipov K.A., Prosviriakova L.V., Dmitriev A.A. The study on the possibility of forming quadrature components based on Barker codes // Journal of Physics: Conference Series. Proceedings of the 1st International Scientific Conference on Advances in Science, Engineering and Digital Education, ASEDU-2020, Krasnoyarsk, Russian Federation, 8–9 October 2020. IOP Publ., 2020. Vol. 1691. P. 12046.



11. Banket V., Manakov S. Composite Walsh-Barker Sequences // Proceedings of the 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS 2018, Odessa, Ukraine, 4–7 September 2018). IEEE, 2018. PP. 343–347. DOI:10.1109/UWBUSIS.2018.8520220
12. Савостьянов В.Ю., Сёмин А.А. Синтез фильтров подавления боковых лепестков для кодов Баркера // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2007. Т. 5. № 9. С. 24–28.
13. Ненашев В.А., Сергеев А.М., Капанова Е.А. Исследование и анализ автокорреляционных функций кодовых последовательностей, сформированных на основе моноциклических квазиортогональных матриц // Информационно-управляющие системы. 2018. № 4(95). С. 9–14. DOI:10.31799/1684-8853-2018-4-9-14
14. Балонин Н.А., Сергеев М.Б. Двуматричная М-матрица 22-го порядка // Информационно-управляющие системы. 2014. № 2(69). С. 109–111.
15. Сергеев М.Б., Ненашев В.А., Сергеев А.М. Вложенные кодовые конструкции Баркера–Марсенна–Рагхаварао // Информационно-управляющие системы. 2019. № 3(100). С. 71–81. DOI:10.31799/1684-8853-2019-3-71-81
16. Максимов В.В., Храповицкий И.А. Новые композитные коды Баркера // The Scientific Heritage. 2020. № 49-1(49). С. 28–35.
17. Дворников С.В., Яхеев А.Ф. Метод измерения параметров кратковременных сигналов на основе распределения Алексеева // Информация и космос. 2011. № 1. С. 66–74.
18. Дворников С.В., Осадчий А.И., Дворников С.С., Родин Д.В. Демодуляция сигналов на основе обработки их модифицированных распределений // Контроль. Диагностика. 2010. № 10. С. 46–54.
19. Choi H.I., Williams W.J. Improved time-frequency representation of multicomponent signals using exponential kernels // IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing. 1989. Vol. 37. Iss. 6. PP. 862–871. DOI:10.1109/ASSP.1989.28057
20. Дворников С.В., Железняк В.К., Храмов Р.Н., Желнин С.Р., Медведев М.В., Симонов А.Н. и др. Метод обнаружения радиоизлучений на основе частотно-временного распределения Алексеева // Научное приборостроение. 2006. Т. 16. № 1. С. 107–115.

\* \* \*

## Modified Pulse Sequences Based on Barker Codes

S. Dvornikov<sup>1, 2</sup>, S. Dvornikov Jr.<sup>1, 2</sup>, E. Markov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,  
St. Petersburg, 190000, Russian Federation

<sup>2</sup>Military Academy of Communications,  
St. Petersburg, 194064, Russian Federation

### Article info

DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-1-8-14

Received 5th December 2021

Revised 11th January 2022

Accepted 14th January 2022

**For citation:** Dvornikov S., Dvornikov Jr. S., Markov E. Modified Pulse Sequences Based on Barker Codes. *Proc. of Telecom. Universities*. 2022;8(1):8–14. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-1-8-14

**Abstract:** *The article considers an approach to the modification of manipulative impulse sequences based on Barker codes. It is proposed to change the structure of the encoded pulses by the duration of the elementary message, taking into account the change in the duty cycle of their repetition while maintaining the total average energy. Numerical relations are obtained that determine the spectral and temporal parameters for a seven-element pulse sequence, with an increase in the pulse repetition rate by two and three times. Numerical values are calculated that determine the ratio of the duration of the peaks of the cross-correlation functions between the modified and canonical forms of pulse sequences. Reasonable estimates are presented that characterize the increase in the resolution of the peaks of the cross-correlation functions by 4.43 times in the transition to the proposed modified structure of the pulse sequence.*

**Keywords:** *modification of the structure of pulse sequences, Barker codes, cross-correlation function.*

### References


1. Nenashev V., Sergeev A.M., Vasil'ev I. Modeling of Complex Code Modulated Signals for Modern Detection Systems and Information Transmission. *Proceedings of SUAI Scientific Session, St. Petersburg, Russia, 08–12 April 2019*. St. Petersburg: Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation Publ.; 2019. p.413–417. (in Russ.)
2. Ivannikov A.P., Ivannikov D.A. Broadband Signal Generation and Processing Method in Antenna Array Radars. *Radio and telecommunication systems*. 2018;3(31):17–25. (in Russ.)

3. Fridman L.B., Sinitsin E.A. Minimizing the Influence of Distortions of Phase-Shift Keyed Signals in the transmit-Receive Paths of Radars on the Efficiency of their Coordinated and Suboptimal Processing. *SVCH-tekhnika i telekommunikatsionnye tekhnologii*. 2020;1-2:473–474. (in Russ.)
4. Kryachko A.F., Dvornikov S.V., Pshenichnikov A.V., Manaenko S.S., Glukhikh I.N., Dvornikov S.S. *Method for Forming Structurally Secretive, Noise-Immune Single-Sideband Modulation Radio Signals Using Barker Codes*. Patent RF, no. 2749877 C1, 18.06.2021. (in Russ.)
5. Syanov V.A. Suppression of Side Lobe Signals Based on Compound Barker Codes. *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics (Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossii. Radioelektronika)*. 2017;2:53–56. (in Russ.)
6. Korenchuk A.S., Dmitriev V.F. Interrogation of Saw Tags in RFID Systems Using Barker Encoded Signals. 2016;2:29–35. (in Russ.)
7. Sadchenko A.V., Kushnirenko O.A., Koshelev E.K., Bondar V.I. High-Speed Algorithm for Carrier Frequency Recovery and Frame Synchronization in QPSK-Modulated Modems. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnay Apparature*. 2018;1: 28–35. (in Russ.). DOI:10.15222/TKEA2018.1.28
8. Tsmots I., Rabyk V., Riznyk O., Kynash Y. Method of Synthesis and Practical Realization of Quasi-Barker Codes. *Proceeding of the 14th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies, CSIT 2019, 17–19 September 2019, Lviv, Ukraine*. IEEE; 2019. p.76–79. DOI:10.1109/STC-CSIT.2019.8929882
9. Tsmots I., Riznyk O., Kynash Y., Myaus O., Rabyk V., Dendiuk M., Gregus M. Simulation Model and Practical Realization of Barker-Like Codes. *Proceedings of the 1st International Workshop on Digital Content and Smart Multimedia, DCSMart 2019, 23–25 December 2019, Lviv, Ukraine*. CEUR WORKSHOP PROCEEDINGS; 2019. p.172–182.
10. Osipov K.A., Prosviriakova L.V., Dmitriev A.A. The study on the possibility of forming quadrature components based on Barker codes. *Journal of Physics: Conference Series. Proceedings of the 1st International Scientific Conference on Advances in Science, Engineering and Digital Education, ASEDU-2020, 8–9 October 2020, Krasnoyarsk, Russian Federation*. IOP Publ.; 2020. vol.1691. p.12046.
11. Banket V., Manakov S. Composite Walsh-Barker Sequences. *Proceedings of the 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, UWBUSIS 2018, 4–7 September 2018, Odessa, Ukraine*. IEEE; 2018. p.343–347. DOI:10.1109/UWBUSIS.2018.8520220
12. Savostyanov V.Yu., Syomin A.A. Synthesis of Filters for Suppression of Sidelobes for Some Barker's Codes. *Informatsionno-izmeritel'nyye i upravlyayushchiye sistemy*. 2007;5(9):24–28. (in Russ.)
13. Nenashev V.A., Sergeev A.M., Kapranova E.A. Research and Analysis of Autocorrelation Functions of Code Sequences Formed on the Basis of Monocyclic Quasi-Orthogonal Matrices. *Information and Control Systems*. 2018;4(95):9–14. (in Russ.). DOI:10.31799/1684-8853-2018-4-9-14
14. Balonin N.A., Sergeev M.B. Two-Circulant M-matrix of the 22nd order. *Information and Control Systems*. 2014;2(69): 109–111. (in Russ.)
15. Sergeev M.B., Nenashev V.A., Sergeev A.M. Nested Code SEQUENCES of Barker – Mersenne – Raghavarao. *Information and Control Systems*. 2019;3(100):71–81. (in Russ.) DOI:10.31799/1684-8853-2019-3-71-81
16. Maksimov V.V., Khrapovitsky I.A. New Composite Barker Codes. *The Scientific Heritage*. 2020;49-1(49):28–35. (in Russ.)
17. Dvornikov S., Yakheev A. Method of fast signal parameters measurement on the basis of distribution suggested by Alekseev. *Information and Space*. 2011;1:66–74. (in Russ.)
18. Dvornikov S.V., Osadchiy A.I., Dvornikov S.S., Rodin D.V. Demodulation Based on Processing the Modified Distributions. *Kontrol'. Diagnostika ("Testing. Diagnostics")*. 2010;10:46–54. (in Russ.)
19. Choi H.I., Williams W.J. Improved time-frequency representation of multicomponent signals using exponential kernels. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. 1989;37(6):862–871. DOI:10.1109/ASSP.1989.28057
20. Dvornikov S.V., Zheleznyak V.K., Khramov R.N., Zhelnin S.R., Medvedev M.V., Simonov A.N., et al. Radio Emissions Detection Method Based on Alekseev's Time-Frequency Distribution. *Nauchnoe priborostroenie*. 2006;16(1):107–115. (in Russ.)

## Сведения об авторах:


**ДВОРНИКОВ  
Сергей Викторович**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиотехнических и оптоэлектронных комплексов (Кафедра 21) Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, профессор кафедры радиосвязи Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного, [practicdsv@yandex.ru](mailto:practicdsv@yandex.ru)

 <https://orcid.org/0000-0002-4889-0001>


**ДВОРНИКОВ  
Сергей Сергеевич**

кандидат технических наук, преподаватель института радиотехники, электроники и связи Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, научный сотрудник научно-исследовательского отдела Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного, [dvornik.92@mail.ru](mailto:dvornik.92@mail.ru)

 <https://orcid.org/0000-0001-7426-6475>

**МАРКОВ  
Евгений Вячеславович**

адъюнкт кафедры радиосвязи Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного, [markov1981@mail.ru](mailto:markov1981@mail.ru)

 <https://orcid.org/0000-0002-0020-0526>