

ние предложенного алгоритма идентификации даже при малом числе выстрелов может обеспечить существенное уменьшение погрешностей определения положения световых экранов, ближайших к дульному срезу оружия.

Библиографические ссылки

1. Пат. 2213320 Российская Федерация, МПК⁷ F 41 J 5/02. Световая мишень / Н. Ю. Афанасьева, Ю. В. Веркиенко, В. С. Казаков, В. В. Коробейников; заявитель и патентообладатель Институт прикладной механики УрО РАН № 2002116940/02; заявл. 24.06.02; опубл. 27.09.03.
2. Пат. 2279035 Российская Федерация, МПК⁷ F 42 В 35/00 G 01 Р 3/68. Устройство для определения внешнебаллистических параметров метательного элемента с помощью световых экранов / Н. Ю. Афанасьева, В. А. Афанасьев, Ю. В. Веркиенко, В. С. Казаков, В. В. Коробейников; заявитель и патентообладатель Институт прикладной механики УрО РАН № 2005100994/02; заявл. 18.01.05; опубл. 27.06.06.
3. Пат. 2386100 Российская Федерация, МПК⁷ F 41 J 5/00. Световая мишень / Н. Ю. Афанасьева, В. А. Афанасьев, Ю. В. Веркиенко; заявитель и патентообладатель Институт

Получено 24.07.15

прикладной механики УрО РАН № 2008127417/02; заявл. 04.07.08; опубл. 10.04.10.

4. Афанасьева Н. Ю. Информационно-измерительная система на основе световых экранов для испытаний стрелкового оружия: дис. ... канд. техн. наук. – Ижевск, 2003.
5. Вдовин А. Ю. Разработка системы на основе световых экранов для определения внешнебаллистических параметров: дис. ... канд. техн. наук. – Ижевск, 2010.
6. Идентификация модели баллистической трассы / В. А. Афанасьев, А. Ю. Вдовин, В. С. Казаков, В. В. Коробейников // Информационные системы в промышленности и образовании: сб. научн. тр. – Ижевск: ИПМ УРО РАН, 2008 – С. 23–27.
7. Наставления по стрелковому делу. Основы стрельбы из стрелкового оружия. – М.: Воениздат, 1985. – 640 с.
8. Решение обратной задачи внешней баллистики в информационно-измерительной системе / В. А. Афанасьев, Н. Ю. Афанасьева, А. Ю. Вдовин, Ю. В. Веркиенко // Вестник ИжГТУ. – 2008. – № 3. – С. 104–106.
9. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. – 4-е изд. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
10. Афанасьева Н. Ю., Афанасьев В. А., Веркиенко Ю. В. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2006. – 248 с.

УДК 621.396

М. Л. Никитин, магистрант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова
А. Н. Копысов, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова
В. В. Хворенков, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова
А. А. Богданов, кандидат технических наук, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова
А. В. Жидяев, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

МЕТОДЫ СИНТЕЗА СОСТАВНЫХ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННЫХ СИГНАЛОВ

При прохождении через коротковолновый канал связи сигнал испытывает значительные искажения и замирания, что затрудняет, а во многих случаях приводит к невозможности проведения сеанса связи, при этом возникает необходимость в разработке помехоустойчивых СК, которые могут обеспечить прием даже в условиях сильно загруженного канала связи.

В качестве помехоустойчивой сигнальной конструкции в работе рассмотрен широкополосный составной частотно-временной сигнал (ЧВС) [1–4] с прямым расширением спектра (ПРС) псевдослучайной последовательностью (ПСП).

В статье представлены результаты имитационного моделирования составного ЧВС с ПРС.

При проведении исследований использована двухлучевая модель канала связи с рэлеевскими замираниями и аддитивным белым гауссовским шумом, то есть в случае идеальной синхронизации сигнала, при отсутствии неопределенности по задержке [5, 6], а также без использования методов компенсации межсимвольной интерференции [7] и алгоритмов снижения пик-фактора [8].

При использовании М-последовательностей [9, 10] в качестве ПСП малый объем алфавита не позволяет получить большие скорости передачи. Одним из возможных вариантов увеличения скорости передачи является применение ПСП с большим алфавитом. Для этих целей подходят последовательности Голда. В работе рассматривался сигнал с полосой 100 кГц, обеспечивающий скорость передачи 1574 бит/с при использовании последовательностей Голда и М-последовательностей. Кроме того, представлены результаты относительно сигнальной конструкции со скоростью 2755 бит/с при использовании последовательностей Голда. В табл. 1 сведены объемы алфавита для М-последовательностей и последовательностей Голда.

Скорость передачи информации для рассматриваемых сигналов может быть найдена по формуле

$$R = \frac{bF}{2N}, \quad (1)$$

где b – количество передаваемых бит в 1 дискретно-частотном элементе; F – полоса сигнала; N – длина ПСП.

Таблица 1. Объем алфавита последовательностей Голда и М-последовательностей

Длина регистра сдвига m	Длина последовательности L	Алфавит М-последовательности N_M	Кол-во перед. бит b_M	Алфавит последовательности Голда N_G	Кол-во перед. бит b_G
3	7	2	1	9	3
4	15	2	1	17	4
5	31	6	2	33	5
6	63	6	2	65	6
7	127	18	4	129	7
8	255	16	4	257	8

Анализ данных, приведенных в табл. 1, показывает, что при применении последовательностей Голда вместо М-последовательностей при равной длине последовательности в 127 чипов количество передаваемых бит, а значит, и величина скорости передачи за счет большего алфавита увеличится в 1,75 раза. В табл. 2 представлены скорости передачи синтезированных сигнальных конструкций.

Таблица 2. Скорость передачи ЧВС с ПРС

Длина последовательности L	Скорость передачи последовательности Голда R , бит/с	Скорость передачи М-последовательности R , бит/с
31	8064	3225
63	4761	1587
127	2755	1574
255	1568	784

Для оценки помехоустойчивости синтезированных сигналов следует рассмотреть их свойства, что несложно сделать на примере ЧВС с ПСП длиной в 127 чипов. По корреляционным свойствам все последовательности Голда имеют трехуровневую периодическую ВКФ, которая представлена на рис. 1, а, с максимальным по модулю нормированным значением 0,134. М-последовательности имеют в алфавите как предпочтительные пары, так и неpreferируемые, при этом у предпочтительных пар периодическая ВКФ принимает те же максимальные значения, что и у последовательностей Голда, ВКФ неpreferиру-

тельных пар, которая представлена на рис. 1, б, может принимать максимальное по модулю, нормированное значение 0,323.

Уровни боковых выбросов приведены в табл. 3. При этом для синтеза сигнала с максимально возможной скоростью применяется весь алфавит, в который входят как предпочтительные, так и неpreferируемые пары М-последовательностей, следовательно, следует рассматривать наихудшее значение ВКФ.

Таблица 3. Уровень боковых выбросов для М-последовательностей и последовательностей Голда

Тип последовательности	Уровень боковых выбросов, %	
	АКФ	ВКФ
М-последовательность	0,8	32,3
Последовательность Голда	13,4	13,4

Однако величина боковых выбросов в АКФ у М-последовательностей меньше, чем у последовательностей Голда, и принимает следующие максимальные по модулю нормированные значения: 0,8 и 13,4 % соответственно, что отражено на рис. 2.

В то же время при приеме сигнала наибольшее значение для безошибочного декодирования информации имеет различимость последовательностей или их ВКФ. Последовательность Голда в этом случае имеет в 2 раза меньший уровень боковых выбросов, что обеспечивает лучшую различимость последовательностей в алфавите, а значит, более устойчивый прием в зашумленном канале связи.

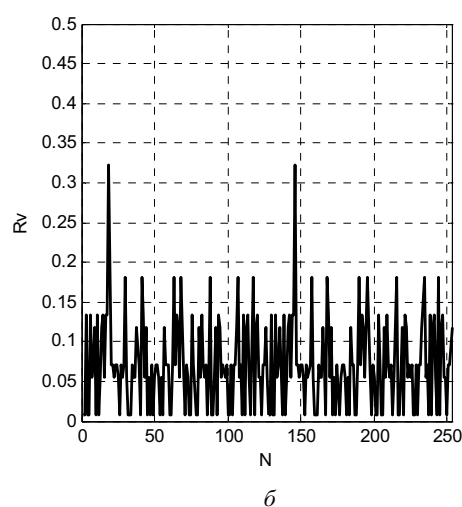
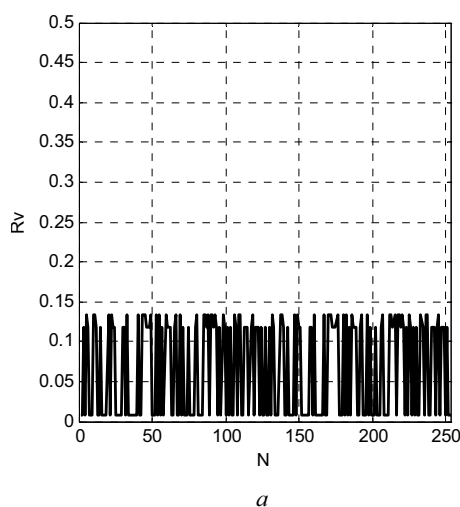


Рис. 1. Периодические, нормированные ВКФ предпочтительной (а) и неpreferируемой (б) пары М-последовательностей

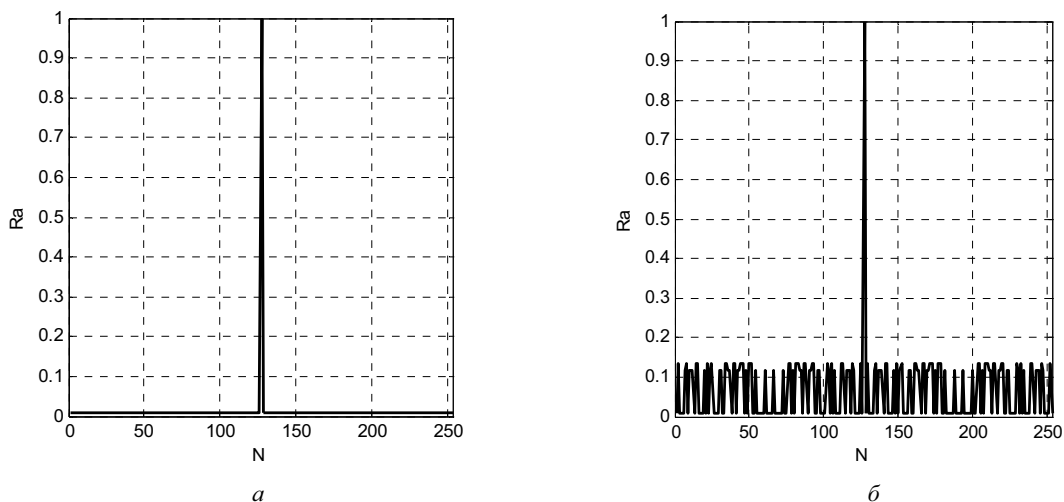


Рис. 2. Периодические, нормированные АКФ М-последовательности (а) и последовательности Голда (б)

Для определения потенциальной помехозащитности сигнальных конструкций проводилось имитационное моделирование, при этом в качестве порогового значения, при котором оценивалось отношение сигнал/шум и энергия на бит, было выбрано значение вероятности ошибки 10^{-3} . В ходе моделирования установлено, что помехоустойчивость ЧВС с М-последовательностью длиной 31 и 63 чипа не позволяет достигнуть порогового значения для рас-

считываемых условий передачи (рис. 3). Поэтому в дальнейшем представлены результаты имитационного моделирования для ЧВС с М-последовательностями и последовательностями Голда длиной 127 чипов.

Кроме того, помехоустойчивость ЧВС с М-последовательностью и последовательностью Голда при скорости передачи 1574 бит/с сопоставимы, что отражено на рис. 4.

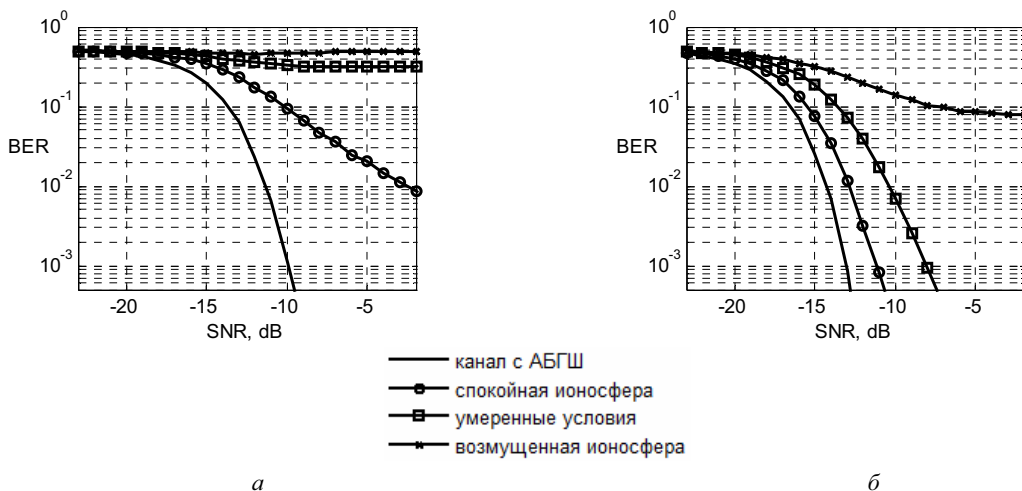


Рис. 3. Вероятность ошибки от отношения сигнал/шум для ЧВС с длиной ПСП 31 чип (а) и 63 чипа (б)

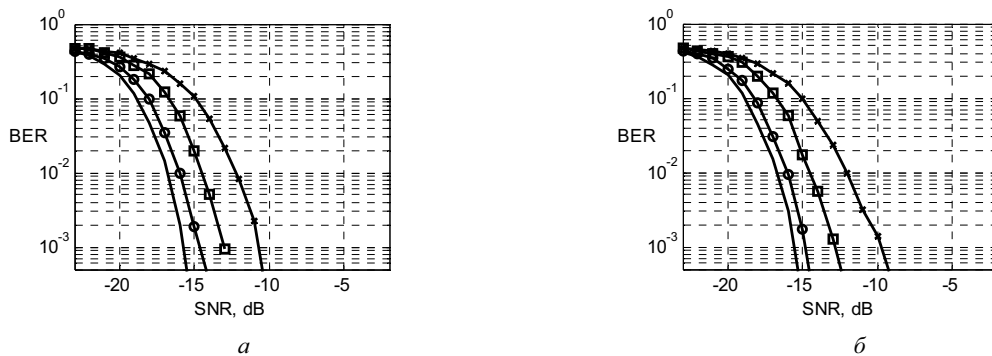
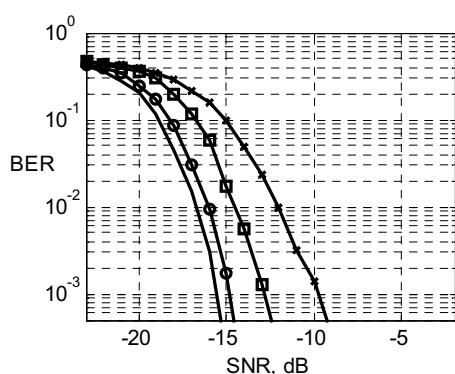


Рис. 4. Зависимость вероятности ошибки от отношения сигнал/шум для сигнала с М-последовательностями (а) и последовательностями Голда (б), скорость передачи 1574 бит/с

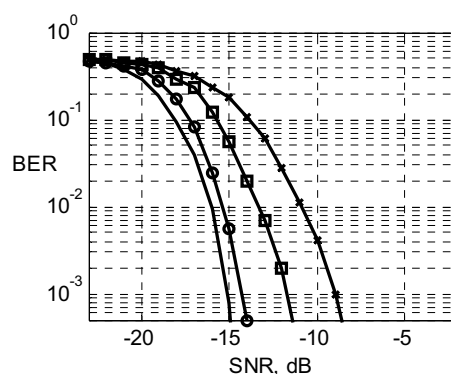
Однако при увеличении скорости передачи ЧВС с последовательностью Голда с 1574 бит/с до 2755 бит/с без изменения полосы при пороговом значении вероятности ошибки (10^{-3}) помехоустойчивость незначительно ухудшается (рис. 5). В частности для канала с АБГШ – на 1 дБ, для канала со спокойной ионосферой и умеренными условиями распространения – на 0,5 и 1,3 дБ соответственно, для канала с возмущенной ионосферой – на 0,7 дБ.

Для сопоставления качества передачи сигналов с различными скоростями были получены оценки отношения сигнал/шум, нормированные к значению энергии на бит в соответствии с формулой [11, 12]

$$10 \cdot \log_{10} \frac{E_b}{N_o} = 10 \cdot \log_{10} \frac{S}{N} + 10 \cdot \log_{10} \frac{W}{R}, \quad (2)$$

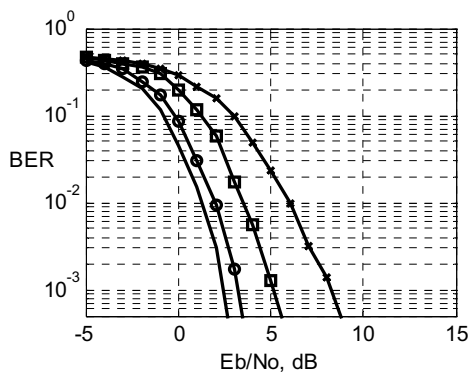


а

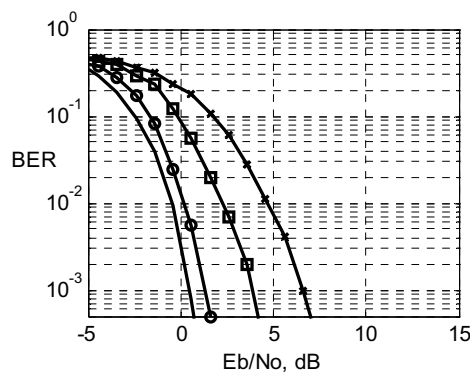


б

Рис. 5. Зависимость вероятности ошибки от отношения сигнал/шум для сигнала с последовательностями Голда, скорость передачи 1574 бит/с (а) и 2755 бит/с (б)



а



б

Рис. 6. Зависимость вероятности ошибки от энергии на бит для ЧВС с последовательностями Голда, скорость передачи 1574 бит/с (а) и 2755 бит/с (б)

Таблица 4. Отношение сигнал/шум и энергии на бит для ЧВС с ПСП Голда длиной 127 и пороговом уровне вероятности ошибки 10^{-3}

Условия распространения	E_b/N_o , дБ		SNR, дБ	
	1574 бит/с	2755 бит/с	1574 бит/с	2755 бит/с
АБГШ	2,5	0,5	-16,0	-15,0
Спокойная ионосфера	3,3	1,3	-14,2	-14,7
Умеренные условия	5,0	4,0	-11,7	-13,0
Возмущенная ионосфера	8,3	6,0	-9,0	-9,7

где $\frac{E_b}{N_o}$ – энергия на бит; $\frac{S}{N}$ – отношение сигнал/шум; W – полоса сигнала; R – битовая скорость передачи.

Использование ЧВС с последовательностями Голда с полным алфавитом при достижении вероятности ошибки (10^{-3}) требует меньшего значения энергии на бит, чем ЧВС с М-последовательностями (рис. 6). Например, для канала с АБГШ и канала со спокойной ионосферой – на 2 дБ, для канала с умеренными условиями распространения – на 1 дБ, для канала с возмущенной ионосферой – на 2,3 дБ.

В табл. 4 сведены результаты сравнительного анализа ЧВС с ПСП Голда длиной 127 чипов при скорости передачи 1574 бит/с и 2755 бит/с для порогового уровня вероятности ошибки 10^{-3} .

Анализ представленных данных позволяет говорить о том, что при увеличении скорости передачи наблюдается проигрыш в помехоустойчивости СК от 0,5 до 1,3 дБ, однако энергетическая эффективность СК возрастает от 1 до 2,3 дБ.

Подводя итог выполненным исследованиям, следует отметить, что в работе были получены следующие результаты. Во-первых, рассмотрены ЧВС с ПСП длиной 31, 63 и 127 чипов и проведена оценка уровня боковых выбросов АКФ и ВКФ как для М-последовательности, так и для последовательности Голда. Установлено, что они имеют разный характер зависимости, при этом последовательности Голда имеют средние по величине и равномерные уровни выбросов. Так, для последних уровни составляют 13,4 %, а у М-последовательностей они варьируются от 0,79 % для АКФ до 32,3 % для ВКФ при прочих равных параметрах самих последовательностей.

Во-вторых, широкополосные частотно-временные сигналы, построенные на базе последовательностей Голда с длиной ПСП в 31 и 63 чипа, обеспечивают невысокое качество приема, однако данные сигнальные конструкции целесообразно использовать для повышения скорости передачи до 8064 и 4761 бит/с, соответственно, в АБГШ-канале и канале со спокойной ионосферой.

В-третьих, анализ результатов моделирования для ЧВС с последовательностями Голда и М-последовательностями длиной в 127 чипов показывает, что при скорости передачи 1574 бит/с рассмотренные СК имеют сопоставимую помехоустойчивость, однако при использовании последовательностей Голда возможно увеличение скорости передачи, так как алфавит ПСП используется не полностью. Повышение скорости передачи с 1574 до 2755 бит/с незначительно ухудшает качество приема, ОСШ возрастает от 0,5 до 1,3 дБ. С другой стороны, энергетическая эффективность СК возрастает от 1 до 2,3 дБ. Таким образом, использование последовательностей Голда вместо М-последовательностей при длине в 127 чипов приводит к увеличению технической скорости передачи в 1,75 раз, при этом возрастает и энергетическая эффективность сигнала.

Получено 28.05.15

Библиографические ссылки

1. Копысов А. Н., Климов И. З., Тюлькин М. В. К вопросу об исследовании частотно-временного сигнала в многолучевом канале связи // Вестник ИжГТУ. – 2009. – № 4. – С. 125–127.
2. Копысов А. Н., Климов И. З., Тюлькин М. В. Исследование алгоритмов разнесенного приема частотно-временных сигналов декаметрового диапазона // Интеллектуальные системы в производстве. – 2010. – № 2. – С. 9–16.
3. Синтез составного дискретно-частотного сигнала / А. Н. Копысов, И. З. Климов, Ю. Т. Загидуллин, В. А. Мошонкин, А. А. Богданов // Вестник ИжГТУ. – 2013. – № 1(57). – С. 95–98.
4. Никитин М. Л., Копысов А. Н., Марков М. М. Оценка помехоустойчивости широкополосных сигналов, построенных на базе фазоманипулированных частотно-временных сигналов // Измерения, контроль и диагностика – 2014 : сб. материалов III Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых / гл. ред. В. В. Муравьев. – Ижевск, 2014. – С. 218–223.
5. Пат. на изобретение RUS 2470459 4.05.2011. Способ обнаружения широкополосных сигналов и устройство для его реализации / И. З. Климов, А. М. Чувашов, А. Н. Копысов, А. А. Богданов.
6. Пат. на изобретение RUS 2486672 27.06.2013. Способ слежения за задержкой широкополосного сигнала и устройство для его реализации / И. З., Климов А. М. Чувашов, А. Н. Копысов, А. А. Богданов
7. Симушин А. А., Копысов А. Н., Климов И. З. Разработка системы цикловой синхронизации для канала с группированием ошибок // Интеллектуальные системы в производстве. – 2011. – № 1. – С. 237–243.
8. Копысов А. Н., Мошонкин В. А., Загидуллин Ю. Т. Исследование алгоритмов снижения пик-фактора сигнальных конструкций на базе дискретно-частотных сигналов // Электронные средства и системы управления. – 2012. – № 1. – С. 18–22.
9. Борисов В. И. Помехозащищенность систем радиосвязи. – М. : Радио и связь, 2003. – 640 с.
10. Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. – М. : Радио и связь, 1985. – 384 с.
11. Скляр Б. Цифровая связь. – М. : Вильямс, 2003. – 1104 с.
12. Прокис Дж. Цифровая связь. – М. : Радио и связь, 2000. – 800 с.