

С.С. МАНАЕНКО, С.В. ДВОРНИКОВ, А.В. ПШЕНИЧНИКОВ
**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ФОРМИРОВАНИЯ
СИГНАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ СЛОЖНОЙ СТРУКТУРЫ**

Манаенко С.С., Дворников С.В., Пшеничников А.В. Теоретические аспекты формирования сигнальных конструкций сложной структуры.

Аннотация. Приемо-передающие тракты современных систем радиосвязи строятся на основе открытой структуры, обеспечивающей иерархическое разграничение доступа к предоставляемым телекоммуникационным услугам. Однако такой подход не исключает возможность доступа к передаваемому контенту со стороны несанкционированных пользователей. Скрытие информации методами криптографической защиты в такой ситуации только активизирует дополнительный интерес к передаче, поэтому наиболее прагматичным решением является использование сигналов сложной структуры, существенно затрудняющих или даже исключающих извлечение из них информации сторонними пользователями. Проблема регламентирования селекции доступа при разработке и проектировании элементов радиосистем является достаточно многогранной и обладает высокой степенью сложности. Одно из направлений решения задач данной предметной области базируется на известных подходах расширения базы сигналов, однако алгоритмы их практической реализации получены без учета ограничений на выделенный ресурс и без учета самого факта применения этих алгоритмов. На основе теории систем и общей теории связи разработан подход к формированию сигнальных конструкций сложной структуры, обеспечивающий повышение свойств их структурной скрытности по отношению к несанкционированным пользователям. При этом были уточнены известные решения на физическом уровне сигнальных пространств, что позволило формализовать процедуры формирования радиосигналов, обладающими заданными свойствами. Обоснован метод формализации функции отображения пространства сигналов на основе выделения стохастических свойств псевдослучайных последовательностей, что позволило обеспечить неопределенность их структуры при несанкционированной обработке. Апробация предлагаемого подхода приведена на примере формирования сигналов квадратурной модуляции с учетом последующего анализа их свойств с различных позиций легитимных и нелегитимных пользователей. Полученные результаты подтверждают возникшую неопределенность при нелегитимной обработке при незначительном ухудшении свойств помехоустойчивости систем радиосвязи. В целом это позволяет сделать вывод об адекватности теоретических решений. В качестве примера представлены констеляционные диаграммы сигналов на выходе квадратурного приемника. Представленная в работе совокупность предлагаемых технических решений определяет новизну данного подхода. Решаемая научная задача относится к классу задач синтеза сигналов сложных структур.

Ключевые слова: сигналы сложной структуры, структурная скрытность сигналов, энергетическая скрытность сигналов, синтез сигналов сложной структуры, сигнальные конструкции.

1. Введение. Электромагнитная доступность к сигналам систем радиосвязи (СРС) в процессе передачи сообщений со стороны несанкционированных пользователей обуславливает необходимость разработки и последующей реализации различных ограничивающих меро-

приятый как организационного, так и технического характера.

Данная проблематика многогранна, и достаточно часто, например в [1], рассматривается с позиций регламентирования селективного доступа к передаваемой (транслируемой) информации.

В других источниках, в частности в [2], электромагнитная доступность радиоканала вообще рассматривается с позиций составной части средств информационной войны.

Однако сложность решения задачи, связанной со снижением электромагнитной доступности к радиоканалам для несанкционированных абонентов, вынуждает пользователей СРС использовать криптографические меры скрытия информации. В частности, такой подход к защите информационного обмена предложен в [3], где предложено использовать различные комбинации симметричных и ассиметричных криптоалгоритмов. Данное направление достаточно активно развивается, о чем свидетельствуют многочисленные работы в данном направлении [4-6].

Вместе с тем сам факт использования методов криптозащиты выступает в качестве явного признака желания сокрытия информации, что может вызвать дополнительный интерес со стороны несанкционированных абонентов к содержанию передаваемого информационного контента [2]. Поэтому прагматичным в этом плане видится использование методов снижения информационной доступности передаваемой информации для несанкционированных абонентов за счет повышения структурной скрытности передаваемых сигналов, предложенных в [7].

В настоящее время данное направление активно развивается, о чем свидетельствуют многочисленные работы по этой проблематике.

Так, в [8] предлагается в СРС применять стохастические параллельно-последовательные широкополосные сигналы, обладающие свойствами высокой энергетической и структурной скрытности. В [9-10] для СРС разработаны модели передачи сообщений на основе хаотических сигналов, обладающих высокой структурной скрытностью.

Модели комбинированных сигнальных конструкций с регулируемым уровнем их структурной и энергетической скрытности разработаны в [11-12].

Следует отметить, что рассмотренное направление повышения скрытности связано с существенным расширением спектра сигналов, что достаточно сложно обеспечить в условиях ограничений на полосу частот, выделяемую для радиоканалов в СРС. Вместе с тем достаточно интересный подход обоснован в [13-15]. Авторы предлагают формировать сигналы таким образом, чтобы в трактах приема несанкционированных абонентов их параметры соответствовали структурам совсем

других конструкций. Очевидно, что такой подход предполагает сложность синтеза сигнальных конструкций СРС, обусловленную высокой вариативностью реальной сигнально-помеховой обстановки. Поэтому для ее учета процессы, описывающие условия функционирования СРС, наделяют широким диапазоном стохастических свойств [16-17]. При этом наибольшую многозначность варианты решения задач данного класса приобретают в условиях деструктивных воздействий, стратегии которых в явном виде определяются с недостаточной степенью точности [18]. Для таких ситуаций не определены единые подходы к постановке и решению проблемы разработки сигналов СРС, что связано со сложностью их формализации на различных уровнях эталонной модели взаимодействия открытых систем.

В соответствии с указанными обстоятельствами в настоящей работе предложен вариант разработки теоретического подхода к представлению и формированию сигналов СРС, обладающих свойствами высокой структурной и энергетической скрытности по отношению к несанкционированным абонентам (далее они определены как сигналы сложных структур) с позиций сложных систем в терминах общей теории связи и статистической радиотехники.

2. Анализ подходов к формированию сигналов сложной структуры с позиций общей теории систем. Согласно [19] к сигналам сложной структуры относят сигналы, помехоустойчивые свойства которых определяются их базой. Как правило, их синтез осуществляется различными методами расширения спектра.

Наиболее известные решения базируются на способе прямого расширения спектра путем непосредственного перемножения псевдослучайных последовательностей (ПСП) с выборками высокочастотных колебаний. В результате указанных операций получают фазоманипулированные широкополосные сигналы [19-22].

Другой подход к синтезу сигналов сложной структуры связан со стохастическим управлением частотным ресурсом СРС, который позволяет формировать сигналы с псевдослучайным законом перестройки рабочих частот (ППРЧ) [23-26].

Заметим, что методы формирования сигналов на основе ПСП предъявляет достаточно высокие требования к модели канала радиосвязи и параметрам чувствительности радиоприемных устройств [23].

Указанное обстоятельство существенно ограничивает их практическое применение, а в условиях деструктивных воздействий дополнительно усложняет модели СРС [27], поскольку в этом случае необходимо решать задачи ковариационных и корреляционных вычислений [28].

Кроме того, сигналы этого класса имеют достаточно сложную структуру и изначально предполагают наличие широкополосных каналов с однородной структурой [19].

Сигналы с ППРЧ априори предъявляют высокие требования к системе управления СРС [23]. Однако применение методов широкополосного частотного синтеза фактически нивелирует их свойства, характерные для сигналов со сложной структурой [29].

Кроме того, следует отметить, что известные в общей теории связи аналитические решения по формированию помехоустойчивых сигналов [30-31] не учитывают всю полноту возможных стратегий деструктивных воздействий, поскольку изначально предполагают в качестве помех только аддитивный белый гауссов шум (АБГШ).

Вместе с тем в [32] аргументировано, что адекватный учет деструктивных воздействий когнитивного характера возможен только при детализации радиоэлектронного конфликта методами теории управления и общей теории систем. Но такой подход предполагает представление сигналов СРС как результат формализации моделей сложными структурами [33].

С учетом указанных обстоятельств рассмотрим структуру СРС [34], как сложную систему, определяющую стратегию формирования сигналов с позиций увеличения их параметрического пространства (рис. 1).

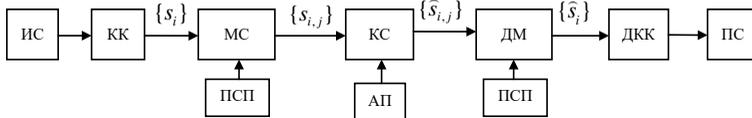


Рис. 1. Структурная схема системы связи

В общем случае, структуру СРС определяют следующие функциональные процессы.

Формирование из стохастической информации источника сообщения (ИС) электрических сигналов, которые в зависимости от способа обработки могут быть непрерывными или дискретными.

В том случае, когда ИС формирует непрерывные сигналы, то первой функцией кодера источника является аналого-цифровое преобразование, и лишь затем реализуются функции согласования алфавита источника сообщения с алфавитом канального кодера (КК) и устранение избыточности передаваемых сообщений [34].

Канальное кодирование повышает достоверность передаваемых

сообщений за счет введения избыточности. На выходе КК для построения сигнальных конструкций цифровой поток разбивается на блоки, формируя конечное множество сигналов $S^M = \{s_i\}$, $i = 0, 1, \dots, M - 1$.

Модулятор сигналов (МС) под управлением генератора ПСП расширяет пространство существования сигналов M до уровня $N = M \times L$, где L – размерность чисел, формируемых генератором ПСП. Затем модулятор генерирует гармоническое несущее колебание $S^N = \{s_{i,j}\}$, $i = 0, 1, \dots, M - 1$, $j = 0, 1, \dots, L - 1$ параметры которого изменяются в зависимости от структуры сигнала из сформированного пространства N .

Причем указанные пространства сигналов должны удовлетворять следующим свойствам [35-36]:

1) пространство сигналов $S^M = \bigcup_{i=0}^{M-1} s_i = \{s_i\}$ является метрическим и линейным;

2) d_{\min}^M – минимальное евклидово расстояние в пространстве сигналов $S^M = \{s_i\}$;

3) i -й сигнал пространства $S^M = \{s_i\}$ отображается на пространство $S_i^N = \bigcup_{j=0}^{L-1} s_{i,j} = \{s_{i,j}\}$, т.е. $S_i^N = f_{L-1}(s_i)$; область определения отображения f_{L-1} является сигнал s_i , а область изображений является пространство $S_i^N = \{s_{i,j}\}$, включающее в себя L образов сигнала s_i ;

4) в результате отображения f_{L-1} пространство сигналов $S^M = \{s_i\}$ разбивается на $N = M \times L$ элементов, т.е. $S^N = \bigcup_{i=0}^{M-1} S_i^N = \bigcup_{i=0}^{M-1} \bigcup_{j=0}^{L-1} s_{i,j} = \{s_{i,j}\}$, при этом $S_i^N \cap S_j^N = \emptyset$ для $i \neq j$;

5) d_{\min}^N – минимальное евклидово расстояние в пространстве сигналов $S^N = \{s_{i,j}\}$, при этом $d_{\min}^N < d_{\min}^M$;

6) пространства сигналов $S^M = \{s_i\}$ и $S_i^N = \{s_{i,j}\}$ являются взаимно-однозначными.

Сущность процессов преобразования сигналов в СРС поясняет на рисунке 2. Системной операцией при преобразованиях сигналов

является функция отображения f_{L-1} , которая определяет порядок перехода пространства сигналов $S^M = \{s_i\}$ в пространство $S^N = \{s_{i,j}\}$. Данная функция должна обладать следующими свойствами.

Соответствия, согласно которому каждый из сигналов s_i и $s_{i,j}$ имеет свое положение в пространстве, которое характеризуется соответствующими координатами, поскольку пространства сигналов S^M и S^N являются метрическими и линейными.

Размерности, в соответствии с которым пространства сигналов $S^M = \{s_i; d_{\min}^M\}$ и $S^N = \{s_{i,j}; d_{\min}^N\}$ (где $(M < N)$) отличаются минимальным евклидовым расстоянием ($d_{\min}^M > d_{\min}^N$).

Упорядочения, определяющего то, что отображение пространства сигналов S^M на пространство S^N будет заключаться в разбиении пространства сигналов S^M на непересекающиеся пространства S_i^N , при котором увеличивается количество сигналов до N и, соответственно, уменьшается расстояние между сигналами.

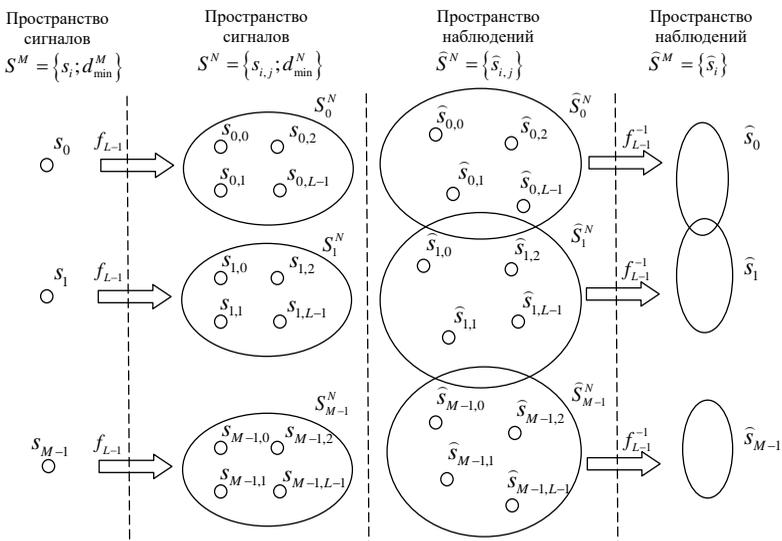


Рис. 2. Процесс преобразований сигналов в CPC

Особенностью функции отображения f_{L-1} является то, что она формализуется методами выделения стохастических свойств на основе ПСП, которая генерирует случайные числа в диапазоне от 0 до $L-1$.

В зависимости от численного значения, сформированного ПСП, функция отображения f_{L-1} преобразует сигнал s_i из пространства сигналов S^M в один из сигналов $s_{i,j}$ пространства S_i^N . При этом для значения ПСП равного 0 сигнал s_i преобразуется в сигнал $s_{i,0}$ без изменения своего положения. В то время как для других формируемых ПСП числовых значений, сигнал s_i преобразуется в сигнал $s_{i,j}$ с изменением своего положения в пространстве S_i^N , которое задает функция отображения f_{L-1} .

В общем случае, воздействующая на канал связи аддитивная помеха (АП) приводит к деструктивным последствиям, связанным с изменением положения сигнала в пространстве параметров.

В рассматриваемой ситуации полагаем, что воздействующие АП являются структурными, т.е. их параметры соответствуют пространству параметров передаваемым по КС сигналов.

В результате на вход радиоприемного устройства СРС будет воздействовать аддитивная смесь сигнала и помех, характеризуемая пространством наблюдений $\hat{S}^N = \{\hat{s}_{i,j}\}$. Учитывая, что пространства сигналов S^M и S^N являются взаимно-однозначными, то существует взаимно-однозначное соответствие между элементами S^M и S^N , и можно говорить об отображении пространства сигналов S^N на пространство S^M , $f_{L-1}^{-1} : S^N \rightarrow S^M$, где f_{L-1}^{-1} – обратное отображение [36].

Будем предполагать, что с использованием операции обратного отображения f_{L-1}^{-1} перед решающим устройством демодулятора выполняется преобразование пространства наблюдений $\hat{S}^N = \{\hat{s}_{i,j}\}$ в пространство наблюдений $\hat{S}^M = \{\hat{s}_i\}$ (рис. 2).

Указанное преобразование позволяет при принятии решения в процессе демодуляции использовать пространство сигналов S^M .

Такой подход обеспечит уменьшение ошибок, обусловленных последствием деструктивных воздействий, возникающих на этапе принятия решения.

После демодуляции кодовые символы в декодере канального

кода (ДКК) преобразуются в информационные и поступают к получателю сообщения (ПС).

Представленная с указанных позиций модель СРС позволяет определить порядок синтеза сигналов сложных структур, с одной стороны, обладающих повышенными свойствами структурной сложности [23, 38], а с другой – в наибольшей степени адаптированной к параметрам канала, а также устройствам их формирования и обработки [39-42].

3. Формализация процедур формирования сигналов сложных структур. Реализацию предложенного подхода рассмотрим на примере формирования сигналов квадратурной модуляции, в частности, сигналов квадратурной амплитудной модуляции (КАМ) [43].

Представим конstellационную диаграмму сигналов КАМ- M , где $M = 2^k$ k – четное ($M = 4, 16, 64, \dots$), на комплексной плоскости в виде квадрата со сторонами размером $\sqrt{M} \times \sqrt{M}$. При этом значение \sqrt{M} будем полагать целым натуральным числом.

Осуществим процесс преобразований пространств сигналов при $M = 4$ (сигнал КАМ-4) и $N = 16$ (сигнал КАМ-16). Определим сигнальные точки созвездия КАМ-16 к соответствующим пространствам сигналов $S^M = \{s_i\}$ и $S^N = \{s_{i,j}\}$ таким образом, чтобы соблюдались формализованные свойства пространств сигналов (рис. 3).

Здесь верхние левые сигнальные точки в каждом квадранте КАМ-16 определены к пространству сигналов S^M , представляющему собой сигнал КАМ-4 $S^4 = \{s_0, s_1, s_2, s_3; d_{\min}^{(4)}\}$, и условно обозначены в виде квадратов. Стрелками определены функции отображения $f_{L-1} = \{f_0, f_1, f_2, f_3\}$, которые в зависимости от значения числа, сформированного ПСП, преобразуют сигнальную точку КАМ-4 в одну из сигнальных точек КАМ-16 (обозначены черными кружками).

При формировании ПСП числа 0, функция отображения f_0 никаких перемещений не выполняет, поэтому сигнальные точки КАМ-4 (s_0, s_1, s_2, s_3) имеют одинаковое положение в квадратной решетке с сигнальными точками КАМ-16 ($s_{0,0}, s_{1,0}, s_{2,0}, s_{3,0}$). Таким образом, каждая сигнальная точка s_i КАМ-4 отображается в одну из сигнальных точек $s_{i,L-1}$ пространства сигналов S_i^{16} i -го квадранта КАМ-16.

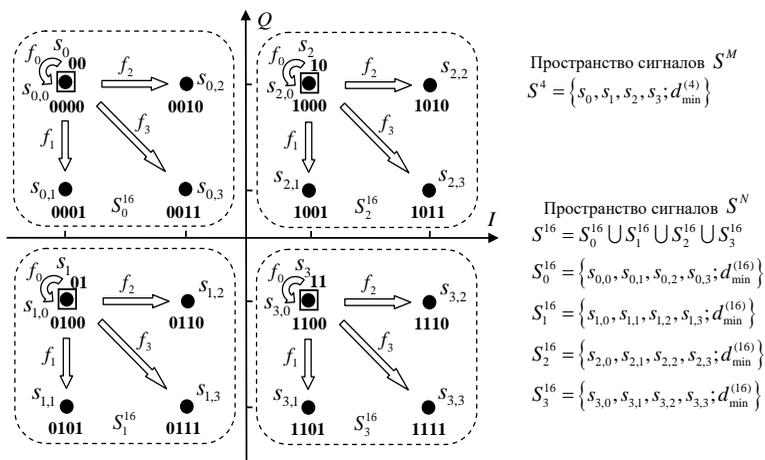


Рис. 3. Преобразование сигнала КАМ-4 в сигнал КАМ-16

Если присвоить сигнальным точкам s_i КАМ-4 кодовые комбинации, то функции отображения f_{L-1} можно задать посредством кодирования или изменения координат сигнальной точки.

Для преобразования сигнала КАМ-4 в сигнал КАМ-16 функции отображения f_{L-1} в зависимости от чисел, формируемых генератором ПСП, обобщим в виде таблицы 1.

Таблица 1. Функции отображения f_{L-1} сигналов s_i КАМ-4 в сигналы $s_{i,L-1}$ КАМ-16

ПСП L	f_{L-1}	Кодирование								Изменение координат	
		$s_0 \rightarrow s_{0,L-1}$		$s_1 \rightarrow s_{1,L-1}$		$s_2 \rightarrow s_{2,L-1}$		$s_3 \rightarrow s_{3,L-1}$		ΔI	ΔQ
0 (00)	f_0	$s_{0,0}$	0000 (0)	$s_{1,0}$	0100 (4)	$s_{2,0}$	1000 (8)	$s_{3,0}$	1100 (12)	0	0
1 (01)	f_1	$s_{0,1}$	0001 (1)	$s_{1,1}$	0101 (5)	$s_{2,1}$	1001 (9)	$s_{3,1}$	1101 (13)	0	$-d_{\min}^{(16)}$
2 (10)	f_2	$s_{0,2}$	0010 (2)	$s_{1,2}$	0110 (6)	$s_{2,2}$	1010 (10)	$s_{3,2}$	1110 (14)	$d_{\min}^{(16)}$	0
3 (11)	f_3	$s_{0,3}$	0011 (3)	$s_{1,3}$	0111 (7)	$s_{2,3}$	1011 (11)	$s_{3,3}$	1111 (15)	$d_{\min}^{(16)}$	$-d_{\min}^{(16)}$

Согласно таблице 1 кодирование выполняется путем добавления к кодовой комбинации, присвоенной сигналу s_i КАМ-4, младших разрядов, представляющих собой двоичную форму числа, сформированного ПСП. В результате такой операции сигналу s_i КАМ-4 присваива-

ется кодовая комбинация сигнала $s_{i,L-1}$ КАМ-16, что эквивалентно изменению положения сигнальной точки s_i КАМ-4 в i -м квадранте квадратной решетки КАМ-16 путем изменения ее координат на значения ΔI и ΔQ , представленные в таблице 1.

Учитывая, что при формировании искомой конструкции используется модулятор сигнала КАМ-16, то функции отображений f_{L-1} реализуются путем кодирования исходного бита.

Таким образом, ПСП не вносит изменения в передаваемую информацию, а изменяет только структуру формируемой конструкции при переходе от КАМ-4 к КАМ-16, что и обеспечивает усложнение структуры формируемого результирующего сигнала.

Поскольку на входе радиоприемного устройства воздействует аддитивная смесь сигнала и помех, характеризуемая в виде пространства наблюдений $\hat{S}^N = \{\hat{s}_{i,j}\}$, то для преобразования ее в пространство $\hat{S}^M = \{\hat{s}_i\}$ необходимо задать обратную функцию отображения f_{L-1}^{-1} . Так как указанные преобразования выполняются до демодулятора, то обратные функции отображения f_{L-1}^{-1} реализуются на основе изменения координат дискретных отсчетов принятой смеси сигнала и помех $\hat{s}_{i,j}$ на значения ΔI и ΔQ , представленные в таблице 1.

Такой подход позволит на приемной стороне использовать демодулятор КАМ-4 с расположением сигнальных точек s_i , представленным на рисунке 3. Обозначим сформированную указанным способом конструкцию как КАМ-4(16), полагая, что прием сигнала осуществляется демодулятором КАМ-4, а структура сигнала на передающей стороне формируется модулятором КАМ-16.

Расположение сигнальных точек сигнала КАМ-4(16) соответствует одному из четырех возможных сигналов КАМ-4, полученных путем разбиения сигнала КАМ-16 по методу Унгербоeka [34]. Тогда можно полагать, что минимальное евклидово расстояние сигнала КАМ-4(16) определяется минимальным евклидовым расстоянием сигнала КАМ-16 следующей зависимостью $d_{\min}^{4(16)} = 2d_{\min}^{16}$. При этом сигнальное созвездие КАМ-4(16) отличается от классического сигнального созвездия КАМ-4 тем, что его сигнальные точки сдвинуты симметрично относительно начала координат.

Процедуру формирования сигналов вида КАМ- $M(N)$, построенных на основе квадратной решетки, определим в виде следующих этапов:

– произвести выбор двумерной конструкции КАМ- N с квадратной решеткой, где $N = 2^n$, $n \geq 4$ – четное число; d_{\min}^N – минимальное евклидово расстояние СК КАМ- N ;

– разбить квадратную решетку исходной конструкции КАМ- N на M непересекающихся пространств по $L = N / M$ сигнальных точек, где $M = 2^k$, $k < n$ – четное число; при этом новые пространства должны быть идентичны, симметричны, а также иметь квадратную форму;

– определить в каждом из M пространств по одной сигнальной точке, которые сформируют СК КАМ- $M(N)$, и присвоить им номера $s_{i,0}$, где i – кодовое слово в соответствии с кодом отображения КАМ- $M(N)$, причем сигнальные точки формируемой СК выбираются таким образом, чтобы средние энергии (E_s) сигналов КАМ- $M(N)$ и КАМ- N были бы равны и выполнялось бы условие $d_{\min}^{M(N)} = \sqrt{L}d_{\min}^N$;

– присвоить с соблюдением геометрической симметрии в каждом формируемом пространстве остальным сигнальным точкам номера $s_{i,j}$, где $j = 0, \dots, L-1$ – число, определяемое ПСП.

4. Исследование свойств сигнальных конструкций КАМ- $M(N)$. Исследование свойств, разработанных сложных сигнальных конструкций КАМ- $M(N)$, проведем на основе показателей, определяющих их помехоустойчивость и структурную сложность.

Анализ помехоустойчивости сигналов КАМ- $M(N)$ осуществим на основе показателей достоверности передачи информации.

В соответствии с [34] достоверность передачи сообщений с использованием сигнальных конструкций с КАМ характеризуется вероятностью битовой ошибки P_b .

Для гауссова канала вероятность появления битовой ошибки при модуляции КАМ- M определяется следующим образом [34, 44]:

$$P_b^M = \frac{2(1 - M^{-1/2})}{\log_2 \sqrt{M}} Q \left(\sqrt{\left(\frac{6 \log_2 \sqrt{M}}{M-1} \right) \frac{E_b}{N_0}} \right), \quad (1)$$

где $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp(-t^2/2) dt$ – функция Лапласа; E_b / N_0 – отношение энергии бита к спектральной плотности мощности шума.

При этом минимальное евклидово расстояние для сигналов

КАМ- M на основе квадратной решетки в [36] определено как

$$d_{\min}^M = \sqrt{\frac{6 \log_2 \sqrt{M} E_b}{M-1}} = \sqrt{\frac{6 E_S}{M-1}}, \quad (2)$$

где E_S – средняя энергия сигнала КАМ- M .

С учетом (2) выражение (1) примет следующий вид

$$P_b^M = \frac{2(1-M^{-1/2})}{\log_2 \sqrt{M}} Q\left(\frac{d_{\min}^M}{\sqrt{N_0}}\right). \quad (3)$$

Определение вероятности битовой ошибки сигналов КАМ- M согласно выражениям (2) и (3) справедливо для сигнальных созвездий, у которых центр тяжести ансамбля сигналов совпадает с началом координат. В связи с тем, что сигнальные точки СК КАМ- $M(N)$ сдвинуты относительно начала координат и не соответствуют данному условию, то для определения минимального евклидова расстояния $d_{\min}^{M(N)}$ необходимо использовать условие формирования СК КАМ- $M(N)$: $d_{\min}^{M(N)} = \sqrt{L} \cdot d_{\min}^N$.

При этом сигнальное созвездие КАМ- N , на основе которого формируется СК КАМ- $M(N)$, имеет центр тяжести ансамбля сигналов, совпадающий с началом координат. Поэтому для определения d_{\min}^N можно использовать выражение (2) и тогда получим

$$d_{\min}^{M(N)} = \sqrt{L} \times d_{\min}^N = \sqrt{\frac{N}{M}} \sqrt{\frac{6 E_S}{N-1}} = \sqrt{\frac{6 N E_S}{M(N-1)}}. \quad (4)$$

Учитывая, что средние энергии (E_S) сигналов КАМ- $M(N)$ и КАМ- N равны, применим (4) в выражении (3) и получим вероятность появления битовой ошибки в гауссовом канале для КАМ- $M(N)$ в следующем виде:

$$P_b^{M(N)} = \frac{2(1-M^{-1/2})}{\log_2 \sqrt{M}} Q\left(\sqrt{\left(\frac{6 N \log_2 \sqrt{M}}{M(N-1)}\right) \frac{E_b}{N_0}}\right). \quad (5)$$

Результаты расчета помехоустойчивости СК КАМ-4 и КАМ-

4(16) согласно выражениям (1) и (5) представлены на рисунке 4.

Из анализа результатов, представленных на рисунке 4, следует, что при воздействии на СРС только аддитивного белого гауссова шума применение СК КАМ-4(16) вместо СК КАМ-4 приведет к снижению помехоустойчивости такой СРС.

В частности, при ошибке $P_b^M = 10^{-4}$ снижение в помехоустойчивости достигает порядка 1 дБ.

Проведем оценку предельной величины снижения помехоустойчивости СРС при использовании СК КАМ- $M(N)$ в каналах с гауссовым шумом. В этих целях воспользуемся результатами исследований, представленных в [45], которые обобщим в виде расчета обобщенного показателя W :

$$W = \frac{h_M^2}{h_{M(N)}^2} \Big|_{P_b^{M(N)} = P_b^M},$$

где $h_M^2 = E_b/N_0$ – отношение энергии бита к спектральной плотности мощности шума КАМ- M ; $h_{M(N)}^2 = E_b^{M(N)}/N_0$ – отношение энергии бита к спектральной плотности мощности шума КАМ- $M(N)$.

При условии равенства $P_b^{M(N)} = P_b^M$ в (1) и (5), после преобразований получим

$$W_{[\text{дБ}]} = 10 \lg \left(\frac{M(N-1)}{N(M-1)} \right). \quad (6)$$

Анализ сложности структуры СК КАМ- $M(N)$ проведем на основе элементов теории, представленной в работе [7]. Сложность структуры определим числом двоичных измерений (ДИЗ), которые необходимо провести для полной формализации структуры СК.

Общее выражение для определения данного показателя примем в виде:

$$S = \log_2 A,$$

где A – допустимые значения произвольного параметра сигнала. Таким параметром может быть выбрана амплитуда, вид модуляции, структура СК и др.

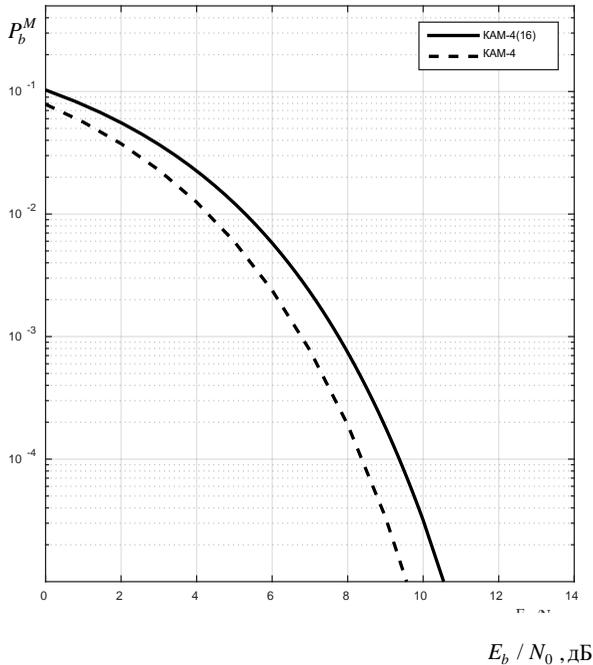


Рис. 4. Помехоустойчивость СК КАМ-4 и КАМ-4(16)

Для СК КАМ- M количество вариантов соответствия каждой точке СК символов с учетом кода Грея определяется размерностью M , поэтому $S = \log_2 M$. Для полной формализации структуры СК КАМ- $M(N)$ необходимо дополнительно учесть варианты соответствия функции отображения f_{L-1} сигнальным точкам квадранта квадратной решетки СК (рис. 3) и числам, формируемым ПСП, что равнозначно количеству перестановок из L и может быть определено как $L!$.

Тогда сложность структуры СК КАМ- $M(N)$ определим в следующем виде

$$S = \log_2 (M(N/M)!). \quad (7)$$

Результаты расчета выбранных параметров СК КАМ- $M(N)$ представлены в таблице 2. Из анализа полученных результатов следует, что с увеличением L сложность структуры СК КАМ- $M(N)$ возрастает.

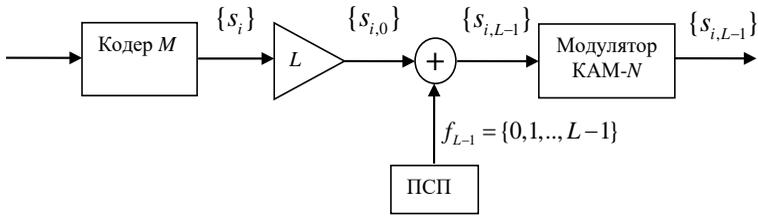
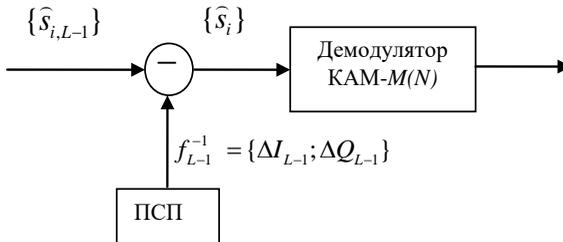
ет, однако при этом потери в помехоустойчивости увеличиваются незначительно. Так, например, для СК КАМ-4(16) и КАМ-4(256) сложность структуры увеличилась в 42 раза, а потери в помехоустойчивости составляют не более 0,26 дБ.

Таблица 2. Результаты расчета параметров СК КАМ- $M(N)$

КАМ- M	S , ДИЗ	КАМ- $M(N)$	$L=N/M$	W , дБ	S , ДИЗ
КАМ-4	2	КАМ-4(16)	4	0,97	7
		КАМ-4(64)	16	1,18	47
		КАМ-4(256)	64	1,23	298
КАМ-16	4	КАМ-16(64)	4	0,21	9
		КАМ-16(256)	16	0,26	49
КАМ-64	6	КАМ-64(256)	4	0,05	11

Вместе с тем, реализация разработанных алгоритмов наиболее целесообразна для повышения энергетической скрытности реализованной СРС на основе методов доступа абонентов к каналам радиосвязи. Действительно, нелегитимным абонентам неизвестен способ формирования и обработки сигналов, что определяет возможность доступа в СРС только тем абонентам, которым выделены ключи ПСП и функции преобразования сигналов. Причем разработанные подходы к формированию и обработки сигналов, в отличие от известных [18, 22], не предъявляют высоких требований к параметрам чувствительности радиоприемных устройств СРС.

5. Результаты эксперимента по моделированию СРС с КАМ- $M(N)$. Для проверки адекватности полученных теоретических результатов проведено моделирование СРС, использующей разработанный способ формирования СК. Для этого разработаны структурные схемы модулятора и демодулятора СК КАМ- $M(N)$, представленные на рисунках 5 и 6 соответственно. В схеме модулятора кодер M разбивает двоичный цифровой поток на блоки длиной $k = \sqrt{M}$ бит и переводит их в десятичную форму счисления, формируя этим пространство сигналов КАМ- M ($S^M = \{s_i\}$). Далее с помощью умножения на $L = N / M$ и прибавления десятичного числа, сформированного генератором ПСП $\{0, 1, \dots, L-1\}$, сигналу присваивается номер, который определяет его положение в сигнальном созвездии модулятора КАМ- N ($S^N = \{s_{i,L-1}\}$).

Рис. 5. Структурная схема модулятора СК КАМ- $M(N)$ Рис. 6. Структурная схема демодулятора СК КАМ- $M(N)$

На вход приемника поступают дискретные отсчеты аддитивной смеси сигнала и гауссова шума, образуя пространство наблюдений $\{\hat{s}_{i,L-1}\}$. Генератор ПСП приемника синхронно с аналогичным генератором ПСП передатчика формирует соответствующие значения координат ΔI и ΔQ , которые поступают на вычитающее устройство. За счет изменения координат дискретных отсчетов пространство наблюдений $\{\hat{s}_{i,L-1}\}$ преобразуется в пространство наблюдений $\{\hat{s}_i\}$, что позволит для принятия решений использовать демодулятор КАМ- $M(N)$.

Программная реализация системы связи в программной среде Simulink представлена на рисунке 7.

На рисунке 8 представлен пример сигнальных созвездий для модулятора КАМ-16 и для демодулятора СК КАМ-4(16).

С использованием представленной модели в программной среде Simulink проведен эксперимент методом статистических испытаний для оценки помехоустойчивости СК КАМ-4(16), КАМ-4(64), КАМ-

16(64). Результаты приведены на рисунках 9-12.

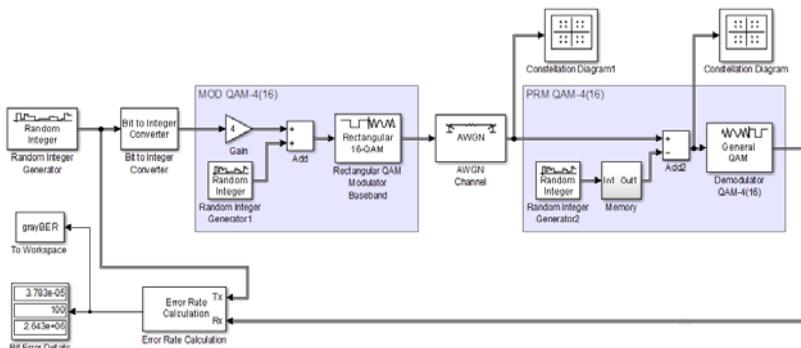


Рис. 7. Модель системы связи в программе Simulink

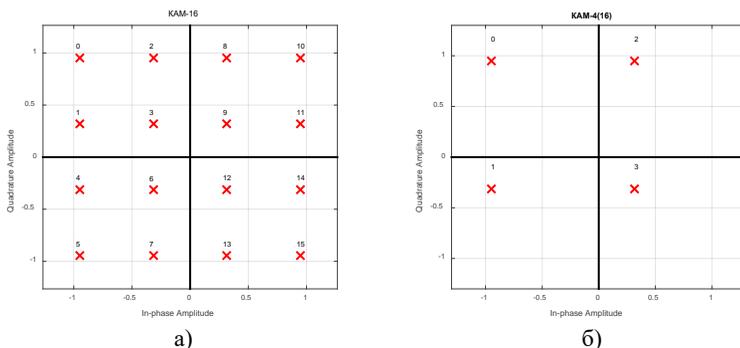
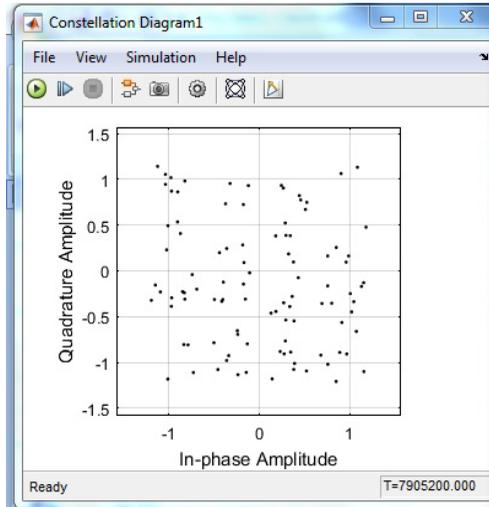
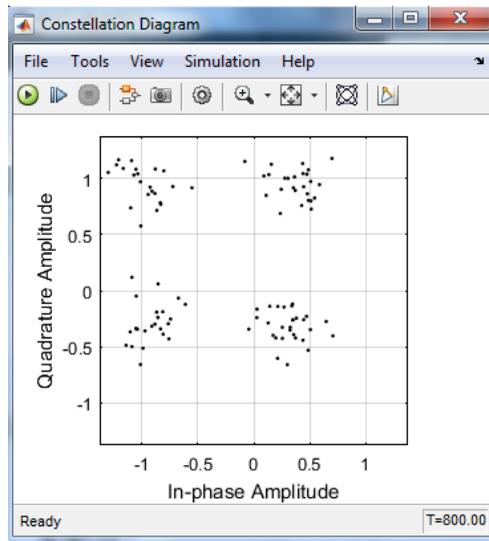


Рис. 8. Сигнальные созвездия: а) модулятора QAM-16; б) демодулятора QAM-4(16)

На рисунке 9 представлены фрагменты констеляционных диаграмм аддитивной смеси гауссова шума и сигнала, действующей на входе приемника (а) и на входе демодулятора QAM-4(16) (б) после проведения преобразований пространств наблюдений $\hat{s}_{i,L-1} \rightarrow \hat{s}_i$ при отношении энергии бита к спектральной плотности мощности шума $E_b / N_0 = 10$ дБ.



a)



б)

Рис. 9. Констеляционная диаграмма: а) пространство наблюдений $\{\hat{s}_{i,L-1}\}$ на входе приемника; б) пространство наблюдений $\{\hat{s}_i\}$ на входе демодулятора КАМ-4(16)

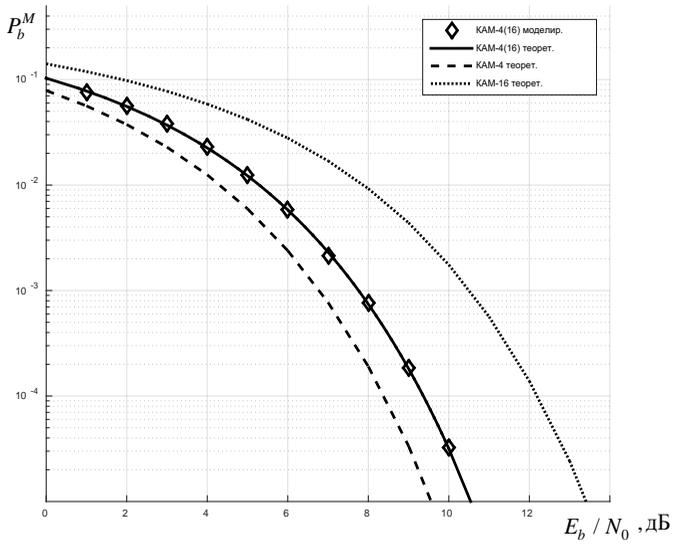


Рис. 10. Помехоустойчивость СК КАМ-4(16)

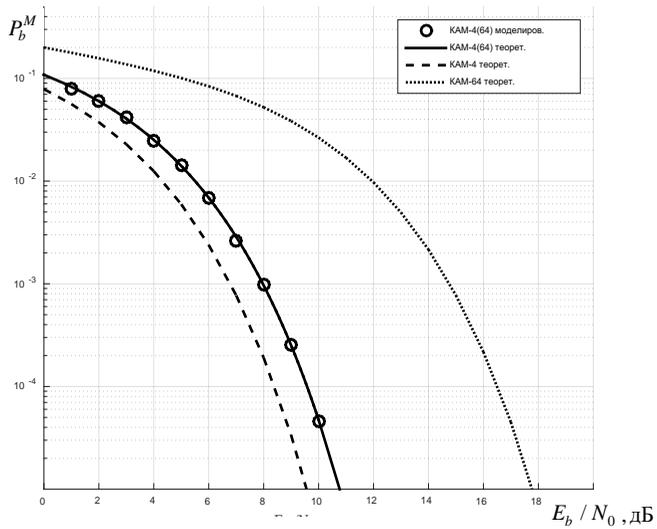


Рис. 11. Помехоустойчивость СК КАМ-4(64)

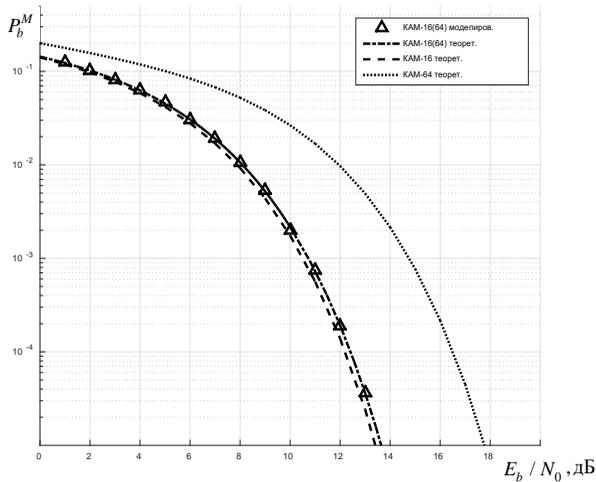


Рис. 12. Помехоустойчивость СК КАМ-16(64)

Анализ результатов, представленных на рисунках 10-12, позволяет сделать следующее заключение. Теоретические выводы полностью подтверждаются данными компьютерного моделирования. Так, графики зависимости вероятности битовой ошибки от отношения энергии бита к спектральной плотности мощности шума, характеризующие помехоустойчивость СК сложной структуры, полученные путем моделирования и построенные в соответствии с выражением (5) полностью совпадают. Таким образом, можно утверждать, что разработанные теоретические основы формирования и обработки СК сложной структуры являются правомерными и обоснованными.

6. Заключение. Разработанные подходы к формированию сигнальных конструкций сложной структуры в своей совокупности обеспечивают повышение сложности структуры при незначительном снижении помехоустойчивости. При этом нелегитимным абонентам ограничивается доступ к формируемым СРС каналам за счет изменения структуры излучаемого радиосигнала, что позволяет отнести разработанные методы к классу СРС на основе сигналов большой базы. Отличительной особенностью предложенного подхода формирования сигналов сложной структуры является то, что при его использовании не задействуется дополнительно частотный ресурс СРС, поскольку увеличение базы сигналов достигается на основе расширения пространства сигналов.

Применение сигналов сложной структуры на основе сигналов с

квадратурной амплитудной модуляцией позволит за счет расширения пространства сигналов КАМ-4 в 4 раза увеличить сложность структуры в 3,5 раза, а при увеличении пространства сигналов в 16 раз сложность структуры увеличивается в 23,5 раза, при этом помехоустойчивость снизится на 1,18 дБ. При расширении пространства сигналов КАМ-16 в 4 раза сложность возрастает в 2,25 раза, но при этом помехоустойчивость снижается только на 0,21 дБ.

Таким образом, в статье определяется класс задач по разработке теоретических положений, формализующих свойства СРС с сигналами сложных структур на основе расширения пространства сигналов.

Литература

1. Мальцев Г.Н., Харченко А.В., Штанько С.В. Сравнительный анализ методов ограничения и управления доступом в радиотехнических системах с широкополосной передачей информации // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2018. № 665. С. 56-68.
2. Макаренко С.И. Информационное противоборство и радиоэлектронная борьба в сетевых войнах начала XXI века // Санкт-Петербург. 2017.
3. Штанько С.В. Ограничение несанкционированного доступа в радиотехнических системах с широкополосной передачей информации // Информационно-управляющие системы. 2018. № 5 (96). С. 57-65.
4. Moldovyan D.N., Moldovyan N.A., Moldovyan A.A. Commutative encryption method based on Hidden logarithm problem. Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software. 2020. vol. 13. no. 2. pp. 54-68.
5. Moldovyan A.A., Phieu N.H., Nguyen H.M., Tran C.M. Digital signature algorithms based on Hidden discrete logarithm problem. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. vol. 1014. pp. 1-12.
6. Kuzmin A.S., Markov V.T., Mikhalev A.A., Mikhalev A.V., Nechaev A.A. Cryptographicalgorithms on groups and algebras. Journal of Mathematical Sciences. 2017. vol. 223. no. 5. pp. 629-641.
7. Каневский З.М., Литвиненко В.П. Теория скрытности // Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та. 1991. 142 с.
8. Пантенков Д.Г., Литвиненко В.П. Алгоритмы формирования и обработки радиосигналов командно-телеметрической радиолинии и технические предложения по их реализации // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2020. Т. 16. № 2. С. 90-105.
9. Гавришев А.А. Применение КС-энтропии для количественного анализа систем связи гражданской обороны // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2020. № 3 (18). С. 47-54.
10. Сизов А.С., Цыплаков Ю.В. Анализ сложных сигналов, применяемых в радиолокации и скрытной радиосвязи // Телекоммуникации. 2020. № 5. С. 33-40.
11. Zhilyakov E.G., Belov S.P., Ursol D.V. About signals allowing to provide sustainability to impacts of short-term and or focused on spectrum interference. International Journal of Engineering and Technology (UAE). 2018. vol. 7. no. 2. pp. 16-20.
12. Киченко А.Н., Савельев А.В., Шишаков К.В. Анализ сигнально-кодовых конструкций в задачах повышения энергетической скрытности радиолиний // Интеллектуальные системы в производстве. 2020. Т. 18. № 4. С. 11-20.

13. Kirillov S.N., Lisnichuk A.A., Lukasin I.V., Pokrovskij P.S. Methods to form both anti-interference and hiding radio signals for prospective communication systems. International Siberian Conference on Control and Communications. (SIBCON'2019) Proceedings. 2019. P. 8729649.
14. Дворников С.В., Манаенко С.С., Дворников С.С. Параметрическая мимикрия сигналов, модулированных колебаниями и сформированных в различных функциональных базисах // Информационные технологии. 2015. Т. 21. № 4. С. 259-263.
15. Kirillov S.N., Lisnichuk A.A., Lukashin I.V., Pokrovskij P.S. Algorithms to form and process signals for multilevel defense of transmitted data based on the principles of cognitive and software-defined radio. Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies. (MWENT'2018) Proceedings. 2018. pp. 1-6.
16. Финк Л.М. Теория передачи дискретных сообщений // М.: Сов. Радио. 1970. 718 с.
17. Миддлтон Д. Введение в статистическую теорию связи. Том 1. / Пер. с англ. Б. А. Смиренина // Под ред. и с предисл. Б.П. Левина. М.: Сов. Радио. 1961. 782 с.
18. Феер К. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра. Пер. с англ. / Под ред. В. И. Журавлева // М.: Радио и связь. 2000. 520 с.
19. Варакин Л.Е. Теория сложных сигналов // М.: Связь. 1970. 317 с.
20. Pickholtz R.L., Schilling D.L., Milstein L.B. Theory of Spread-Spectrum Communications – A Tutorial. IEEE Trans. Commun. 1982. vol. 30 (5). pp. 855–884.
21. Anderson J.B. Coded Modulation Systems. N.Y.: Kluwer Academic Publishers. 2003. P. 544.
22. Дворников С.В., Пшеничников А.В., Манаенко С.С. Модель фазоманипулированного широкополосного сигнала с программной перестройкой рабочей частоты // Телекоммуникации. 2017. № 9. С. 8-12.
23. Борисов В.И., Зинчук В.М., Лимарев А.Е. Помехозащищенность систем радиосвязи расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты / под ред. В. И. Борисова; изд. 2-е, перераб. и доп. // М.: РадиоСофт. 2008. 512 с.
24. Беккиев А.Ю., Борисов В.И. Оценка помехозащищенности каналов радиосвязи в условиях действия помех от средств радиоэлектронной борьбы // Радиотехника и электроника. 2019. Т. 64. № 9. С. 891-901.
25. Дворников С.В., Пшеничников А.В., Русин А.А. Обобщенная функциональная модель радиолинии с управлением её частотным ресурсом // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2016. № 3. С. 49-56.
26. Дворников С.В., Дворников С.С., Пшеничников А.В. Аппарат анализа частотного ресурса для режима псевдослучайной перестройки рабочей частоты // Информационно-управляющие системы. 2019. № 4 (101). С. 62-68.
27. Пшеничников А.В. Оценка статистических параметров рабочих частот для модели радиолинии в конфликтной ситуации // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2017. Т. 11. № 1. С. 4-9.
28. Тузов Г.И. Статистическая теория приема сложных сигналов // М.: Сов. Радио. 1977. 116 с.
29. Дворников С.В., Пшеничников А.В. Формирование спектрально-эффективных сигнальных конструкций в радиоканалах передачи данных контрольно-измерительных комплексов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2017. Т. 60. № 3. С. 221-228.
30. Прокис Дж. Цифровая связь / Пер. с англ.; Под ред. Д.Д. Кловского // М.: Радио и связь. 2000. 800 с.
31. Кловский Д.Д. Передача дискретных сообщений по радиоканалам // М.: Радио и связь. 1982. 304 с.

32. Дворников С.В., Пшеничников А.В. Помехозащищенная модель радиолинии в условиях динамического преднамеренного воздействия // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2017. № 2. С. 16-22.
33. Месарович М., Такахара Я. Общая теория систем. Математические основы / Пер. с англ. Э.Л. Наппельбаума // Под редакцией С.В. Емельянова. М.: Издательство «Ширь». 1978. 315 с.
34. Скляр Б. Цифровая связь: теоретические основы и практическое применение / Пер. с англ. Е.Е. Грозы и др. 2-е изд. М.: Вильямс, 2016. 1099 с.
35. Хелстром К. Статистическая теория обнаружения сигналов // М.: Издательство иностранной литературы. 1963. 432 с.
36. Wilson S.G. Digital Modulation and Coding. Prentice Hall. 1996. P. 667.
37. Френкс Л. Теория сигналов / Пер. с англ. // М.: Сов.Радио. 1974. 344 с.
38. Дворников С.В., Пшеничников А.В., Манаенко С.С., Дворников С.С. Метод формирования многопозиционных помехозащищенных сигнальных конструкций // Информационные технологии. 2017. Т. 23. № 9. С. 669-676.
39. Mehrota A. Analog and Digital Systems. Artech House. London. 1996. P. 205.
40. Ungerboeck G. Trellis-coded modulation with redundant signal sets Part II: State of the art. Communications Magazine. IEEE. 1987. Vol. 25. Issue: 2. pp. 5-11.
41. Torrieri D.J. Principles of secure communication systems. Dedham. MA.: Artech House Inc. 1985. P. 286.
42. Пшеничников А.В. Модель многопозиционной помехозащищенной сигнальной конструкции на основе QPSK модуляции // Информация и космос. 2017. № 2. С. 48-52.
43. Cahn C.R. Combined Digital Phase and Amplitude Modulation Communication Systems. IRE Transaction on Communications Systems. Vol. CS-8. 1960. pp. 150-154.
44. Korn I. Digital Communications. N. Y.: Van Nostrand Reinhold Co. 1985. P. 676. p.
45. Буга Н.Н. Информация и электрические сигналы // Л.: ЛКВВИА. 1960. 71 с.

Манаенко Сергей Сергеевич — канд. техн. наук, старший преподаватель, кафедра радиосвязи, Военная академия связи. Область научных интересов: построение помехозащищенных систем радиосвязи, способов формирования и обработки сигналов сложных структур. Число научных публикаций — 78. manaenkoss@mail.ru; Тихорецкий проспект, 3, 194064, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)247-98-11.

Дворников Сергей Викторович — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры, кафедра радиотехнических и оптоэлектронных комплексов, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения». Область научных интересов: построение помехозащищенных систем радиосвязи, способов формирования и обработки сигналов сложных структур. Число научных публикаций — 283. practicdsv@yandex.ru; Тихорецкий проспект, 3, 194064, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)247-98-11.

Пшеничников Александр Викторович — д-р техн. наук, доцент, заместитель начальника кафедры, кафедра радиосвязи, Военная академия связи. Область научных интересов: построение помехозащищенных систем радиосвязи, способов формирования и обработки сигналов сложных структур. Число научных публикаций — 147. sigacooz77@mail.ru; Тихорецкий пр., 3, 194064, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)247-98-11.

S. MANAENKO, S. DVORNIKOV, A. PSHENICHNIKOV
**THEORETICAL ASPECTS IN FORMING COMPLEX STRUCTURE
SIGNAL**

Manaenko S., Dvornikov S., Pshenichnikov A. Theoretical Aspects in Forming Complex Structure Signal.

Abstract. Receiving and transmitting paths of modern radio communication systems are built on the basis of an open structure that provides hierarchical differentiation of access to the provided telecommunication services. However, this approach does not exclude the possibility of access to the transmitted content by unauthorized users. Hiding information by methods of cryptographic protection in such a situation only activates additional interest in transmission, therefore the most pragmatic solution is to use signals of a complex structure, which significantly complicate or even exclude the extraction of information from them by third-party users. The problem of regulating access selection in the development and design radio system elements is rather multifaceted and has a high degree of complexity. One of the directions for solving problems in this subject area is based on the well-known approaches to expanding the signal base, however, algorithms for their practical implementation were obtained without taking into account the limitations on the allocated resource and the very fact of using these algorithms. Based on the theory of systems and the general theory of communication, an approach to the formation of signal structures of a complex structure has been developed, which ensures an increase in the properties of their structural secrecy in relation to unauthorized users. At the same time, the known solutions at the physical level of signal spaces were refined, which made it possible to formalize the procedures for the formation of radio signals with specified properties. The method of formalizing the function of displaying the signal space based on the allocation of stochastic properties of pseudo-random sequences has been substantiated, which made it possible to ensure the uncertainty of their structure in case of unauthorized processing. The approbation of the proposed approach is given on the example of the formation of quadrature modulation signals, taking into account the subsequent analysis of their properties from various positions of legitimate and illegitimate users. The results obtained confirm the uncertainty during illegitimate processing with a slight deterioration in the noise immunity properties of radio communication systems. In general, this allows to conclude the adequacy of theoretical solutions. As an example, constellation diagrams of signals at the output of a quadrature receiver are presented. The set of proposed technical solutions presented in the work determines the novelty of this approach. The scientific problem to be solved belongs to the class of problems of synthesis of signals of complex structures.

Keywords: signals of complex structure, structural secrecy of signals, energy secrecy of signals, synthesis of signals of complex structure, signal structures.

Manaenko Sergey — Ph.D., Senior lecturer, Department of radio communication, Military academy of communications. Research interests: construction of noise-immune radio communication systems, methods of generating and processing signals of complex structures. The number of publications — 78. manaenkoss@mail.ru; 3, Tikhoretsky pr., 194064, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)247-98-11.

Dvornikov Sergey — Ph.D., Dr.Sci., Professor, Professor of the department, Department of radio engineering and optoelectronic complexes, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation". Research interests: construction of noise-immune radio communication systems, methods of generating and processing signals of complex structures. The number of

publications — 283. practicsv@yandex.ru; 3, Tikhoretsky pr., 194064, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)247-98-11.

Pshenichnikov Alexander — Ph.D., Dr.Sci., Associate Professor, Deputy head of department, Department of radio communication, Military academy of communications. Research interests: construction of noise-immune radio communication systems, methods of generating and processing signals of complex structures. The number of publications — 147. siracooz77@mail.ru; 3, Tikhoretsky pr., 194064, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)247-98-11.

References

1. Mal'cev G.N., Harchenko A.V., Shtan'ko S.V. [Comparative analysis of methods of restricting and controlling access in radio engineering systems with broadcasting information] *Trudy Voenno-kosmicheskoy akademii imeni A.F. Mozhajskogo. [Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy].* 2018. no. 665. pp. 56-68. (In Russ.).
2. Makarenko S.I. *Informacionnoe protivoborstvo i radioelektronnaja bor'ba v setecentricheskix vojnax nachala XXI veka [Information confrontation and electronic warfare in network-centric wars at the beginning of the XXI century].* Sankt-Peterburg. 2017. (In Russ.).
3. Shtan'ko S.V. [Restriction of unauthorized access in radio engineering systems with broadcasting information]. *Informacionno-upravljajushhie sistemy. [Information and control systems].* 2018. no. 5 (96). pp. 57-65. (In Russ.).
4. Moldovyan D.N., Moldovyan N.A., Moldovyan A.A. Commutative encryption method based on Hidden logarithm problem. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software.* 2020. vol. 13. no. 2. pp. 54-68.
5. Moldovyan A.A., Moldovyan N.A., Phieu N.H., Nguyen H.M., Tran C.M. Digital signature algorithms based on Hidden discrete logarithm problem. *Advances in Intelligent Systems and Computing.* 2020. vol. 1014. pp. 1-12.
6. Kuzmin A.S., Markov V.T., Mikhalev A.A., Mikhalev A.V., Nechaev A.A. Cryptographicalgorithms on groups and algebras. *Journal of Mathematical Sciences.* 2017. vol. 223. no. 5. pp. 629–641.
7. Kanevskij Z.M., Litvinenko V.P. *Teorija skrytnosti [Theory stealth].* Voronezh: Izdvo Voronezh.gos. un-ta. [Voronezh: Publishing Voronezh State. University]. 1991. P. 142. (In Russ.).
8. Pantenkov D.G., Litvinenko V.P. [Algorithms of formation and processing of radio signals of command and telemetry radio lines and technical proposals for their implementation]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. [Bulletin of voronezh state technical university].* 2020. vol. 16. no. 2. pp. 90-105. (In Russ.).
9. Gavrishiev A.A. [Application of ks-entropy for quantitative analysis of civil defense communication systems]. *Sibirskij požarno-spasatel'nyj vestnik. [Siberian fire and rescue bulletin].* 2020. no. 3 (18). pp. 47-54. (In Russ.).
10. Sizov A.S., Cyplakov Ju.V. [Analysis of composite signals in radiolocation and secured radio communication]. *Telekommunikacii [Telecommunications].* 2020. no. 5. pp. 33-40. (In Russ.).
11. Zhilyakov E.G., Belov S.P., Ursol D.V. About signals allowing to provide sustainability to impacts of short-term and or focused on spectrum interference. *International Journal of Engineering and Technology (UAE).* 2018. vol. 7. no. 2. pp. 16-20.

12. Kichenko A.N., Savel'ev A.V., Shishakov K.V. [Analysis of signal-code structures in the tasks of increasing the energy stealth of radios]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. [Intelligent systems in production]. 2020. vol. 18. no. 4. pp. 11-20. (In Russ.).
13. Kirillov S.N., Lisnichuk A.A., Lukasin I.V., Pokrovskij P.S. Methods to form both anti-interference and hiding radio signals for prospective communication systems. *International Siberian Conference on Control and Communications*. (SIBCON'2019) Proceedings. 2019. P. 8729649.
14. Dvornikov S.V., Manaenko S.S., Dvornikov S.S. [Parametric mimicry signals modulated oscillations formed in various functional basis]. *Informacionnye tehnologii*. [Information technology]. 2015. vol. 21. no. 4. pp. 259-263. (In Russ.).
15. Kirillov S.N., Lisnichuk A.A., Lukashin I.V., Pokrovskij P.S. Algorithms to form and process signals for multilevel defense of transmitted data based on the principles of cognitive and software-defined radio. *Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies*. (MWENT'2018) Proceedings. 2018. pp. 1-6.
16. Fink L.M. *Teorija peredachi diskretnyh soobshhenij* [Discrete message transmission theory]. M.: Sov. Radio. 1970. P. 718. (In Russ.).
17. Middleton D. *An introduction to statistical communication theory*. Volume 1. 1960. Russ. ed.: Middleton D. *Vvedenie v statisticheskuyu teoriju svyazi*. Tom 1. M.: Sov. Radio. 1961. P. 782.
18. Feher K. *Wireless digital communications. Modulation and spread spectrum applications*. Prentice Hall PTR. 1995. Russ. ed.: Feher K. *Besprovodnaja cifrovaja svjaz'. Metody moduljacji i rasshirenija spectra*. M.: Radio i svjaz'. 2000. P. 520.
19. Varakin L.E. *Teorija slozhnyh signalov*. [Complex signal theory]. M.: Svjaz'. 1970. P. 317. (In Russ.).
20. Pickholtz R.L., Schilling D.L., Milstein L.B. *Theory of Spread-Spectrum Communications – A Tutorial*. *IEEE Trans. Commun.* 1982. vol. 30 (5). pp. 855–884.
21. Anderson J.B. *Called Modulation Systems*. N.Y.: Kluwer Academic Publishers. 2003. P. 544.
22. Dvornikov S.V., Pshenichnikov A.V., Manaenko S.S. [Model of phase-shift keying broadband signal with program operating frequency tuning]. *Telekommunikacii*. [Telecommunications]. 2017. no. 9. pp. 8-12. (In Russ.).
23. Borisov V.I., Zinchuk V.M., Limarev A.E. *Pomehozashhishennost' sistem radiosvyazi rasshireniem spektra signalov metodom psevdosluchajnoj perestrojki rabochej chastoty*. [Interference immunity of radio communication systems by spreading the spectrum of signals by the method of pseudo-random tuning of the operating frequency]. M.: RadioSoft. 2008. P. 512. (In Russ.).
24. Bekkiev A.Ju., Borisov V.I. [Estimation of the anti-interference ability of radio communication channels under electronic warfare conditions]. *Radiotekhnika i jelektronika*. [Journal of Communications Technology and Electronics]. 2019. vol. 64. no. 9. pp. 891-901. (In Russ.).
25. Dvornikov S.V., Pshenichnikov A.V., Rusin A.A. [Generalized functional model of a radio link control its frequency resource]. *Voprosy radiojelektroniki. Serija: Tehnika televidenija*. [Questions of radio electronics. Series: television technology]. 2016. no. 3. pp. 49-56. (In Russ.).
26. Dvornikov S.V., Dvornikov S.S., Pshenichnikov A.V. [Analysis of frequency resource for fhss mode]. *Informacionno-upravljajushhie sistemy*. [Information and Control Systems]. 2019. no. 4 (101). pp. 62-68. (In Russ.).
27. Pshenichnikov A.V. [Estimation of statistical parameters of operating frequencies for radio model in conflict situations]. *T-Comm: Telekommunikacii i transport*. [T-Comm: Telecommunications and transport]. 2017. vol. 11. no. 1. pp. 4-9. (In Russ.).

28. Tuzov G.I. Statisticheskaja teorija priema slozhnyh signalov [Statistical theory of complex signal reception]. M.: Sov. Radio. 1977. P. 116. (In Russ.).
29. Dvornikov S.V., Pshenichnikov A.V. [Design of spectral-efficient signal construction in radio data transmission control and measuring complexes]. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Priborostroenie. [Journal of Instrument Engineering]. 2017. vol. 60. no. 3. pp. 221-228. (In Russ.).
30. Proakis J.G. Digital communication. Mc Graw-Hill. 1995. Russ. ed.: Prokis Dzh. Cifrovaja svjaz'. M.: Radio i svjaz'. 2000. P. 800.
31. Klovkij D.D. Peredacha diskretnyh soobshhenij po radiokanalam. [Transmission of discrete messages over radio channels]. M.: Radio i svjaz'. 1982. P. 304. (In Russ.).
32. Dvornikov S.V., Pshenichnikov A.V. [Noise immunity radio link model in dynamic intentional exposure]. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij Rossii. Radiojelektronika. [Izvestia of the Higher Educational Institutions of Russia. Radioelectronics]. 2017. no. 2. pp. 16-22. (In Russ.).
33. Mesarovich M., Takahara Ja. Obshhaja teorija sistem. Matematicheskie osnovy. [General systems theory. Mathematical foundations]. M.: Izdatel'stvo «Shir». 1978. P. 315. (In Russ.).
34. Skljjar B. Cifrovaja svjaz': teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primenenie. [Digital Communications: Fundamentals and Applications]. M.: Vil'yams. 2016. P. 1099. (In Russ.).
35. Helstrom K. Statisticheskaja teorija obnaruzhenija signalov. [Statistical signal detection theory]. M.: Izdatel'stvo inostranoj literatury. 1963. P. 432. (In Russ.).
36. Wilson S.G. Digital Modulation and Coding. Prentice Hall. 1996. P. 667.
37. Franks L.E. Signal theory. Prentice Hall Inc Englewood Cliffs. N.J. 1969. Russ. ed.: Frenks L. Teorija signalov. M.: Sov. Radio. 1974. P. 344.
38. Dvornikov S.V., Pshenichnikov A.V., Manaenko S.S., Dvornikov S.S. [A method of forming multiposition jamproof signal constructions]. Informacionnye tehnologii. [Information technology]. 2017. vol. 23. no. 9. pp. 669-676. (In Russ.).
39. Mehrota A. Analog and Digital Systems. Artech House. London. 1996. P. 205.
40. Ungerboeck G. Trellis-coded modulation with redundant signal sets Part II: State of the art. Communications Magazine. IEEE. 1987. Vol. 25. Is. 2. pp. 5-11.
41. Torrieri D.J. Principles of secure communication systems. Dedham. MA.: Artech House Inc. 1985. P. 286.
42. Pshenichnikov A.V. [Model of multi-position noise-proof signal structure based on QPSK modulation]. Informacija i kosmos. [Information and Space]. 2017. no. 2. pp. 48-52. (In Russ.).
43. Cahn C.R. Combined Digital Phase and Amplitude Modulation Communication Systems. IRE Transactions on Communications Systems. Vol. CS-8. 1960. pp. 150-154.
44. Korn I. Digital Communications. N. Y.: Van Nostrand Reinhold Co. 1985. P. 676.
45. Buga N.N. Informacija i jelektricheskie signaly [Informations and electrical signals]. L.: LKVVIA. 1960. P. 71. (In Russ.).