

УДК 621.38

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННОГО МЕТОДА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ АНТИКОЛЛИЗИИ ДЛЯ СИСТЕМ РАДИОЧАСТОТНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ НА ПАВ

**А. С. Койгеров,**  
аспирант

**С. А. Забузов,**

канд. техн. наук

**В. Ф. Дмитриев,**

доктор техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

*Рассматривается корреляционный метод решения задачи антиколлизии для радиомаркеров на поверхностных акустических волнах. Предлагается алгоритм поиска оптимальных кодовых последовательностей маркеров. Приводятся результаты анализа автокорреляционных и взаимно корреляционных функций модифицированных последовательностей максимальной вероятности. Определено максимально возможное число кодов для 16-значных последовательностей с заданными корреляционными свойствами.*

**Ключевые слова** — радиочастотная идентификация, радиомаркеры на ПАВ, коллизия, корреляционный метод, согласованный фильтр, последовательности максимальной вероятности, автокорреляционная функция, взаимно корреляционная функция.

### Введение

В последние годы одним из перспективных и бурно развивающихся направлений радиоэлектроники стала радиочастотная идентификация (**Radio Frequency Identification — RFID**). Области ее применения являются маркировка грузов и багажа, прослеживание маршрутов разных грузов и объектов, скрытая маркировка контейнеров и автомобилей, инвентаризация товаров на складах и т. д.

Радиомаркеры (транспондеры, радиометки) на поверхностных акустических волнах (ПАВ) обладают рядом преимуществ перед другими технологиями бесконтактной идентификации и хорошо известны: это работа по радиоканалу при отсутствии встроенных источников питания у маркеров; большая дальность действия, высокое быстродействие, малые масса и габариты, высокая радиационная стойкость, широкий диапазон рабочих температур, практически неограниченный срок службы маркеров [1, 2].

Применения систем **RFID** с маркерами «только чтение» [3] вполне достаточно для систем кон-

троля и учета объектов хранения. Однако возникает необходимость избирательного взаимодействия считывателя с маркерами, находящимися одновременно в зоне опроса считывателя. Каждый из маркеров, попавших в зону опроса, будет отвечать, и модулированные сигналы от них одновременно появятся на входе считывателя, искажая друг друга. Это явление называется коллизией [3]. При коллизии данных на входе считывателя последний не получит от радиометок достоверной информации. Поэтому считыватель и маркеры должны быть спроектированы таким образом, чтобы была возможность применить антиколлизии процедуры [3].

Антиколлизии алгоритмы, используемые в системах **RFID**, сходны со способами разрешения конфликтных ситуаций множественного коммуникационного доступа [4]. Наиболее общими классификационными признаками для антиколлизии методов являются пространство, частота и время [4].

В случае пространственных алгоритмов метки обычно локализируются в пространстве таким образом, чтобы обеспечивалось их последователь-

ное считывание. Это достигается изменением зоны считывания или, в случае пассивных меток, вариацией мощности, излучаемой считывателем. Основной проблемой пространственных методов является сложность достижения высокой точности определения дальности. Требования к точности определения дальности еще более возрастают с увеличением числа меток в зоне действия считывателя и, соответственно, уменьшением расстояния между ними [4].

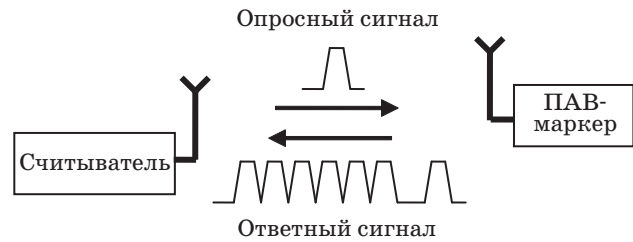
Такие антиколлизийные алгоритмы как в системах FDMA (Frequency Domain Multiple Access), TDMA (Time Division Multiple Access), CDMA (Code Division Multiple Access) можно реализовать в системах RFID с чиповыми метками [4]. В случае использования систем радиочастотной идентификации на ПАВ возникают трудности, обусловленные топологией и конструкцией ПАВ-радиомаркеров. Отметим, что поскольку ПАВ-радиомаркер имеет уникальный код, который закладывается внутри топологии ПАВ-устройства при его изготовлении, то метод временного разделения, при котором используется различная начальная задержка сигнала и который можно применить для частного случая, будет обеспечивать решение проблемы только при общем числе маркеров в несколько десятков. Это ограничение связано с увеличением габаритов подложки, что вызывает технологические трудности при изготовлении и ведет к удорожанию маркеров. Использование частотного разделения потребует высокостабильных генераторов и селективных полосовых фильтров.

Для выделения и идентификации отдельного маркера можно применить модифицированный множественный доступ с кодовым разделением, использующий метод корреляционной обработки сигналов. Работа ПАВ-маркера рассматривается на примере работы согласованного фильтра, который выполняет сжатие входного опросного сигнала. Общий принцип применения согласованной фильтрации в системах RFID был предложен в работе [1].

В данной работе решена задача определения уникальных кодовых последовательностей маркеров, обладающих заданными корреляционными свойствами. При этом число уникальных кодовых комбинаций должно быть максимально возможным.

### Принцип работы маркера в составе системы радиочастотной идентификации

В последнее время ПАВ-устройства используются как идентификаторы и датчики, не требующие источников питания и работающие по радиоканалу.

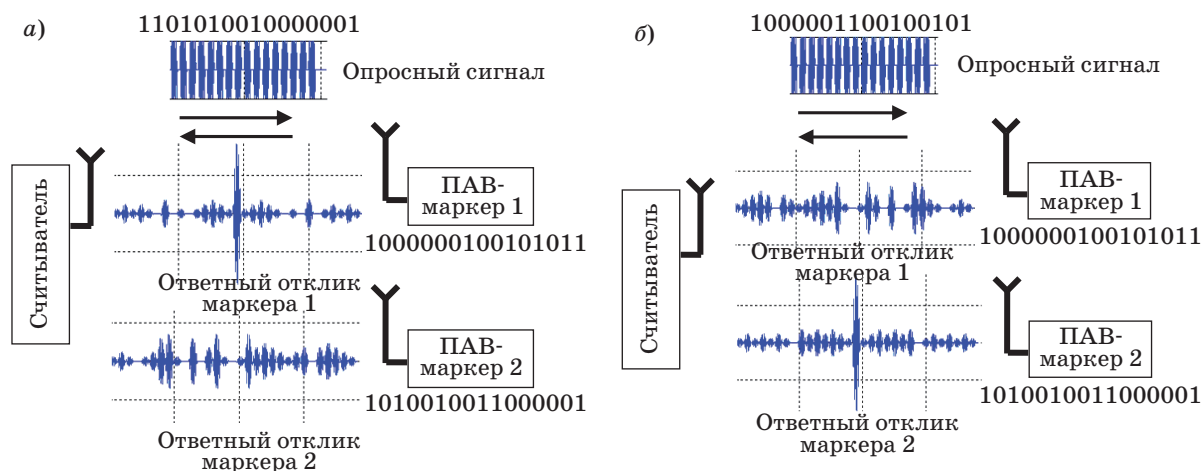


■ Рис. 1. Традиционная система радиочастотной идентификации на ПАВ

Традиционная система радиочастотной идентификации на ПАВ (рис. 1) состоит из считывателя (передатчик/приемник), антенны считывателя и ПАВ-маркеров. Высокочастотный радиоимпульс опроса, периодически генерируемый считывателем, излучается антенной считывателя. Если маркер расположен в зоне опроса считывателя, часть излучаемой энергии принимается антенной маркера и поступает на входной встречно-штыревой преобразователь (ВШП). ВШП преобразует электромагнитный сигнал в поверхностную акустическую волну, которая распространяется по поверхности пьезокристаллического звукопровода. Для преобразования большего количества принятой маркером электромагнитной энергии в акустическую необходимо, чтобы частота излучения считывателя соответствовала частоте колебаний поверхностной волны, генерируемой ВШП [1]. Если ПАВ-устройство маркера построено по схеме с отражающими структурами, то часть энергии поверхностной волны отражается от каждого рефлектора и движется обратно к входному ВШП. Таким образом, из одного импульса опроса формируется несколько ответных импульсов, причем каждый рефлектор создает в ответном сигнале маркера свой импульс [3]. Эта последовательность импульсов, полученная входным ВШП и преобразованная в высокочастотную последовательность электромагнитных импульсов, переизлучается антенной маркера и может быть принята считывателем. Число принимаемых импульсов соответствует числу рефлекторов на звукопроводе [3].

### Решение задачи антиколлизии в составе системы RFID с использованием корреляционной обработки

Рассматриваемая RFID-система основана на корреляционном методе. В данном случае ПАВ-радиомаркер будет состоять из антенны и подсоединенного к ней согласованного фильтра, выполняющего сжатие входного сигнала. Импульсный сигнал опроса представляет собой «зеркальный» во времени код маркера, идентифицировать кото-



■ Рис. 2. Принцип построения и работа системы RFID с использованием корреляционной обработки: а — опросный сигнал «зеркален» коду маркера 1; б — опросный сигнал «зеркален» коду маркера 2

рый необходимо. Для получения уникальных кодовых последовательностей используется бифазное кодирование. Считыватель последовательно опрашивает группу пассивных маркеров, находящихся в зоне считывания.

При этом отвечают все маркеры, попавшие в зону опроса. Ответный сигнал представляет собой импульс, образующийся при отражении опросного сигнала от маркера. После приема ответных сигналов производится их детектирование по амплитуде и сравнение их уровней с заранее выбранным пороговым уровнем. При выявлении сигнала, превышающего пороговый уровень, делается вывод о наличии разыскиваемого маркера в группе, идентификационный код которого зеркален с кодом, содержащимся в сигнале опроса. Другими словами, считыватель получает сигналы, которые представляют собой множество взаимно корреляционных функций (ВКФ), и лишь один из них будет являться автокорреляционной функцией (АКФ) искомого сигнала. В результате обработки принятой информации считыватель «принимает решение» об идентификации данного маркера по превышению заданного порогового уровня сигнала. Последовательно повторяют эти операции для всех маркеров, содержащихся в данной группе [1].

В опросном сигнале кодируется начальная фаза импульсов кодовой последовательности. Как видно из рис. 2, а считыватель посылает опросный импульс, который является «зеркальным» во времени кодом ПАВ-маркера 1. Первый маркер отвечает корреляционным пиком, в то время как второй маркер отвечает псевдослучайным сигналом. Для другого случая (рис. 2, б) картина обратная, поскольку опросным сигналом является «зеркальный» во времени код ПАВ-маркера 2.

### Маркер как согласованный фильтр

Принцип работы маркера можно рассмотреть на примере согласованного фильтра фазоманипулированного (ФКМ) сигнала [5] (рис. 3). Входной ВПП является однородным. Выходной ВПП состоит из идентичных отводов, которые подключены к суммирующим шинам таким образом, чтобы кодировать данные транспондера. Кодирование осуществляется с помощью начальных фаз импульсов, которые принимают только два состояния — «0» и «π», таким образом осуществляется работа с фазоманипулированными сигналами [6]. От фазоманипулированных сигналов можно перейти к кодовым последовательностям с символами «1» и «0».

Сигнал опроса  $S1(t)$  (рис. 4) представляет собой «зеркальный» код маркера, он же — сигнал на входном ВПП.

Импульсная характеристика входного ВПП  $h1(t)$  показана на рис. 5.

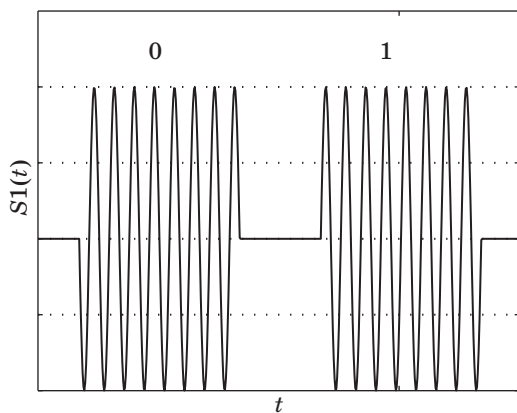
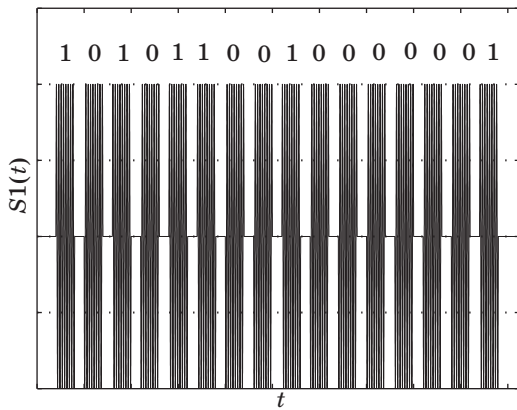
Сигнал  $S2(t)$  после прохождения через входной ВПП можно описать как [7]

$$S2(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S1(\tau)h1(t - \tau) d\tau.$$

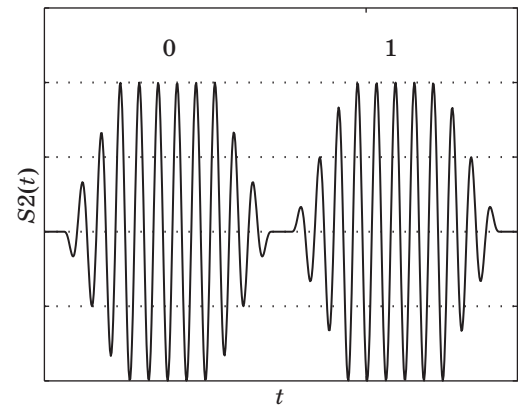
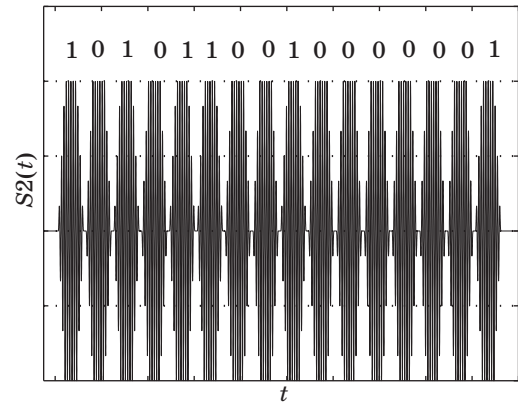
У сигнала  $S2(t)$  (рис. 6) наблюдается затяжка фронтов импульсов, что обусловлено конечной длиной входного преобразователя.



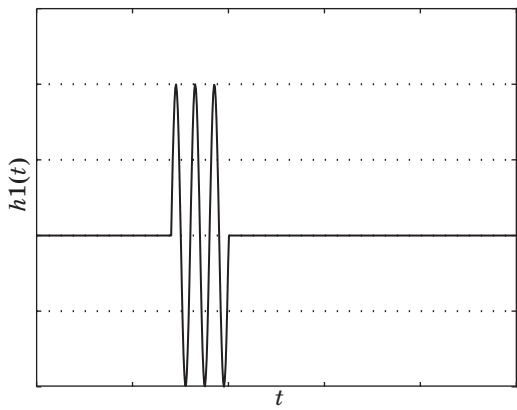
■ Рис. 3. Согласованный фильтр ФКМ-сигнала



■ Рис. 4. Сигнал  $S1(t)$  на входном ВПП



■ Рис. 6. Сигнал  $S2(t)$  после прохождения через входной ВПП



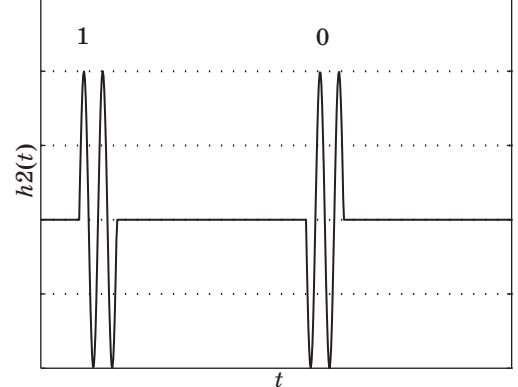
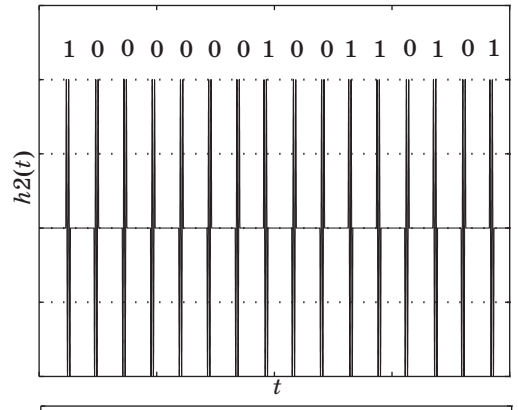
■ Рис. 5. Импульсная характеристика входного ВПП  $h1(t)$

Импульсная характеристика выходного ВПП  $h2(t)$  показана на рис. 7.

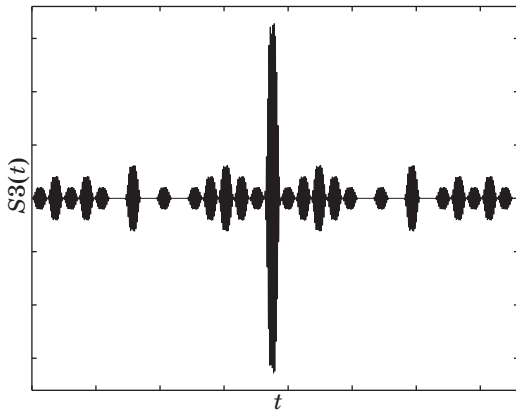
Выходной сигнал  $S3(t)$  можно описать следующим образом [7]:

$$S3(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S2(\tau)h2(t - \tau)d\tau.$$

Выходной сигнал  $S3(t)$  (рис. 8) представляет собой сжатый по времени импульс, в данном слу-



■ Рис. 7. Импульсная характеристика выходного ВПП  $h2(t)$



■ Рис. 8. Выходной сигнал  $S3(t)$

чае он близок к АКФ входного сигнала. Таким образом, если на вход согласованного фильтра ФКМ-сигнала подать кодированный ФКМ-сигнал, который представляет собой «зеркальный» во времени код фильтра, то выходной сигнал фильтра будет сжат приблизительно в 16 раз (в данном случае используется 16-значный код), и амплитуда выходного сигнала будет больше амплитуды входного в ~16 раз (без учета потерь). Используя такие фильтры в качестве радиомаркеров, можно распознавать устройства с любым нужным кодом среди множества устройств с другими кодами даже в присутствии значительного шума.

### Концепция кодирования

Для работы системы RFID с использованием корреляционной обработки требуется, чтобы маркеры имели уникальные коды, обладающие «хорошими» корреляционными свойствами [6]. Таким образом, необходимо решить задачу — найти алгоритм определения идентификационных кодов, присваиваемых маркерам, из числа тех, которые имеют заданные корреляционные свойства.

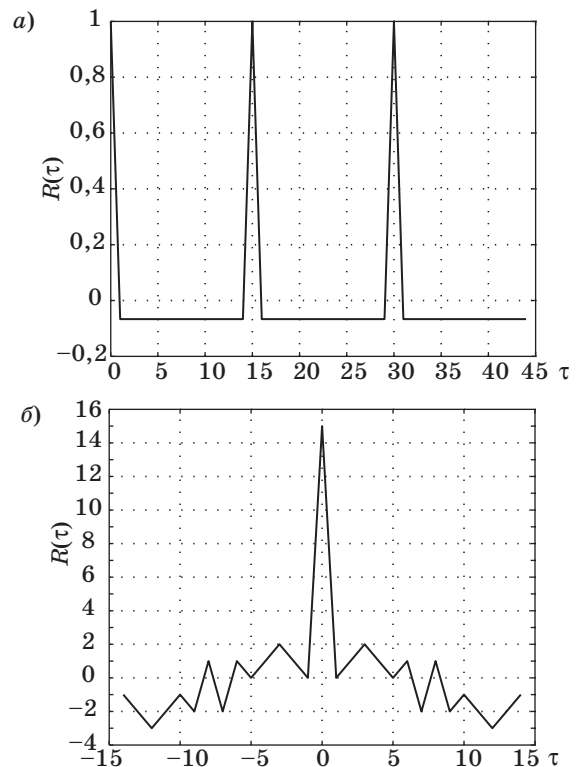
Автокорреляционные функции кодовых последовательностей должны иметь ярко выраженные пики (максимумы). Уровни боковых лепестков АКФ должны быть минимальными. Максимальная величина пика ВКФ не должна превышать некоторого порогового значения, что гарантирует минимальный уровень взаимных помех. Причем для конкретных задач (например, задач складирования) важно наличие большого числа маркеров, а значит и числа кодов.

Наилучшие автокорреляционные свойства имеют коды Баркера. Однако этими свойствами обладают только коды Баркера с числом символов в коде 3, 4, 5, 7, 11 и 13. Кодовые последова-

тельности, обладающие этими свойствами, для числа символов, больше 13, не найдены [6]. Максимум пика автокорреляции прямо пропорционален длине последовательности. Поэтому важно иметь максимально возможную длину кода.

Также следует заметить, что особое место занимают сигналы, кодовые последовательности которых являются последовательностями максимальной длины, или М-последовательностями [6]. В качестве примера рассмотрим АКФ М-последовательности  $\langle 1\ 1\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0 \rangle$  (рис. 9, а, б).

М-последовательности обладают пиками автокорреляции, но число последовательностей ограничено, и их ВКФ не являются оптимальными. Из М-последовательностей можно получить последовательности Голда и Касами, но их количество тоже ограничено. Например, если рассмотреть М-последовательности, формируемые с помощью линейных переключательных схем на основе сдвигающих регистров [6], то даже для числа знаков  $N = 63$  существует всего 6 различных последовательностей. А для этих М-последовательностей с периодом  $N = 63$  можно найти 65 последовательностей Голда и 520 последовательностей Касами (в данном случае рассматривается большая система Касами [6]). Однако при рассмотрении их взаимно корреляционных свойств оказывается, что не все последователь-



■ Рис. 9. АКФ М-последовательности: а — периодическая; б — аperiodическая

ности будут удовлетворять ранее сформулированным требованиям.

Наиболее подходящими кодовыми последовательностями являются последовательности максимальной вероятности (ПМВ) [6], состоящие из блоков (рис. 10).

Каждый блок — это последовательность символов одного знака. Параметр  $N$  в данном случае — число бит (или знаков). У последовательностей с оптимальным числом блоков [6]  $M_0$  боковые лепестки АКФ минимальны по сравнению с другими последовательностями. Для нечетного  $N$  [6]

$$M_0 = (N + 1)/2;$$

для четного  $N$  [6]

$$M_0 = N/2.$$

Блоки могут быть единичными (состоять из одного символа), двойными (состоять из двух символов) и т. д. Обозначим число блоков одинаковой длины  $k$  через  $y_k$ , причем длина блока равна числу символов в нем. Например,  $y_1$  — число единичных блоков. На рис. 10 показаны блоки  $k = 2$  и  $k = 5$ . Для последовательности длиной  $N$ , состоящей из  $M$  блоков, имеют место два равенства [6]:

$$N = \sum_{k=1}^{k_{\max}} ky_k; \quad (1)$$

$$M = \sum_{k=1}^{k_{\max}} y_k, \quad (2)$$

где  $k_{\max}$  — длина максимального блока.

Если последовательность имеет оптимальное число блоков  $M_0$ , то среднее значение числа блоков длиной  $k$  может быть найдено как [6]

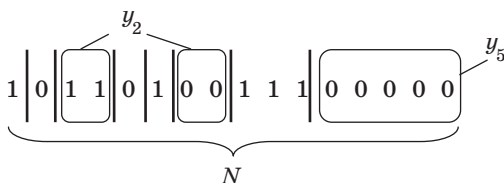
$$\bar{y}_k = M_0 2^{-k}. \quad (3)$$

Длина максимального блока [6]

$$k_{\max} = N - \sum_{k=1}^{k_0} ky_k,$$

где  $k_0$  — длина блока, для которого  $\bar{y}_k = 1$ :

$$k_0 = \log_2 M_0.$$



■ Рис. 10. Структура кодовой последовательности длиной 16 бит

## Результаты

В ходе исследования выполнен расчетный анализ АКФ и ВКФ последовательностей максимальной вероятности. Анализ производился, в основном, для 16-значных последовательностей. Структура последовательностей при оптимальном числе блоков представлена в табл. 1, откуда видно, что единичные блоки должны составлять примерно половину от общего числа блоков, двойные — четвертую часть, тройные — восьмую часть и т. д. Следует отметить, что число символов последовательности определяет равенство (1), число блоков — равенство (2), а число блоков длины  $k$  — равенство (3). При этом блоки чередуются. Число таких последовательностей определяется полиномиальным законом [6]:

$$L = \frac{M_0!}{\prod_{k=1}^{k_{\max}} y_k!}.$$

Для  $N = 16$  число последовательностей  $L = 840$ .

Результаты анализа АКФ и ВКФ последовательностей максимальной вероятности представлены в табл. 2 в нормированном виде. В этой таблице показана зависимость числа кодов ПМВ от значения порогов боковых лепестков АКФ ( $|R_{\max}|_{\text{АКФ}}/N$ ) и пиков ВКФ ( $|R_{\max}|_{\text{ВКФ}}/N$ ). Рассматриваются последовательности, сформированные по двум правилам. Первая группа последовательностей имеет структуру с оптимальным числом блоков, значение которых удовлетворяет (3). Вторая группа последовательностей не удовлетворяет равенству (3), но в то же время равенства (1) и (2) выполняются. Существенные отличия лишь в простоте формирования.

Для примера рассмотрим три различные кодовые последовательности, сформированные на основе табл. 2:

A: 1 0 1 0 1 1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 0  
 B: 1 0 1 0 0 1 1 1 1 1 0 0 1 0 0 0  
 C: 1 0 0 1 1 1 1 1 0 1 0 1 1 1 1 0

Как видно, каждая последовательность состоит из 16 знаков ( $N$ ) и имеет по 8 блоков ( $M_0$ ):  $y_1 = 4, y_2 = 2, y_3 = 1, y_5 = 1$ .

■ Таблица 1

$N$	$M_0$	$k_0$	$k_{\max}$	Число блоков последовательностей
16	8	3	5	$y_1=4, y_2=2, y_3=1, y_5=1$
32	16	4	6	$y_1=8, y_2=4, y_3=2, y_4=1, y_6=1$
64	32	5	7	$y_1=16, y_2=8, y_3=4, y_4=2, y_5=1, y_7=1$

■ Таблица 2

Структура кодовой последовательности*	Порог АКФ $ R_{\max} _{\text{АКФ}}/N$	Число кодов с учетом порога АКФ	Порог ВКФ $ R_{\max} _{\text{ВКФ}}/N$	Число кодов с учетом порога ВКФ
$y_1 = 4$ $y_2 = 2$ $y_3 = 1$ $y_5 = 1$	0,25	353	0,375	4
			0,5	13
			0,625	42
			0,75	113
	0,375	741	0,375	5
			0,5	16
			0,625	51
			0,75	174
	0,5	837	0,375	5
			0,5	17
			0,625	50
			0,75	184
$y_1 = 4$ $y_2 = 1$ $y_3 = 2$ $y_4 = 1$	0,25	229	0,375	4
			0,5	13
			0,625	35
			0,75	89
	0,375	653	0,375	6
			0,5	15
			0,625	50
			0,75	180
	0,5	829	0,375	6
			0,5	17
			0,625	54
			0,75	187

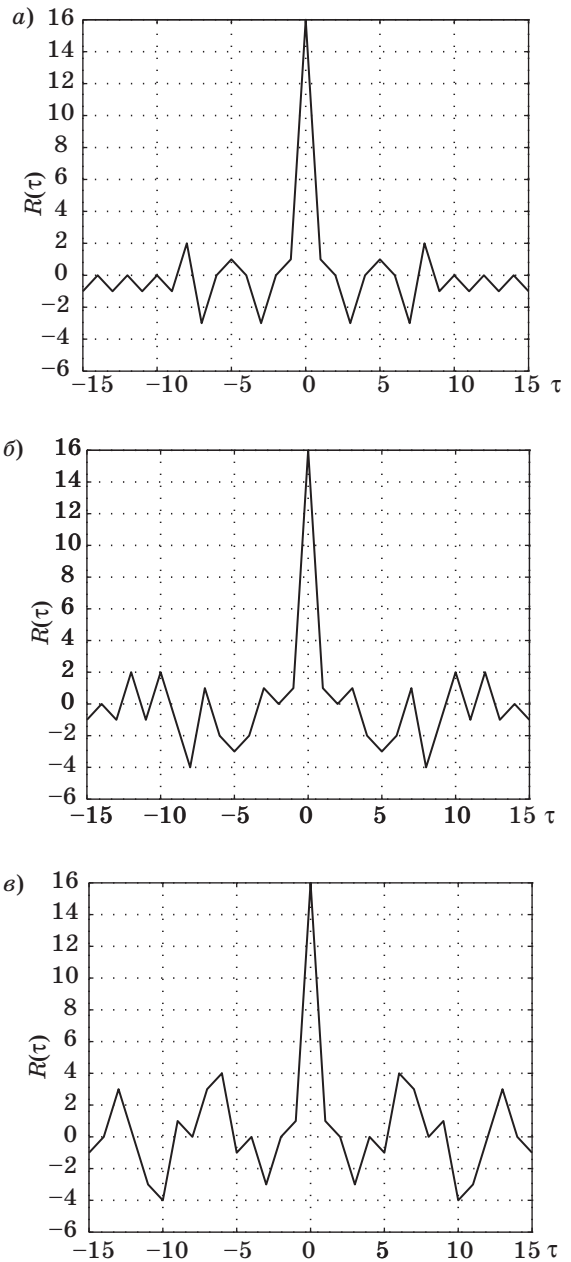
\* Число кодов для каждой структуры кодовой последовательности — 840.

Автокорреляционные и взаимно корреляционные функции представлены в ненормированном виде (рис. 11, 12). АКФ имеют пики автокорреляции, пики ВКФ сравнимы с боковыми лепестками автокорреляционных функций. Малый уровень боковых лепестков говорит о решении проблемы коллизии между кодами.

Анализ 16-значных последовательностей показал, что статистическая характеристика модуля бокового пика АКФ

$$\left( (R_{\max}|_{\text{АКФ}})_{\text{норм}} \sqrt{N} = \left( \frac{|R_{\max}|_{\text{АКФ}}}{N} \right) \sqrt{N} \right)$$

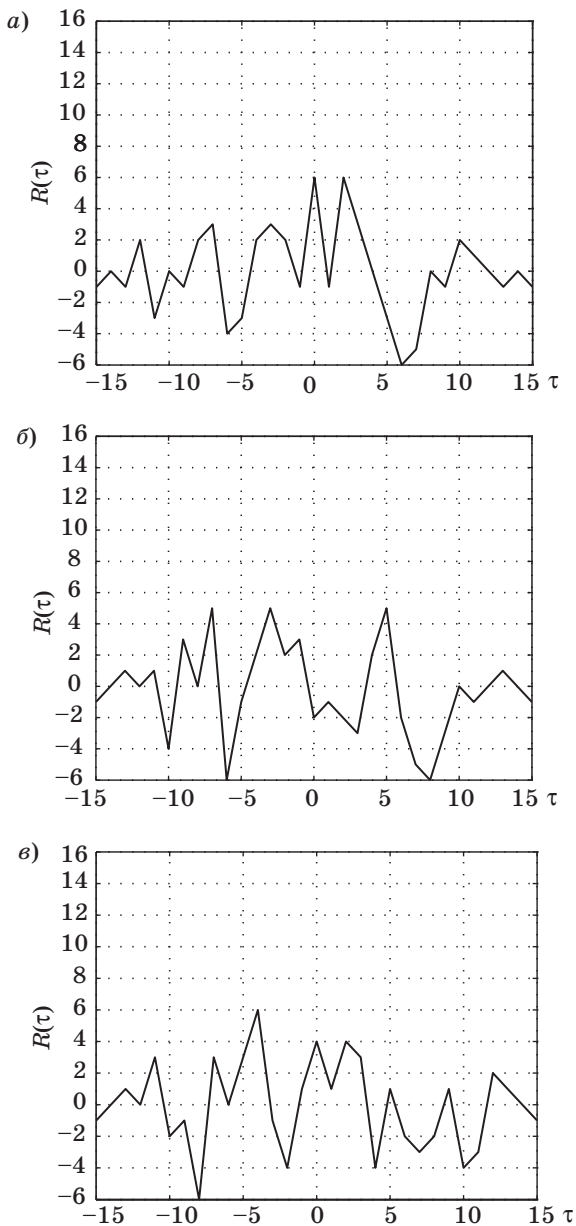
составляет 0,75–2. В результате эти цифры характеризуют превышение  $|R_{\max}|_{\text{АКФ}}$  уровня  $1/\sqrt{N}$ , т. е. в данном случае максимальный боковой пик превысит уровень  $1/\sqrt{N}$  в 2 раза и составит значе-



■ Рис. 11. АКФ последовательности: а — А; б — В; в — С

ние, равное 8. Эта характеристика очень близка к характеристикам наилучших последовательностей, а именно М-последовательностей, для которых  $\left( (R_{\max}|_{\text{АКФ}})_{\text{норм}} \sqrt{N} \right)$  составляет 0,7–1,25

[4]. В то же время число последовательностей максимальной вероятности существенно больше числа М-последовательностей. Для ВКФ последовательностей максимальной вероятности  $\left( (R_{\max}|_{\text{ВКФ}})_{\text{норм}} \sqrt{N} \right)$  в данном случае составляет 1,5–3. Значения  $\left( (R_{\max}|_{\text{АКФ}})_{\text{норм}} \sqrt{N} \right)$



■ Рис. 12. ВКФ последовательностей: а — А и В; б — А и С; в — В и С

и  $\left( \left( R_{\max|ВКФ} \right)_{\text{норм}} \sqrt{N} \right)$  могут быть достаточно просто заложены в алгоритм формирования кодов для получения последовательностей с нужными статистическими характеристиками.

Подобный анализ был выполнен также для всех групп 16-значных кодовых последовательностей из табл. 2, максимальное число кодов в которых достигает 187, и подтвердил сделанные выше выводы.

### Заключение

Решение проблемы коллизии для системы радиочастотной идентификации на ПАВ может быть найдено через применение корреляционного метода. В данном случае работа маркера рассматривается на примере согласованного фильтра, в котором происходит сжатие опросного сигнала. Для работы системы RFID с использованием корреляционной обработки требуется, чтобы маркеры имели уникальные коды, обладающие «хорошими» корреляционными свойствами. Наиболее подходящими кодовыми последовательностями являются последовательности максимальной вероятности. АКФ и ВКФ трех возможных ПМВ при  $N = 16$  представлены на рис. 11, 12. Ограниченное число ПМВ обусловлено требованиями к статистическим характеристикам АКФ и ВКФ.

Рассмотренный корреляционный метод решения задачи антиколлизии для систем радиочастотной идентификации на ПАВ может применяться в задачах логистики, охраны и учета объектов.

### Литература

1. Brocato R. W. Passive Microwave Tags. — Sandia National Laboratories, 2004. — 29 p. <http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2004/044924.pdf>
2. Забузов С. А. Маркеры на поверхностных акустических волнах для систем радиочастотной идентификации // Будущее сильной России — в высоких технологиях: Сб. тр. Всерос. науч. чтений. — СПб.: Логос, 2007. С. 137–143.
3. Дшхунян В. Л., Шаньгин В. Ф. Электронная идентификация. Бесконтактные электронные идентификаторы и смарт-карты. — М.: ИТ Пресс, 2004. — 696 с.
4. Шарфельд Т. Системы RFID низкой стоимости / Под ред. С. Корнеева. — М., 2006. 197 с. [http://www.alpha1.ru/recomend/rfid\\_lowcost.pdf](http://www.alpha1.ru/recomend/rfid_lowcost.pdf)
5. Морган Д. Устройства обработки сигналов на поверхностных акустических волнах. — М.: Радио и связь, 1990. — 415 с.
6. Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. — М.: Радио и связь, 1985. — 384 с.
7. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы. — М.: Высш. шк., 2000. — 459 с.