

КОНТРОЛЬ АНОМАЛИЙ В СТРУКТУРЕ КОДОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ВЫРАЖЕНИЙ ЛЕПЕСТКОВ АВТОКОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ

DOI: 10.36724/2072-8735-2024-18-12-4-11

Manuscript received 25 October 2024;
Accepted 30 November 2024

Чембарисова Рената Ильдаровна,
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, Россия,
renatachembarisova@yandex.ru

Ненашев Вадим Александрович,
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, Россия,
nenashev.va@yandex.ru, nenashev@guap.ru

Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда
(проект № 24-79-10259).

Ключевые слова: коды Баркера,
автокорреляционная функция, боковые лепестки,
анализ последовательностей, аномалия,
корреляционные характеристики

Для обеспечения достоверности информации, поступающей в реальном времени, важно проводить поиск и анализ аномалий в структуре кодовых последовательностей, поскольку такие отклонения могут значительно исказить исходные данные, затрудняя их корректную интерпретацию и приводя к ошибочным измерениям. В данной работе представлен алгоритм обнаружения аномалий в кодах Баркера, основанный на анализе математических выражений, описывающих уровни лепестков автокорреляционной функции. Этот подход позволяет установить зависимость уровней автокорреляционной функции от значений элементов кодовой последовательности, что позволяет гарантированно определять места влияния аномалий в структуре кода. Цель исследования заключается в разработке подхода, который позволяет выявлять изменения в аналитических выражениях для лепестков автокорреляционной функции кодов Баркера при наличии аномалий. Основная задача заключается не только в выявлении факта отклонений, но и в определении их точного местоположения в структуре кода. Разработанный подход позволяет точно выявлять место аномалии в структуре кодовых последовательностей Баркера, анализируя выражения, описывающие характер изменения боковых лепестков автокорреляционной функции кодов различных длин. В работе проведены эксперименты по определению отклонений в структуре кодов Баркера за счет анализа аналитических выражений, позволяющего определить величину измененного элемента с высокой точностью. Полученные результаты могут быть использованы для улучшения точности обработки данных в различных системах идентификации аномалий, например, в телекоммуникационных системах, где достоверность принимаемых данных является важнейшим фактором. Результаты исследования могут существенно повысить надежность и точность работы таких систем, снижая вероятность возникновения ошибочных измерений в данных, например, в медицинской диагностике, где появление аномалий может повлиять на правильность постановки диагноза.

Информация об авторах:

Чембарисова Рената Ильдаровна, лаборант лаборатории машинного обучения проектно-технологического офиса инженерной школы ГУАП, студентка кафедры аэрокосмических компьютерных и программных систем ГУАП, г. Санкт-Петербург, Россия

Ненашев Вадим Александрович, к.т.н., доцент, заведующий лабораторией машинного обучения проектно-технологического офиса инженерной школы ГУАП, доцент кафедры "Конструирования и технологий электронных и лазерных средств" ГУАП, доцент, г. Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования:

Чембарисова Р.И., Ненашев В.А. Контроль аномалий в структуре кодов на основе анализа выражений лепестков автокорреляционной функции // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Том 18. №12. С. 4-11.

For citation:

Chembarisova R.I., Nenashev V.A. (2024) Anomalies control in the codes structure based on expressions analysis of autocorrelation function petals. T-Comm, vol. 18, no.12, pp. 4-11. (in Russian)

1 Введение

В настоящее время актуально развитие методы и технологии помехозащищенной и высокоскоростной передачи данных по беспроводным каналам связи между элементами группы беспилотных авиационных системам (БАС) на различных уровнях взаимодействия. Для реализации многопозиционных систем БАС требуется объединить распределённые позиции в единую систему сбора и обмена информацией, обеспечивающую достоверность при регистрации принятых эхо-сигналов.

Известно, что классическими способами сбора и передачи информации по радиоканалам присущи недостатки: необходимость лицензирования частот и их нехватка, зашумление канала связи, высокая их загруженность, а также низкая достоверность такого варианта обработки принятых входящих данных.

Поэтому актуальной задачей является разработка и исследование системы сбора и передачи данных, которая учитывает факторы окружающей среды, обнаруживает появления аномалий и оценивает их вклад в искажение, регистрируемой информации на борту приемного устройства БАС.

Одним из актуальных направлений развития как систем обмена данными, так и системе радиолокационного сбора данных является применение различных кодовых последовательностей, которые способствуют обеспечению достоверности регистрируемой информации [1-4].

Под обеспечением достоверности в работе понимается способность бесперебойно функционировать в условиях наличия возможных аномалий, возникающих естественным образом.

Для реализации такой системы сбора и обмена информацией предлагается использовать сигналы, модулированные кодовыми последовательностями, в частности кодами Баркера. Эти коды обладают особыми автокорреляционным свойствам, обеспечивающим относительно низкими уровнями боковых лепестков (БЛ) автокорреляционной функции (АКФ). Главная характеристика кодов Баркера заключается в их способности обеспечивать высокий коэффициент отношения главного лепестка к боковым лепесткам АКФ, что делает их востребованными для генерации зондирующих сигналов в системах сбора, передачи и других систем обнаружением [5, 6].

Последовательности могут быть подвержены различным аномалиям, что приводит к искажениям в их кодовой структуре и как следствие к повышению уровней БЛ АКФ. Это понижает точность измерений и требует разработки алгоритмов для выявления таких отклонений от исходных значений. В данной работе ставится задача разработки такого алгоритма по поиску наличия аномалий в кодовых последовательностях на примере кодов Баркера на основе анализа аналитических выражений, описывающих значения уровней (главного и бокового) лепестков АКФ [7, 8].

Во втором разделе исследования анализируются канонические бинарные коды Баркера, которые используются для модуляции принятых сигналов в условиях возникновения аномалий, искажающих структуру кодовых последовательностей. Рассматриваются автокорреляционные характеристики, а также подробным образом описывается алгоритм, предназначенный для определения уровней главного и боковых лепестков АКФ.

В третьем разделе представлены результаты проведенных компьютерных экспериментов по поиску аномалий. Разработан алгоритм, позволяющий определять как наличие аномалии, так и ее значение, место в кодовой последовательности и ее влияние на уровни лепестков АКФ.

В четвертом разделе подведены основные итоги проведенного исследования.

2 Канонические коды Баркера и значения их уровней АКФ

Для достижения высокой точности обнаружения сигнала на фоне помех обычно используются методы модуляции этих сигналов [9, 10], включая кодовые последовательности. При выборе кода, как правило, предпочтение отдается тому, который имеет наименьший уровень боковых лепестков нормированной автокорреляционной функции. (НАКФ). Как известно, у кодовых последовательностей Баркера, этот уровень равен $1/N$, где N – длина кода. Данные коды широко используются при построении различных устройств и систем обнаружения, в том числе в многопозиционных системах авиационного зондирования земной поверхности [11, 12].

На данный момент существует лишь 9 последовательностей, являющихся кодами Баркера, самая длинная из которых содержит 13 элементов. Последовательности Баркера имеют выигрыш в значении БЛ АКФ среди всех последовательностей той же длины, из-за чего эти коды крайне востребованы в цифровой обработке сигналов [13].

Данные кода Баркера конечной длины с симметричным и бинарным алфавитом и соответствующие им уровни БЛ НАКФ представлены в таблице 1.

Таблица 1

Коды Баркера и их уровни БЛ НАКФ

Длина кода, N	Последовательность Баркера	Уровень БЛ НАКФ
2	+1 -1	-1/2
	+1 +1	1/2
3	+1 +1 -1	-1/3
4	+1 +1 -1 +1	1/4
	+1 +1 +1 -1	-1/4
5	+1 +1 +1 -1 +1	1/5
7	+1 +1 +1 -1 -1 +1 -1	-1/7
11	+1 +1 +1 -1 -1 -1 +1 -1 -1 +1 -1	-1/11
13	+1 +1 +1 +1 +1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 -1 +1	1/13

Как известно, АКФ показывает степень взаимосвязи между модулированным сигналом, представленным кодовой последовательностью, и его сдвинутой копией.

Выражение для вычисления автокорреляции на каждом сдвиге записывается при помощи выражения (1):

$$r(\tau) = \sum_{i=0}^{N-\tau-1} a_i \cdot a_{i+\tau}, \quad (1)$$

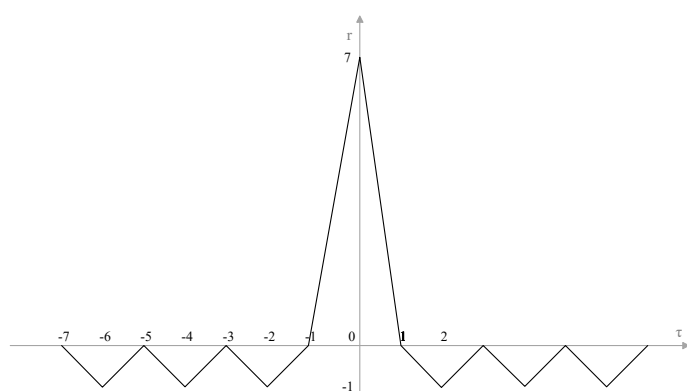
где $r(\tau)$ – значение автокорреляционной функции для сдвига τ ; a_i – элемент кодовой последовательности; N – длина кодовой последовательности.

Механизм вычисления главного и боковых лепестков, описанный выражением (1), для АКФ кода Баркера длиной $N = 7$ представлен в таблице 2 [14]. Графическое изображение этих лепестков представлено на рисунке 1.

Таблица 2

Вычисление АКФ бинарного кода Баркера длины $N = 7$

	1	1	1	-1	-1	1	-1						
-1	-1	-1	-1	1	1	-1	1						
1		1	1	1	-1	-1	1	-1					
-1			-1	-1	-1	1	1	-1	1				
-1				-1	-1	-1	1	1	-1	1			
1					1	1	1	-1	-1	1	-1		
1						1	1	1	-1	-1	1	-1	
1							1	1	1	-1	-1	1	-1
	-1	0	-1	0	-1	0	7	0	-1	0	-1	0	-1

Рис. 1. АКФ кода Баркера длиной $N = 7$

Аналогично представленному выше алгоритму высчитываются значения главного и боковых лепестков для всех кодов Баркера. Результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3

Значения лепестков АКФ для кодов Баркера

Длина кода, N	Значения лепестков АКФ для кода Баркера												
	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7	r_8	r_9	r_{10}	r_{11}	r_{12}	r_{13}
2 (+1 -1)	2	-1											
2 (+1 +1)	2	1											
3	3	0	-1										
4 (+1 +1 -1 +1)	4	-1	0	1									
4 (+1 +1 +1 -1)	4	1	0	-1									
5	5	0	1	0	1								
7	7	0	-1	0	-1	0	-1						
11	11	0	-1	0	-1	0	-1	0	-1	0	-1		
13	13	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1

Тем не менее, данный механизм не предоставляет возможности получить аналитические выражения для кодов последовательностей, в которых один или несколько элементов за-

менены некоторым параметром. Параметр представляет собой измененное значение в исходной канонической последовательности. В работе [15] были представлены аналитические выражения, используемые для определения различных пар кодов, которые заменяют классический алфавит $\{1; -1\}$ для известных длин последовательностей Баркера. Это открывает возможность расширения набора кодовых последовательностей и дополнения теории передачи данных, а также способствует улучшению методов цифровой комплексной обработки модулированных сигналов.

Аналогично кодам, изученным в работе [15], можно получить аналитические выражения лепестков АКФ при замене одного или нескольких элементов кодовой последовательности. Это позволяет более точно анализировать корреляционные характеристики и поведение модифицированных кодов, а также выявлять аномалии в структуре кодов, что ранее было невозможно из-за отсутствия подобных выражений.

3 Поиск аномальных элементов в кодовых конструкциях по аналитическим выражениям

3.1 Аномалии в кодовой последовательности

Информация передается и принимается через разнообразные коммуникационные каналы, включая радиоволны, оптоволоконные линии и электрические провода. В ходе передачи данные преобразуются в определенные сигналы, которые перемещаются от передающего устройства к приемному через выбранный канал связи.

На стороне получателя эти сигналы декодируются и превращаются обратно в исходные данные, однако влияние шумов и наличие аномалий может существенно затруднить этот процесс. Шумы могут возникать по нескольким причинам, включая электромагнитные вмешательства, погодные условия или повреждения канала связи. Влияние помех может привести к искажению сигналов (к появлению аномалий), что, в свою очередь, приводит к ошибкам в системах сбора и передаче информации.

Аномалии могут проявляться в форме битовых ошибок [16], искажений амплитуды или фазы импульсов [17], а также в появлении или утрате сигналов. К примеру, в кодовой последовательности может произойти изменение одного из элементов в результате действия шумов [18, 19], что приводит к ошибочному интерпретированию информации.

Одной из главных проблем являются искажения, связанные с появлением амплитудных аномалий, когда принимаемый модулированный сигнал имеет амплитудные значения, значительно отличающиеся от исходных, что в итоге затрудняет процесс его декодирования и приводит к наличию ложных срабатываний.

В системах сбора и передачи данных для группы БАС, где обнаружения полезной информации на фоне шумов осуществляется через фиксированный порог заданного уровня, подобные отклонения могут привести к неверной интерпретации данных, так как система рассчитывает на точное соответствие амплитудным уровням сигнала определенным значениям. Эти наличия аномалий могут вызывать искажение данных или даже их потерю, что особенно критично в системах, где достоверность сбора и передачи информации имеют ключевое значение.

3.2 Постановка задачи по выявлению аномалий

В данной работе ставится задача разработки алгоритма, который позволит выявлять амплитудные аномалии в кодовых последовательностях по несоответствию АКФ. Процедура выявления аномалии включает в себя следующие действия.

1) Поиск номера элемента, в котором произошло искажения в кодовой последовательности. Анализируются, амплитуды каких именно элементов в последовательности были изменены.

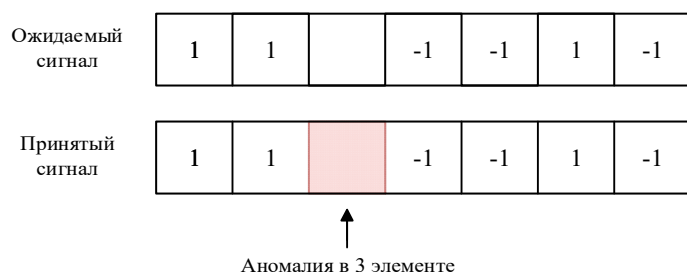


Рис. 2. Место аномалии в последовательности

2) Вычисление величины искажения и отклонения от исходного значения.

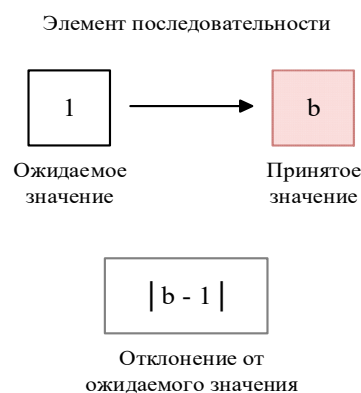


Рис. 3. Значение искажения

3) Нахождение места влияния, то есть какие из лепестков автокорреляционной функции были искажены из-за выявленной аномалии.

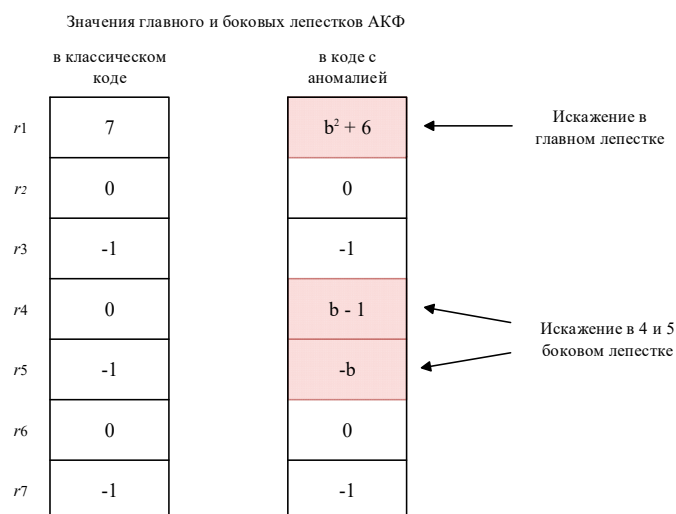


Рис. 4. Место влияния аномалий

Таким образом, на рисунках 2-4 наглядно проиллюстрирована процедура нахождения аномалии в коде Баркера длиной $N = 7$. Эти рисунки демонстрируют ключевые этапы алгоритма, включая поиск номера элемента с искажением, вычисление величины искажения и определение места влияния аномалии на автокорреляционную функцию.

3.3 Процедура выявления аномалий

Пусть на приемное устройство БАС системы сбора и обработки БАС поступает сигнал, модулированный некоторой известной последовательностью, которую необходимо обработать. Так как количество кодов Баркера различных длин ограничено, можно составить аналитические выражения для всевозможных комбинаций аномалий, начиная от изменения одного элемента в кодовой последовательности. Например, у кода Баркера с длиной $N = 3$ может быть 1, 2 или 3 искажения, следовательно, есть лишь 6 возможных изменений кода: $[b \ 1 \ -1]$, $[1 \ b \ -1]$, $[1 \ 1 \ -b]$, $[b \ c \ -1]$, $[1 \ b \ -c]$, $[b \ 1 \ -c]$, где a , b и c – аномальные амплитудные значения. При помощи алгоритма, описанного в пункте 2, следует вычислить главные и боковые лепестки АКФ для всех комбинаций. Результаты вычисления представлены в таблице 4.

Таблица 4

Вычисление АКФ кода Баркера длины $N = 3$ с аномалией

	b	1	-1		
-1	-b	-1	1		
1		b	1	-1	
b			b^2	b	-b
	-b	b-1	b^2+2	b-1	-b

Аналогично вычисляются значения для остальных длин последовательностей Баркера. Результат аналитических выражений, описывающих уровни лепестков АКФ для всех вышеприведенных аномалий кода Баркера с длиной $N = 3$ представлены в таблице 5.

Таблица 5

Значения АКФ для кода Баркера длиной $N = 3$ с аномалиями

	Без аномалии	Аномалия в 1 элементе кода	Аномалия в 2 элементе кода	Аномалия в 3 элементе кода	Аномалия в 1 и 2 элементе кода	Аномалия в 1 и 3 элементе кода	Аномалия во всех элементах кода
	$[1 \ 1 \ -1]$	$[b \ 1 \ -1]$	$[1 \ b \ -1]$	$[1 \ 1 \ -b]$	$[b \ c \ -1]$	$[1 \ b \ -c]$	$[a \ b \ -c]$
r_1	3	b^2+2	b^2+2	b^2+2	b^2+c^2+1	b^2+c^2+1	$a^2+b^2+c^2$
r_2	0	b-1	0	1-b	$b \cdot c - c$	$c - b \cdot c$	$a \cdot b - b \cdot c$
r_3	-1	-b	-1	-b	-b	-b	a-c

Как видно из таблицы 5, не существует полностью совпадающих значений АКФ, из чего можно сделать вывод, что определить наличие и значение аномалии вполне реализуемая задача в случае наличия одной аномалии в кодовой последовательности. Далее требуется проанализировать полученные в таблице 5 выражения для лепестков АКФ с аномалиями и выявить закономерность, позволяющую определить место аномалии в кодовой конструкции.

3.4. Компьютерные эксперименты по поиску аномалий

Для большего понимания алгоритма, рассмотренного в пункте 3.3, следует разобрать несколько численных примеров по поиску аномалий. В таблицах 6 и 7 приведены численные значения уровней главного и боковых лепестков АКФ для кода Баркера с длиной $N = 3$ с 1, 2 и 3 аномалиями.

Таблица 6

Пример с кодом Баркера с длиной $N = 3$,
где $a = 2$, $b = 3$, $c = 4$

	Без аномалии	Аномалия в 1 элементе кода	Аномалия во 2 элементе кода	Аномалия в 3 элементе кода	Аномалия в 1 и 2 элементе кода	Аномалия во 2 и 3 элементе кода	Аномалия в 1 и 3 элементе кода	Аномалия во всех элементах кода
	[1 1 -1]	[3 1 -1]	[1 3 -1]	[1 1 -3]	[3 4 -1]	[1 3 -4]	[3 1 -4]	[2 3 -4]
r_1	3	11	11	11	26	26	26	29
r_2	0	2	0	-2	8	-9	-1	-6
r_3	-1	-3	-1	-3	-3	-4	-12	8

Таблица 7

Пример с кодом Баркера с длиной $N = 3$,
где $a = 6$, $b = 4$, $c = 2$

	Без аномалии	Аномалия в 1 элементе кода	Аномалия во 2 элементе кода	Аномалия в 3 элементе кода	Аномалия в 1 и 2 элементе кода	Аномалия во 2 и 3 элементе кода	Аномалия в 1 и 3 элементе кода	Аномалия во всех элементах кода
	[1 1 -1]	[4 1 -1]	[1 4 -1]	[1 1 -4]	[4 2 -1]	[1 4 -2]	[4 1 -2]	[3 4 -2]
r_1	3	18	18	18	21	21	21	56
r_2	0	3	0	-3	6	-4	2	32
r_3	-1	-4	-1	-4	-4	-2	-8	12

Рассмотрим случай, когда значения аномалий a , b и c превышают единицу. Итак, на основе перечисленных выше примеров, можно сделать определенные выводы о влиянии аномалии на лепестки АКФ, месте и значении ее искажений в коде:

1) Если $r_2 = 0$, $r_3 = -1$, а $r_1 \neq 3$, то произошло искажение во втором элементе кода, вычислить значение аномалии можно по выражению $r_1 = b^2 + 2$;

2) Если $r_2 > 0$, то произошло искажение в первом элементе кода, вычислить значение аномалии можно по выражению $r_3 = -b$.

а. Если r_2 при этом соответствует выражению $b - 1$, то искажение находится только в первом элементе кода;

б. Если r_2 при этом не соответствует выражению $b - 1$, то искажение находится и в первом, и во втором элементах кода;

3) Если $r_2 < 0$, то произошло искажение в третьем элементе кода, вычислить значение аномалии можно по выражению $r_3 = -b$.

а. Если r_2 при этом соответствует формуле $1 - b$, то искажение находится только в третьем элементе кода;

б. Если r_2 при этом не соответствует формуле $1 - b$, то искажение находится и в третьем, и во втором элементах кода;

4) Если ни один из пунктов выше не соответствует полученным данным, а $r_3 < 0$, то произошло искажение в первом и третьем элементе кода, вычислить значение аномалий можно

при помощи анализа всех лепестков АКФ (так как все лепестки зависят от искаженных значений кода);

5) Иначе, если ни один из перечисленных выше пунктов не соответствует полученным значениям лепестков АКФ, искажение находится во всех трех элементах кода. Найти значение аномалий можно при помощи анализа всех лепестков АКФ.

Также следует рассмотреть более сложные примеры, например, случай с кодом Баркера длиной $N = 7$. У этого кода может быть от 1 до 7 аномалий, в данной работе рассматривается поиск только одной. Возможные изменения кода: $[b 1 1 -1 -1 1 -1]$, $[1 b 1 -1 -1 1 -1]$, $[1 1 b -1 -1 1 -1]$, $[1 1 1 b -1 1 -1]$, $[1 1 1 -1 b 1 -1]$, $[1 1 1 -1 -1 b -1]$, $[1 1 1 -1 -1 1 b]$, где b – аномалия в кодовой последовательности. Аналитические выражения для главного и боковых лепестков АКФ кода Баркера с длиной $N = 7$ с одной аномалией приведены в таблице 8.

Таблица 8

Значения АКФ для кода Баркера длиной $N = 7$ с 1 аномалией

	Без аномалии	Аномалия в 1 элементе кода	Аномалия во 2 элементе кода	Аномалия в 3 элементе кода	Аномалия в 4 элементе кода	Аномалия в 5 элементе кода	Аномалия в 6 элементе кода	Аномалия в 7 элементе кода
	[1 1 1 -1 -1 1 -1]	[b 1 1 -1 -1 1 -1]	[1 b 1 -1 -1 1 -1]	[1 1 b -1 -1 1 -1]	[1 1 1 b -1 1 -1]	[1 1 1 -1 b 1 -1]	[1 1 1 -1 -1 b -1]	[1 1 1 -1 -1 1 b]
r_1	7	$b^2 + 6$	$b^2 + 6$	$b^2 + 6$	$b^2 + 6$	$b^2 + 6$	$b^2 + 6$	$b^2 + 6$
r_2	0	$b - 1$	$2b - 2$	0	0	0	$2 - 2b$	$1 - b$
r_3	-1	$b - 2$	$-b$	-1	$1 - 2b$	-1	$-b$	$b - 2$
r_4	0	$1 - b$	$1 - b$	$b - 1$	0	$1 - b$	$b - 1$	$b - 1$
r_5	-1	$-b$	$b - 2$	$-b$	-1	$-b$	$b - 2$	$-b$
r_6	0	$b - 1$	$1 - b$	0	0	0	$b - 1$	$1 - b$
r_7	-1	$-b$	-1	-1	-1	-1	-1	$-b$

Аналогично рассмотренному выше примеру (таблица 8), можно сделать вывод о влиянии на лепестки АКФ, месте и значении аномальных искажений в коде:

1) Если ни один из боковых лепестков $r_2 - r_7$ не совпадает со значениями боковых лепестков оригинального кода Баркера, тогда вычислить значение аномалии можно по выражению $r_7 = -b$. Из этого можно сделать вывод, что аномалия находится либо в первом, либо в последнем элементе кодовой конструкции. Для уточнения достаточно проверить любой другой боковой лепесток, например, r_2 .

а. Если r_2 при этом соответствует выражению $b - 1$, то искажение находится в первом элементе кода;

б. Если r_2 при этом соответствует выражению $1 - b$, то искажение находится в седьмом элементе кода;

2) Если $r_7 = -1$, то аномалия находится либо во втором, либо в шестом элементе кода. Для уточнения достаточно проверить любой другой боковой лепесток, например, r_4 .

а. Если r_4 при этом соответствует выражению $b - 1$, то искажение находится в шестом элементе кода;

б. Если r_4 при этом соответствует выражению $1 - b$, то искажение находится во втором элементе кода;

3) Если $r_1 = 0$, $r_2 = -1$, $r_6 = 0$, $r_7 = -1$, то аномалия находится либо в третьем, либо в пятом элементе кода. Для уточнения достаточно проверить любой другой боковой лепесток, например, значение r_4 .

а. Если r_4 при этом соответствует выражению $b - 1$, то искажение находится в третьем элементе кода;

б. Если r_2 при этом соответствует выражению $1 - b$, то искажение находится в пятом элементе кода;

4) Если $r_1 = 0$, $r_2 = -1$, $r_4 = 0$, $r_5 = -1$, $r_6 = 0$, $r_7 = -1$, то аномалия находится в четвертом элементе кода.

И, наконец, третий пример, код Баркера с длиной $N = 11$. У этого кода может быть от 1 до 11 аномалий, как и предыдущем численных примерах рассматривается поиск только одной аномалии. Возможные изменения кода: $[b\ 1\ 1\ -1\ -1\ -1\ -1\ -1\ 1\ 1\ -1]$, $[1\ b\ 1\ -1\ -1\ -1\ -1\ -1\ 1\ 1\ -1]$, $[1\ 1\ b\ -1\ -1\ -1\ -1\ -1\ 1\ 1\ -1]$, $[1\ 1\ 1\ -b\ -1\ -1\ -1\ -1\ 1\ 1\ -1]$, $[1\ 1\ 1\ -1\ -b\ -1\ -1\ -1\ 1\ 1\ -1]$, $[1\ 1\ 1\ -1\ -1\ -b\ -1\ -1\ 1\ 1\ -1]$, $[1\ 1\ 1\ -1\ -1\ -1\ -b\ -1\ 1\ 1\ -1]$, $[1\ 1\ 1\ -1\ -1\ -1\ -1\ -b\ 1\ 1\ -1]$, $[1\ 1\ 1\ -1\ -1\ -1\ -1\ -1\ -b\ 1\ 1\ -1]$, $[1\ 1\ 1\ -1\ -1\ -1\ -1\ -1\ 1\ -b\ 1\ 1\ -1]$, где b – аномалия. Аналитические выражения для главного и боковых лепестков АКФ последовательности Баркера длиной $N = 11$ с одной аномалией приведены в таблице 9.

Таблица 9

Значения АКФ для кода Баркера
длиной $N = 11$ с 1 аномалией

	Без аномалии	Аномалия в 1 элементе кода	Аномалия во 2 элементе кода	Аномалия в 3 элементе кода	Аномалия в 4 элементе кода	Аномалия в 5 элементе кода
	$[1\ 1\ 1\ -1\ -1\ -1\ -1\ -1\ 1\ 1\ -1]$	$[b\ 1\ 1\ -1\ -1\ -1\ -1\ -1\ 1\ 1\ -1]$	$[1\ b\ 1\ -1\ -1\ -1\ -1\ -1\ 1\ 1\ -1]$	$[1\ 1\ b\ -1\ -1\ -1\ -1\ -1\ 1\ 1\ -1]$	$[1\ 1\ 1\ -b\ -1\ -1\ -1\ -1\ 1\ 1\ -1]$	$[1\ 1\ 1\ -1\ -b\ -1\ -1\ -1\ 1\ 1\ -1]$
r_1	11	$b^2 + 10$	$b^2 + 10$	$b^2 + 10$	$b^2 + 10$	$b^2 + 10$
r_2	0	$b - 1$	$2b - 2$	0	0	$2b - 2$
r_3	-1	$b - 2$	$-b$	-1	-1	$1 - 2b$
r_4	0	$1 - b$	$1 - b$	$1 - b$	$2 - 2b$	0
r_5	-1	$-b$	$-b$	$b - 2$	$b - 2$	-1
r_6	0	$1 - b$	$b - 1$	$1 - b$	$b - 1$	$1 - b$
r_7	-1	$b - 2$	$-b$	$-b$	$-b$	$b - 2$
r_8	0	$1 - b$	$1 - b$	$b - 1$	$b - 1$	0
r_9	-1	$-b$	$b - 2$	$-b$	-1	-1
r_{10}	0	$b - 1$	$1 - b$	0	0	0
r_{11}	-1	$-b$	-1	-1	-1	-1

Продолжение таблицы 9

	Аномалия в 6 элементе кода	Аномалия в 7 элементе кода	Аномалия в 8 элементе кода	Аномалия в 9 элементе кода	Аномалия в 10 элементе кода	Аномалия в 11 элементе кода
	$[1\ 1\ 1\ -1\ -1\ -b\ 1\ -1\ -1\ 1\ -1]$	$[1\ 1\ 1\ -1\ -1\ -1\ b\ -1\ -1\ 1\ -1]$	$[1\ 1\ 1\ -1\ -1\ -1\ 1\ -b\ 1\ 1\ -1]$	$[1\ 1\ 1\ -1\ -1\ -1\ 1\ -1\ -b\ 1\ -1]$	$[1\ 1\ 1\ -1\ -1\ -1\ 1\ -1\ -1\ b\ -1]$	$[1\ 1\ 1\ -1\ -1\ -1\ 1\ -1\ -1\ 1\ -b]$
r_1	$b^2 + 10$	$b^2 + 10$	$b^2 + 10$	$b^2 + 10$	$b^2 + 10$	$b^2 + 10$
r_2	0	$2 - 2b$	0	0	$2 - 2b$	$1 - b$
r_3	$2b - 3$	$1 - 2b$	-1	-1	$-b$	$b - 2$
r_4	0	0	$2b - 2$	$b - 1$	$b - 1$	$b - 1$
r_5	$1 - 2b$	-1	$b - 2$	$b - 2$	$-b$	$-b$
r_6	0	$b - 1$	$1 - b$	$b - 1$	$1 - b$	$b - 1$
r_7	-1	$b - 2$	$-b$	$-b$	$-b$	$b - 2$
r_8	0	0	$1 - b$	$1 - b$	$b - 1$	$b - 1$
r_9	-1	-1	-1	$-b$	$b - 2$	$-b$
r_{10}	0	0	0	0	$b - 1$	$1 - b$
r_{11}	-1	-1	-1	-1	-1	$-b$

Влияние на боковые лепестки АКФ, место и значение искажений в коде:

1) Если ни один из боковых лепестков $r_2 - r_{11}$ не совпадает со значениями боковых лепестков оригинального кода Баркера, тогда значение вычислить значение аномалии можно по выражению $r_{11} = -b$. Из этого условия можно сделать вывод,

что аномалия находится либо в первом, либо в последнем элементе кода. Для уточнения достаточно проверить значение любого другого бокового лепестка, например, r_2 .

а. Если r_2 при этом соответствует выражению $b - 1$, то искажение находится в первом элементе кода;

б. Если r_2 при этом соответствует выражению $1 - b$, то искажение находится в последнем элементе кода;

2) Если $r_{11} = -1$, то аномалия находится либо во втором, либо в десятом элементе кода. Для уточнения достаточно проверить любой другой боковой лепесток, например, r_4 .

а. Если r_4 при этом соответствует выражению $1 - b$, то искажение находится во втором элементе кода;

б. Если r_4 при этом соответствует выражению $b - 1$, то искажение находится в десятом элементе кода;

3) Если $r_2 = 0$, $r_3 = -1$, $r_{10} = 0$, $r_{11} = -1$, то аномалия находится либо в третьем, либо в девятом элементе кода. Для уточнения достаточно проверить любой другой боковой лепесток, например, r_4 .

а. Если r_4 при этом соответствует выражению $1 - b$, то искажение находится в третьем элементе кода;

б. Если r_4 при этом соответствует выражению $b - 1$, то искажение находится в девятом элементе кода;

4) Если $r_2 = 0$, $r_3 = -1$, $r_9 = -1$, $r_{10} = 0$, $r_{11} = -1$, то аномалия находится либо в четвертом, либо в восьмом элементе кода. Для уточнения достаточно проверить любой другой боковой лепесток, например, r_6 .

а. Если r_6 при этом соответствует выражению $b - 1$, то искажение находится в четвертом элементе кода;

б. Если r_6 при этом соответствует выражению $1 - b$, то искажение находится в восьмом элементе кода;

5) Если $r_2 = 0$, $r_3 = -1$, $r_8 = 0$, $r_9 = -1$, $r_{10} = 0$, $r_{11} = -1$, то аномалия находится либо в пятом, либо в седьмом элементе кода. Для уточнения достаточно проверить любой другой боковой лепесток, например, r_6 .

а. Если r_6 при этом соответствует формуле $1 - b$, то искажение находится в пятом элементе кода;

б. Если r_6 при этом соответствует формуле $b - 1$, то искажение находится в седьмом элементе кода;

6) Если $r_2 = 0$, $r_3 = -1$, $r_4 = 0$, $r_6 = 0$, $r_7 = -1$, $r_8 = 0$, $r_9 = -1$, $r_{10} = 0$, $r_{11} = -1$, то аномалия находится в шестом элементе кода.

Стоит отметить, что в приведенных численных примерах рассматривалась возможность возникновения только одной аномалии в структуре последовательности. Если аномалий будет больше, условия проверки усложняются.

4 Заключение

Результаты исследования показывают, что наличие аномальных значений в кодовых последовательностях Баркера значительно искажает оригинальную автокорреляционную функцию, что позволяет выявить как факт их появления, так и их точное местоположение в структуре кода.

Это открывает перспективы для использования алгоритма по поиску аномалий в кодах на основе анализа аналитических выражений, описывающих уровни лепестков автокорреляционной функции. Разработанный алгоритм особо актуален при реализации систем с высокими требованиями к достоверности передачи и сбору данных. Например, при внедрении разработанного алгоритма в малогабаритных бортовых радиоло-

кационных системах, базирующихся на БАС и осуществляющих контроль зон земной поверхности, а также при реализации для них системы обмена данными в целях объединения БАС в единую группу. Такая система должна обеспечивать бесперебойный прием потоковых данных в режиме реального времени. Разработанное решение минимизирует потери данных и значительно повышает общую достоверность подобных систем в условиях сложной и непредсказуемой внешней среды.

Перспективы дальнейшего развития этого направления связаны с расширением возможностей предложенного подхода для повышения эффективности функционирования систем связи и радиолокационных. В будущем планируется проведение исследований, направленных на разработку устойчивых к помехам зондирующих сигналов, которые будут одновременно модулироваться по нескольким параметрам, например, одновременно по частоте, ширине элементарного импульса и амплитуде. Применение таких сигналов обеспечит однозначную идентификацию радиолокационных сигналов, привязанных к конкретным передающим позициям, что позволит однозначно выделять их даже при сложных условиях приема в совместном канале.

Литература

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: Сборник докладов научной сессии, посвященной Всемирному дню авиации и космонавтики. В 3-х частях, Санкт-Петербург, 08-12 апреля 2019 г. Том Часть II. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2019. С. 413-417. EDN MKBBPF
2. Sorokin A.B., Shepeta A.P., Nenashev V.A., Wattimena G.M. Comparative characteristics of anti-collision processing of radio signal from identification tags on surface acoustic waves // Information and Control Systems. 2019. No. 1(98), pp. 48-56. DOI 10.31799/1684-8853-2019-1-48-56. EDN YWNJJB
3. Nenashev V.A., Khanykov I.G. Formation of fused images of the land surface from radar and optical images in spatially distributed on-board operational monitoring systems // Journal of Imaging. 2021. Vol. 7, No. 12. DOI 10.3390/jimaging7120251. EDN WMKGWE
4. Ненашев В.А., Ханьков И.Г. Формирование комплексного изображения земной поверхности на основе кластеризации пикселей локационных снимков в многопозиционной бортовой системе // Информатика и автоматизация. 2021. Т. 20, № 2. С. 302-340. DOI 10.15622/ia.2021.20.2.3. EDN BHBULC
5. Верба В.С. Справочник по радиолокации / Под ред. М.И. Скольникова. Пер. с англ. под общей ред. В.С. Вербы. В 2 кн. Кн. 1. М.: Техносфера. 2014. 672 с.
6. Трухачев А.А. Радиолокационные сигналы и их применение. М.: Военное издательство. 2005. 320 с.
7. Никитин Н.П., Лузин В.И., Гадзиковский В.И., Марков Ю.В. Телевизионные цифровые системы: учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. 108 с.
8. Бирюк А.А., Довгаль Т.А., Максимовская А.И., Орешкин В.И. 114 Импульсный радар ближнего действия // Материалы XV Молодежной научно-технической конференции «Радиолокация и связь – перспективные технологии» М.: Мир науки, 2017. 34-37 с.
9. Одинец А.И. Цифровые устройства: учеб. пособие; Минобрнауки России, ОмГТУ. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2016. 90 с.
10. Хазикарамов А.У., Сагитова А.Р. Способы модуляции // Вестник магистратуры. 2019. Т. 9-1, № 1. С. 5-6.
11. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли: основы и методы дистанционных исследований в геологии. Пер. с нем. В.А. Буша, В.П. Колчанова, С.Ф. Скобелева; под ред. В.Г. Трифонова. М.: Мир, 1988. 343 с.
12. Кашкин В.Б., Сухинин А.И. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений: Учебное пособие. М.: Логос. 2001. 264 с.
13. Гантмахер В.Е., Быстров Н.Е., Чеботарев Д.В. Шумоподобные сигналы. Анализ, синтез, обработка. СПб.: Наука и Техника. 2005. 400 с.
14. Патент № 2703996 С2 Российская Федерация, МПК G01S 13/90. Способ локации целей в передних зонах обзора бортовых радиолокационных станций двухпозиционной радиолокационной системы: № 2019108828: заявл. 26.03.2019; опубл. 23.10.2019 / Г. А. Коржавин, В. А. Ненашев, А. П. Шепета [и др.]; заявитель Акционерное общество "Концерн "Гранит-Электрон"
15. Ненашев В.А., Бестугин А.Р., Киришина И.А., Ненашев С.А. Методика поиска модифицированных кодовых последовательностей Баркера // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Т. 17, № 12. С. 15-21. DOI 10.36724/2072-8735-2023-17-12-15-21
16. Агеев Ф.И., Вознюк В.В. Методика расчета вероятности битовой ошибки оптимального посимвольного когерентного приема двоичных 3 противоположных фазоманипулированных сигналов при наличии в канале радиосвязи узкополосной шумовой помехи // Труды МАИ. 2022. Т. 124. DOI: 10.34759/trd-2022-124-15.
17. Ненашев В.А., Силицын В.А., Страхов С.А. Исследование влияния промышленных помех на характеристики сжатия фазоманипулированных сигналов в первичных РЛС // Военмех. Вестник Балтийского Государственного Технического Университета. 2017. Т. 36. С. 351-355.
18. Гурина Л.А. Электромагнитные помехи и методы защиты от них: Учебное пособие. Благовещенск: Амурский гос. ун-т., 2006. 105 с.
19. Кочин Л.Б., Смирнов В.В., Страхов С.Ю. Неумышленные помехи и электромагнитная совместимость: учебное пособие; Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2018. 110 с.

ANOMALIES CONTROL IN THE CODES STRUCTURE BASED ON EXPRESSIONS ANALYSIS OF AUTOCORRELATION FUNCTION PETALS

Renata I. Chembarisova, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia,
renatachembarisova@yandex.ru

Vadim A. Nenashev, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia,
nenashev.va@yandex.ru, nenashev@guap.ru

Abstract

To ensure the reliability of information received in real time, it is important to search for and analyze anomalies in the structure of code sequences, since such deviations can significantly distort the original data, making it difficult to correctly interpret them and leading to erroneous measurements. This paper presents a method for detecting anomalies in Barker codes based on the analysis of mathematical expressions describing the levels of the autocorrelation function petals. This approach allows us to establish the dependence of the autocorrelation function levels on the values of the code sequence elements, which allows us to reliably determine the locations of the influence of anomalies in the code structure. The purpose of the study is to develop an approach that allows us to identify changes in analytical expressions for the petals of the autocorrelation function of Barker codes in the presence of anomalies. The main task is not only to identify the fact of deviations, but also to determine their exact location in the code structure. The developed approach allows to accurately identify the location of anomalies in the structure of Barker code sequences by analyzing expressions describing the nature of changes in the side lobes of the autocorrelation function of codes of different lengths. In the work, experiments were conducted to determine deviations in the structure of Barker codes by analyzing analytical expressions, which allows determining the value of the changed element with high accuracy. The obtained results can be used to improve the accuracy of data processing in various anomaly identification systems, for example, in telecommunication systems, where the reliability of the received data is the most important factor. The results of the study can significantly increase the reliability and accuracy of such systems, reducing the likelihood of erroneous measurements in data, for example, in medical diagnostics, where the appearance of anomalies can affect the correctness of the diagnosis.

Keywords: Barker codes, autocorrelation function, side lobes, sequence analysis, anomaly, correlation characteristics

References

- [1] V. A. Nenashev, A. M. Sergeev, I. A. Vasiliev, "Modeling of Complex Code-Modulated Signals for Modern Information Detection and Transmission Systems," *Scientific session of GUAP: Collection of reports of the scientific session dedicated to the World Aviation and Cosmonautics Day*. In 3 parts, St. Petersburg, April 08-12, 2019. Part II. St. Petersburg: St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 2019, pp. 413-417.
- [2] A. B. Sorokin, A. P. Shepeta, V. A. Nenashev, G. M. Wattimena, "Comparative characteristics of anti-collision processing of radio signal from identification tags on surface acoustic waves," *Information and Control Systems*. 2019. No. 1(98), pp. 48-56. DOI 10.31799/1684-8853-2019-1-48-56
- [3] V. A. Nenashev, I. G. Khanykov, "Formation of fused images of the land surface from radar and optical images in spatially distributed on-board operational monitoring systems," *Journal of Imaging*. 2021. Vol. 7. No. 12. DOI 10.3390/jimaging7120251
- [4] V. A. Nenashev, I. G. Khanykov, "Formation of a complex image of the earth's surface based on clustering of pixels of location images in a multi-position on-board system," *Computer Science and Automation*. 2021. Vol. 20, No. 2, pp. 302-340. DOI 10.15622/ia.2021.20.2.3
- [5] V. S. Verba, "Handbook of radar," Edited by M. I. Skolnik. Translated from English. In 2 books. Book 1. Moscow: Technosphere. 2014. 672 p.
- [6] A. A. Trukhachev, "Radar signals and their application," Moscow: Military Publishing House. 2005. 320 p.
- [7] N. P. Nikitin, V. I. Luzin, V. I. Gadzikovsky, Yu. V. Markov, "Television digital systems: a textbook," Yekaterinburg: Ural University Press, 2016. 108 p.
- [8] A. A. Biryuk, T. A. Dovgal, A. I. Maksimovskaya, V. I. Oreshkin, "114 Short-range pulse radar," *Materials of the XV Youth Scientific and Technical Conference "Radar and communications - promising technologies"*. Moscow: Mir Nauki, 2017, pp. 34-37.
- [9] A. I. Odinets, "Digital devices: studies. handbook," Ministry of Education and Science of Russia, OmSTU. Omsk: Publishing House of OmSTU, 2016. 90 p.
- [10] A. U. Khazikaramov, A. R. Sagitova, "Methods of modulation," *Bulletin of the magistracy*. 2019. Vol. 9-1, No. 1, pp. 5-6.
- [11] P. Kronberg, "Remote study of Lands: base and method.remote research in geology," Moscow: Mir, 1988. 343 p.
- [12] V. B. Kashkin, A. I. Sukhinin, "Remote sensing of the Earth from space. Digital image processing," Moscow: Logos. 2001. 264 p.
- [13] V. E. Gantmacher, N. E. Byistrov, D. V. Chebotarev, "Noise-like signals. Analysis, synthesis, processing," St. Petersburg: Science and Technology. 2005. 400 p.
- [14] G. A. Korzhavin, V. A. Nenashev, A. P. Shepeta et al. Patent No. 2703996 C2 Russian Federation, IPC G01S 13/90. Method for locating targets in the forward viewing zones of onboard radar stations of a two-position radar system: No. 2019108828: declared 03/26/2019; published 10/23/2019; applicant JSC "Concern "Granit-Electron".
- [15] V. A. Nenashev, A. R. Bestugin, I. A. Kirshina, S. A. Nenashev, "Method for searching modified barker code sequences," *T-Comm*. 2023. Vol. 17, No. 12, pp. 15-21. DOI 10.36724/2072-8735-2023-17-12-15-21
- [16] F. I. Ageev, V. V. Voznyuk, "A method for calculating the probability of a bit error of optimal character-by-character coherent reception of binary 3 opposite phase-manipulated signals in the presence of narrowband noise interference in a radio communication channel," *Proceedings of MAI*. 2022. Vol. 124. DOI: 10.34759/trd-2022-124-15
- [17] V. A. Nenashev, V. A. Sinitsyn, S. A. Strakhov, "Investigation of the influence of industrial interference on the compression characteristics of phase-manipulated signals in primary radars," *Voenmeh. Bulletin of the Baltic State Technical University*. 2017. Vol. 36, pp. 351-355.
- [18] L. A. Gurina, "Electromagnetic interference and methods of protection against them," Blagoveshchensk: Amur State University, 2006. 105 p.
- [19] L. B. Kochin, V. V. Smirnov, S. Yu. Strakhov, "Unintentional interference and electromagnetic compatibility," Baltic State Technical University. Univ. St. Petersburg, 2018. 110 p.

Information about authors:

Renata I. Chembarisova, laboratory assistant of the machine learning laboratory of the design and technology office of the engineering school of SUAI, student of the Department of Aerospace Computer and Software Systems of SUAI, Saint Petersburg, Russia

Vadim A. Nenashev, Ph.D. (Tech.), Head of the machine learning laboratory of the SUAI engineering school, associate professor of the department of "Design and technology of electronic and laser devices" of SUAI, Saint Petersburg, Russia