

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СИГНАЛОВ

УДК 621.3.052.63

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ГОЛДА

А. И. Семенко, профессор кафедры телекоммуникационных систем Государственного университета телекоммуникаций (Украина, Киев), д.т.н.; setel@ukr.net

Н. И. Бокла, преподаватель Одесской Национальной академии связи им. А. С. Попова (Украина), к.т.н.; nataloshka_77@ukr.net

Предложены модифицированные псевдослучайные последовательности (ПСП) Голда для построения телекоммуникационных систем с кодовым разделением каналов, позволяющие использовать в системах M -позиционные сигналы. В системе MATLAB разработан графический интерфейс пользователя для исследования корреляционных характеристик сигналов с ПСП. Проведены исследования корреляционных характеристик системы с ФМ-4 путем анализа разработанного графического интерфейса пользователя. Показано, что применение модифицированных ПСП Голда позволяет уменьшить необходимую полосу пропускания радиоканала при данном количестве кодированных каналов или увеличить количество кодированных каналов при той же полосе пропускания радиоканала.

Ключевые слова: псевдослучайные последовательности Голда, автокорреляционные и взаимокорреляционные функции, фазоманипулированный сигнал, графический интерфейс пользователя, система MATLAB.

Введение. В настоящее время большие перспективы имеют широкополосные системы с кодовым разделением каналов, обладающие высокой конфиденциальностью передачи информации, повышенной помехозащищенностью при воздействии узкополосных и широкополосных помех, улучшенной энергетикой [1–5].

Для манипуляции сигнала могут быть использованы различные ПСП: m -последовательность, последовательность Касами, Голда и др., а также код Уолша. Главное требование при выборе вида манипулирующей последовательности — получение ансамбля кодированных сигналов, имеющих взаимокорреляционные функции попарных сигналов с минимальными боковыми лепестками, т.е. созданные сигналы должны быть взаимно ортогональные или квазиортогональные. При этом также важно получить максимальное количество кодированных каналов при данной длительности манипулирующего кода.

Применение ПСП Голда в телекоммуникационных системах. Особенностью m -последовательности с использованием двоичного сигнала является ограниченное количество полученных ПСП, пригодных для создания кодированных каналов и определяемое по формуле [1]:

$$L = \frac{\varphi(N)}{k}, \quad (1)$$

где $\varphi(N)$ — фи-функция Ейлера, равная количеству чисел в ряде $1, 2, 3, \dots, (N-1)$, взаимно простых с числом N ; N — количество элементов последовательности (длина кода), $N = 2^k - 1$; k — количество разрядов двоичного сигнала.

На основе m -последовательностей можно построить ансамбль наиболее часто используемых квазиортогональных ПСП Голда [6], которые как вновь образованные последовательности были исследованы в [7, 8].

Число ПСП Голда $L_{\text{Голд}}$ во много раз превосходит количество ПСП L , полученных непосредственно из m -последовательностей:

$$L_{\text{Голд}} = \sum_{i=1}^{i-1} L_i(N+2), \quad (2)$$

где L_i — количество m -последовательностей.

В качестве примера рассмотрим m -последовательность длиной $N = 31$. Известно [2, 4], что существуют шесть формирующих полиномов, т.е. шесть различных m -последовательностей для создания ПСП Голда. Причем, для образования ПСП Голда лучше использовать незеркальные полиномы, т.е. такие, в которых обратная структура кода не соответствует прямой структуре других кодов (например, 1 и 3 в табл. 1). В табл. 1 полиномы пронумерованы и представлены в виде многочлена $X^5 + X^2 + 1$ (520), а также в двоичной форме (100101).

Таблица 1. Формирующие полиномы

№	Полином	№	Полином	№	Полином
1	[520], (100101)	3	[54320], (111101)	5	[54310], (111011)
2	[530], (101001)	4	[53210], (101111)	6	[54210], (110111)

Количество ПСП Голда получим на основе формулы (2) путем попарного использования полиномов из табл. 1 (всего 15 групп). В каждой группе по 33 кода длиной $N = 31$, всего $15 \times 33 = 495$ кодов. Из 15 групп три группы образованы с участием зеркальных полиномов и их корреляцион-

Таблица 2. Количество ПСП

k	3	4	5	6	7	8	9	10
N	7	15	31	63	127	255	511	1023
L	2	2	6	6	18	16	48	60
$L_{\text{Касами}} [2]$	—	4	—	8	—	16	—	32
$L_{\text{Голд}}$	9	17	495	975	19737	30840	578664	1814250

ные характеристики неприемлемы [1]. Все расчеты количества различных ансамблей ПСП разных длин приведены в табл. 2.

При создании многоканальных телекоммуникационных систем с кодовым разделением каналов должны выполняться противоречивые требования реализации максимального количества каналов при заданной ширине полосы пропускания радиоканала.

В системах обычно применяется широкополосный фазоманипулированный (ФМ) сигнал, сформированный методом прямого расширения спектра с помощью манипуляции по закону ПСП, преимущественно ПСП Голда [3, 5].

Для повышения эффективности телекоммуникационных систем широко используются многопозиционные ФМ-сигналы [3]. ПСП Голда всегда имеет непарное количество элементарных импульсов, что в большинстве случаев не позволяет использовать их непосредственно для образования многопозиционных ФМ-сигналов. Для этого к классической ПСП Голда предлагается добавлять (или отнимать) определенное количество импульсов, чтобы новые ПСП, названные нами модифицированными ПСП Голда, имели количество импульсов, кратное количеству разрядов многопозиционного сигнала [9, 10].

В табл. 3 показан метод образования модифицированных ПСП Голда. При этом указаны дополнительные импульсы, добавляемые (+1) или отнимаемые (-1) от классической ПСП Голда. Ряд ПСП Голда не требует модификации (в табл. 3 они обозначены #).

Естественно, изменение количества импульсов в структуре ПСП Голда приведет к изменению ее корреляционных свойств. Поэтому весьма важно оценить корреляционные характеристики модифицированных ПСП Голда. Для этого разработан графический интерфейс пользователя в системе MATLAB для автоматического генерирования ПСП Голда разных длин и исследования их периодических автокорреляционных (АКФ) и взаимокорреляционных функций (ВКФ) [11, 12].

В качестве примера рассмотрим формирование ФМ-4, являющейся наиболее эффективным видом M -позиционных

сигналов, при использовании классической ПСП Голда длиной $N = 31$ и модифицированной ПСП Голда длиной $N = 31 + 1$. В результате анализа АКФ-сигналов (исследованы все реализации ПСП указанной длины) установлено, что добавление 1 или -1 при образовании модифицированных ПСП Голда (в начале или в конце последовательности) незначительно изменяет корреляционные характеристики сигналов.

Также очень важно рассмотреть все ВКФ ПСП Голда. При этом необходимо учитывать количество ВКФ, определяемое формулой

$$S_{VKF} = \frac{L_{Голд}(L_{Голд} - 1)}{2}. \quad (3)$$

Результаты исследований всех АКФ и пар ВКФ показывают, что в отличие от классических ПСП Голда, АКФ и ВКФ модифицированных ПСП Голда имеют различные структуры. Учитывая большое количество необходимых расчетов (122265 ВКФ) здесь приведены расчеты для классических ПСП Голда при $N = 31$, сформированных из полиномов 1 [520] и 3 [54320] (см. табл. 1), а также при $N = 63$, сформированных из полиномов [650] и [65410] и модифицированных при $N = 31 + 1$; $N = 63 + 1$ ПСП Голда.

В табл. 4 показаны значения максимальных боковых лепестков АКФ и ВКФ ПСП Голда (ненормированные) и их количество. В скобках приведены значения ненормированного бокового лепестка.

Очевидно, что преимущество дает добавление -1 для длины $N = 31$ и 1 — для $N = 63$. При этом максимальные боковые лепестки АКФ некоторого незначительного количества реализаций имеют повышенный уровень по сравнению с классической ПСП Голда. Однако при исключении из ансамбля ПСП реализаций с повышенным уровнем боковых лепестков (по результатам исследований, проведенных с помощью графического интерфейса пользователя) практическое применение модифицированных ПСП Голда вполне приемлемо.

Для примера приведены АКФ (рис. 1) и ВКФ (рис. 2) классической и модифицированной ПСП Голда для длины

Таблица 3. Метод образования модифицированных ПСП Голда

k, M^*	$N, L_{Голд}$					
	7, 9	15, 17	31, 495	63, 975	127, 19737	255, 30840
2, 4	+1; -1	+1; -1	+1; -1	+1; -1	+1; -1	+1; -1
3, 8	+1,+1; -1	#	+1, +1; -1	#	+1, +1; -1	#
4, 16	+1; -1,-1,-1	+1; -1,-1,-1	+1; -1,-1,-1	+1; -1,-1,-1	+1; -1,-1,-1	+1; -1,-1,-1
5, 32	-	#	+1,+1,+1+1; -1	+1, +1; -1,-1,-1	+1,+1,+1; -1,-1	#

* — количество позиций ФМ-сигнала.

Таблица 4. Значение максимального бокового лепестка АКФ и ВКФ для 4PSK

N	Максимальный боковой лепесток АКФ и ВКФ классических ПСП Голда	$N_{мод}$	Максимальный боковой лепесток модифицированных ПСП Голда			
			АКФ/АКФ*		ВКФ/ВКФ*	
			-1	1	-1	1
31	0,2903 (9)	32	0,5 (16) /3	0,625 (20) /2	0,625 (20) /1	0,625 (20) /1
63	0,2698 (17)	64	0,5 (32) /2	0,437 (28) /3	0,437 (28) /4	0,437 (28) /5

* — количество реализаций с данным уровнем боковых лепестков.

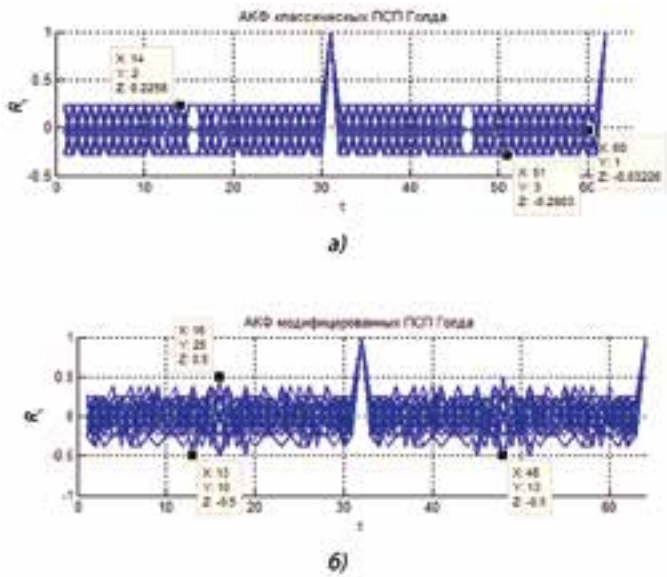


Рис. 1. АКФ ПСП Голда: а — классического ($N = 31$); б — модифицированного ($N = 31 + 1$)

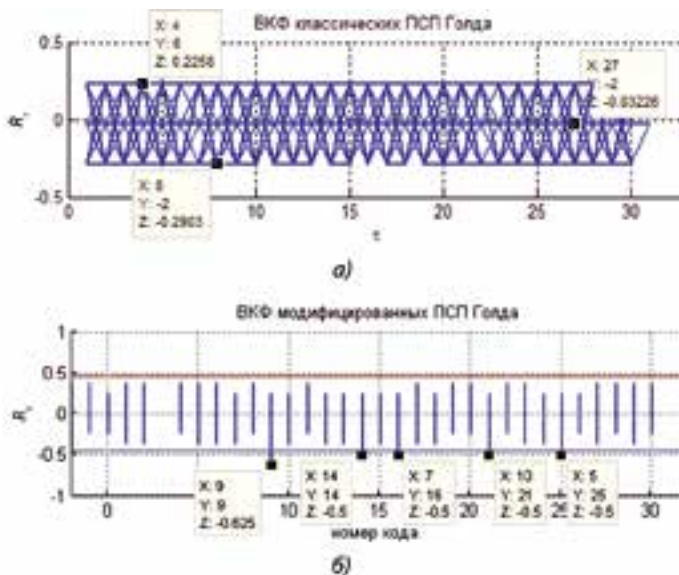


Рис. 2. ВКФ кодов Голда: а — классического ($N = 31$); б — модифицированного ($N = 31 + 1$)

$N = 31$ (показаны все реализации АКФ, сгенерированные из выше указанных полиномов, а также ВКФ первой ПСП со всеми другими). Как видно из табл. 4 и рис. 2, максимальный боковой лепесток ВКФ для модифицированной ПСП Голда составляет 0,625 (при добавлении -1).

С помощью разработанного графического интерфейса пользователя в системе MATLAB можно отобразить кодовые последовательности на некотором уровне, например — 0,45, т.е. все реализации с боковым лепестком больше указанной границы можно отбросить. Рис. 2, б показывает, что в данном случае из 33 реализаций пять следует отбросить.

Таблица 5. Количество модифицированных ПСП Голда

k	3	4	5	6	7	8	9	10
Модифицированные ПСП Голда, 4PSK	18	34	990	1950	39474	61680	1157328	3628500

При изменении количества импульсов в модифицированной ПСП Голда незначительно меняется длительность элементарного импульса τ и соответственно ширина спектра ПСП Голда. После применения модифицированной ПСП Голда будет сформирован 4-позиционный ФМ-сигнал и необходимая полоса пропускания радиоканала практически уменьшится в 2 раза:

$$\Delta f'_k = \frac{2}{\tau'} = \frac{N+1}{T} \approx \frac{1}{\tau} \approx \frac{N}{T} \approx \frac{\Delta f_k}{2}, \quad (4)$$

где T — длительность информационного сигнала; τ — длительность элементарного импульса в широкополосном сигнале; $\tau' = 2\tau$ — длительность элементарного импульса после применения модифицированной ПСП Голда; Δf_k и $\Delta f'_k$ — необходимые полосы пропускания радиоканала для бинарного ФМ-сигнала и для ФМ-4, соответственно.

В общем случае необходимая полоса пропускания для M -позиционного сигнала будет определяться формулой

$$\Delta f''_k = \frac{N}{T \log M}. \quad (5)$$

Для двоичного кода $M = 2^k$ и тогда

$$\Delta f''_k = \frac{N}{Tk}. \quad (6)$$

Очевидно, что при данной длине кода N необходимая полоса пропускания канала уменьшается в k раз при использовании двоичного M -позиционного сигнала.

При формировании сигнала ФМ-4 (4PSK) количество реализаций модифицированных ПСП Голда будет определяться формулой

$$L_{\text{Голд мод.}} = 2 \sum_{i=1}^{i-1} L_i(N+2). \quad (7)$$

В табл. 5 приведено количество модифицированных ПСП Голда, полученное по формуле (7) с использованием k -разрядной двоичной последовательности при образовании сигнала ФМ-4 (4PSK).

На рис. 3 на основании данных табл. 2 и 5 проведено сравнение количества различных ПСП для длины кода $N = 1023$ при образовании сигнала ФМ-4 (4PSK).

На практике важнее с помощью многопозиционного сигнала получить большее количество кодированных каналов при данной полосе пропускания радиоканала, сохраняя первоначальную длительность элементарного импульса τ , определяемое по формуле:

$$N = \Delta f T \log M, \quad (8)$$

где Δf — полоса пропускания радиоканала. Практическое количество пригодных кодированных каналов будет меньше после отброса реализаций с уровнем боковых лепестков, превышающих заданное значение.

Предложенный метод повышения эффективности телекоммуникационных систем с кодовым разделением каналов на основе модифицированных ПСП Голда при применении

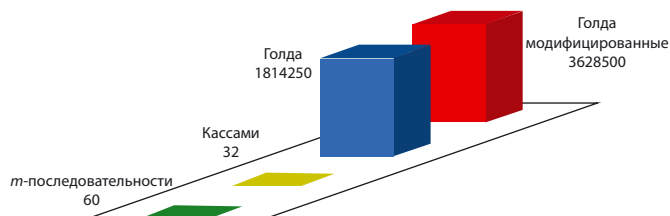


Рис. 3. Количество различных ПСП Голда (классических и модифицированных), Кассами и m -последовательности для длины кода $N = 1023$

разработанного графического интерфейса пользователя в системе MATLAB для автоматизации исследований АКФ и ВКФ сигналов может быть использован для образования 8PSK [13, 14], а также для сигналов с большим количеством позиций и с кодовой последовательностью любой длины.

Выводы. 1. Предложенные модифицирование ПСП Голда позволяют использовать в системах M -позиционные сигналы. Применение модифицированных ПСП Голда обеспечивает уменьшение необходимой полосы пропускания радиоканала при данном количестве кодированных каналов или увеличение количества кодированных каналов при той же полосе пропускания радиоканала.

2. В результате исследований корреляционных характеристик модифицированных ПСП Голда (с помощью разработанного графического интерфейса пользователя в системе MATLAB) установлено, что созданные системы с ФМ-4 с применением модифицированных ПСП Голда допустимы для практического использования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шумоподобные сигналы в системах передачи информации / Под ред. проф. В. Б. Пестрякова. — М.: Сов.радио, 1973. — 424 с.
2. Столлингс В. Беспроводные линии связи и сети. — М., С-П.: К. Вильямс, 2003. — 639 с.
3. Скляр Б. Цифровая связь. — М., С-Пб.: К. Вильямс, 2004. — 1104 с.
4. Волков Л. Н., Немировский М. С., Шинаков Ю. С. Системы цифровой радиосвязи: базовые методы и характеристики. Учеб. пособие. — М.: Эко-Трендз, 2005. — 392 с.
5. Ипатов В. П. Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов. Принципы и приложения. Мир связи. — М.: Техносфера, 2007. — 488 с.
6. Голд Р. Оптимальные двоичные последовательности для использования в широкополосных системах с открытым доступом // IEEE Trans. Inform.Theory. — 1967. — № 4.
7. Смирнов Н. И. Корреляционные свойства последовательностей с большим ансамблем // Радиотехника. — 1972. — № 6.
8. Смирнов Н. И. Построение больших ансамблей последовательностей // Радиотехника. — 1972. — № 3.
9. Патент України на корисну модель № 64776 МПК H04 J 13/00. Телекомунікаційна широкополосна радіосистема з кодовим розподілом каналів / Семенко А. І., Бокла Н. І. Заявник і патентовласник Державний університет інформаційно — комунікаційних технологій, заявл. 31.12. 2010; опубл. 25.11.2011, бюл. № 22.
10. Семенко А. І., Бокла Н. І. Метод двократного зменшення необхідної смуги пропускання каналу зв'язку в телекомунікаційній системі з кодовим розподілом каналів // Зв'язок. — 2011. — № 4. — С. 23—25.
11. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов: Пособие. — 3-е. — СПб.: БХВ-Петербург, 2011. — 768 с.
12. Бокла Н. І. Дослідження кореляційних властивостей ПВП за кодом Голда з використанням системи MATLAB // Вісник ДУИКТ. — 2011. — Т. 9, № 4. — С. 386—391.
13. Семенко А. І., Бокла Н. І. Использование 8-ми позиционного фазоманипулированного сигнала для создания телекоммуникационной системы с кодом Голда / Сб. междунар. науч.-техн. семинара «Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов в инфокоммуникациях», «Синхроинфо 2011», 27—30 июня 2011 г., Украина, Одесса, 2011. — С. 114—116.
14. Бокла Н. І. Використання ПВП Голда в телекомунікаційних системах з кодовим розподілом каналів / Сб. тезисов VI Международного науч.-техн. симпозиума «Новые технологии в телекоммуникациях» ГУИКТ — КАРПАТЫ'2013, 21—24 января 2013 г. — Карпаты, Вишков, 2013. — С. 85—86.

Получено 22.04.14

УДК 621.397.23

РЕГУЛИРОВКА МОЩНОСТИ СИГНАЛА ПО КАНАЛАМ M-QAM-OFDM-МОДУЛЯТОРА

И. Р. Мамедов, профессор Азербайджанского технического университета (АзТУ), д.т.н.; isamamedov@bk.ru
А. М. Шарифов, аспирант АзТУ; aflatun.sharifov@teleradio.aze

Рассмотрены вопросы повышения верности передачи OFDM-сигнала в системе с M-QAM-OFDM-модуляцией путем регулировки мощности по каналам модулятора. Рассчитано уменьшение отношения сигнал/шум в каналах OFDM-модулятора без помех при регулировке мощности сигнала в его каналах с помехами. Определена глубина регулировки отношения сигнал/шум.

Ключевые слова: M-QAM модулятор, OFDM-модуляция, адаптивная регулировка мощности, частотно-селективный канал, помехоустойчивость системы, отношение сигнал/шум.

Введение. При формировании OFDM-сигналов и передаче их по каналам связи возникают характерные искажения. Последовательные символы, поступающие из M-QAM-модулятора, переводятся в параллельные для модуляции своей несущей в своем канале. В частотно-селективном канале коэффициенты передачи сигнала по каналам становятся разными, в результате в общем случае отношения сигнал/шум (ОСШ), а значит и верность передачи по каналам, тоже оказывается различной.

Известны методы анализа верности передачи систем связи с OFDM-модуляцией, где OFDM-сигнал представлен в виде гауссового сигнала, состоящего из суммы N канальных сигналов. Например, в [1] предложено рассмотреть