

УДК 621.396

А. Н. Копысов, кандидат технических наук, доцент, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

И. З. Климов, доктор технических наук, профессор, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Ю. Т. Загидуллин, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

В. А. Мошонкин, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

А. А. Богданов, кандидат технических наук, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

СИНТЕЗ СОСТАВНОГО ДИСКРЕТНО-ЧАСТОТНОГО СИГНАЛА*

Проведено сравнение вариантов построения дискретно-частотных сигналов по энергии, приходящихся на один бит информации. Рассмотрены возможности повышения скорости передачи информации различными дискретно-частотными сигналами в заданной полосе частот. Определены пути снижения пик-фактора дискретно-частотных сигналов.

Ключевые слова: частотно-временные матрицы, дискретно-частотные сигналы, пик-фактор, подбор фаз, клиппирование.

Современные требования к такому существенному показателю передачи сигналов в ненадежных каналах связи, как доставка сообщений, заставили использовать дискретно-частотные (ДЧ) сигналы или так называемые частотно-временные сигналы (ЧВС) [1, 2, 3].

Основными задачами, решение которых позволяет оценить эффективность использования таких сигналов, является оценка величины энергии передатчика, приходящейся на один информационный бит сигнальной конструкции, и пик-фактор излучаемого сигнала [4]. Такие задачи особенно актуальны для маломощных средств связи.

Анализ существующих вариантов построения сигнальных конструкций на базе ДЧ-сигналов

Рассмотрим характеристики сигнала, использующего для передачи канал тональной частоты (КТЧ) или стандартный телефонный канал (СТК) с полосой частот 300...3400 Гц [5]. Пусть для определенности ДЧ-сигнал представляет собой частотно-временные матрицы размерностью $M \times M = 7 \times 7$, длительность дискретной частотной составляющей $\tau_{дч} = 5$ мс. Тогда объем алфавита V сигнальной системы, близкой по параметрам к оптимальной [1], составляет $V = 32$ матрицы, что позволяет передавать $N_{дч} = 5$ бит информации одной матрицей. При этом скорость передачи $R_{дч}$ битового потока составит $R_{дч} = 142,85$ бит/с, а средняя энергия в единицу времени на бит информации равна

$$E_{\text{бит,дч}} = \frac{P_{\text{пик}}/X_{\text{дч}} M \tau_{\text{дч}}}{N_{\text{дч}}} \left[\frac{\text{Дж}}{\text{бит}} \right]. \quad (1)$$

Пусть пиковая мощность $P_{\text{пик}} = 10$ Вт, пик-фактор ДЧ-сигнала $X_{\text{дч}} = 3$ дБ. В соответствии с (1) энергия,

приходящаяся на один бит информации, есть

$$E_{\text{бит,дч}} = 49 \left[\frac{\text{мДж}}{\text{бит}} \right].$$

Полученное значение используем в качестве базового и определим зависимость скорости передачи информации от структуры сигнала.

Использование ДЧ-сигналов большой размерности

ДЧ-сигналы размерности $M \times M$ позволяют создавать систему близкую к оптимальной и состоящую из $V = M \times (M - 1)$ частотно-временных матриц [1].

Результаты исследований зависимости скорости передачи, частотных полос ДЧ-сигналов, объема алфавита от размерности матриц приведены в таблице. Для определенности при выполнении расчетов использованы следующие параметры: $\tau_{дч} = 5$ мс, полоса частот, занимаемая сигналом, выбрана 50 кГц. В заданной полосе можно разместить до 125 дискретных частот, отстоящих друг от друга на 400 Гц.

Анализ полученных результатов показывает, что использование квазиоптимальных систем ДЧ-сигналов с малой размерностью позволяет получать выигрыш в скорости передачи за счет увеличения размерности матриц только на первом этапе, когда размерности матриц относительно невелики. Так, для размерности $M \times M = 3 \times 3$ скорость составляет $R_{дч} = 133$ бит/с и достигает пика $R_{дч} = 160$ бит/с при размерности $M \times M = 5 \times 5$. Далее наблюдается снижение скорости передачи и при размерности $M \times M = 11 \times 11$ скорость уже падает до 109,09 бит/с. Следует отметить, что, несмотря на сложный характер зависимости скорости передачи от размера матриц, с ростом размерности наблюдается и рост помехоустойчивости ДЧ-сигналов [1].

Основные характеристики дискретно-частотных сигналов при длительности частотного элемента 5 мс

Размерность матриц, M	Число бит, передаваемых в матрице, N , бит	Число служебных матриц	Скорость передачи V , бит/с	Полоса, занимаемая сигналом, F , кГц	Длительность матрицы τ , мс	Максимум ВКФ
3	2	2	133,33	1,2	15	0,67
5	4	4	160,00	2	25	0,40
7	5	10	142,86	2,8	35	0,29
11	6	46	109,09	4,4	55	0,18
13	7	28	107,69	5,2	65	0,15
17	8	16	94,12	6,8	85	0,12
19	8	86	84,21	7,6	95	0,11
23	8	250	69,57	9,2	115	0,09
29	9	300	62,07	11,6	145	0,07
31	9	418	58,06	12,4	155	0,06
37	10	308	54,05	14,8	185	0,05
41	10	616	48,78	16,4	205	0,05
43	10	782	46,51	17,2	215	0,05
47	11	114	46,81	18,8	235	0,04
53	11	708	41,51	21,2	265	0,04
59	11	1374	37,29	23,6	295	0,03
61	11	1612	36,07	24,4	305	0,03
67	12	326	35,82	26,8	335	0,03
71	12	874	33,80	28,4	355	0,03
73	12	1160	32,88	29,2	365	0,03
79	12	2066	30,38	31,6	395	0,03
83	12	2710	28,92	33,2	415	0,02
89	12	3736	26,97	35,6	445	0,02
97	13	1120	26,80	38,8	485	0,02
101	13	1908	25,74	40,4	505	0,02
103	13	2314	25,24	41,2	515	0,02
107	13	3150	24,30	42,8	535	0,02
109	13	3580	23,85	43,6	545	0,02
113	13	4464	23,01	45,2	565	0,02

Передача информации по параллельным подканалам в широкой полосе

Вариантом компромиссного решения может стать использование алгоритма, где на отдельных подканалах будут использоваться ДЧ-сигналы, передающие информацию подобно OFDM-сигналам, использующим поднесущие для передачи дискретной информации. Такой сигнал можно считать составным ДЧ-сигналом (СДЧ). Результаты исследований в данной области представлены на рис. 1–3.

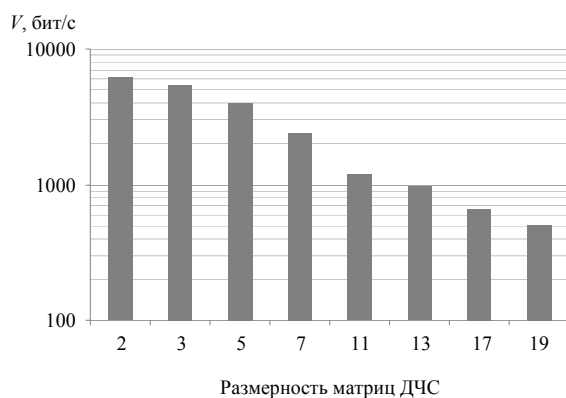


Рис. 1. Зависимость скорости передачи от размерности матриц ДЧ-сигнала

Очевидно, что при таком способе организации сигнальных конструкций существенно (примерно

пропорционально числу подканалов) возрастает пик-фактор. Кроме того необходимо использовать широкополосный усилитель мощности. Так, например, при использовании ДЧ-сигналов размерности $M = 5 \times 5$ в полосе 50 кГц можно организовать 25 подканалов и обеспечить скорость передачи $R_{5,5} = 4000$ бит/с, однако пик-фактор итогового сигнала может достигать 31 дБ, (в среднем порядка 14,3 дБ).

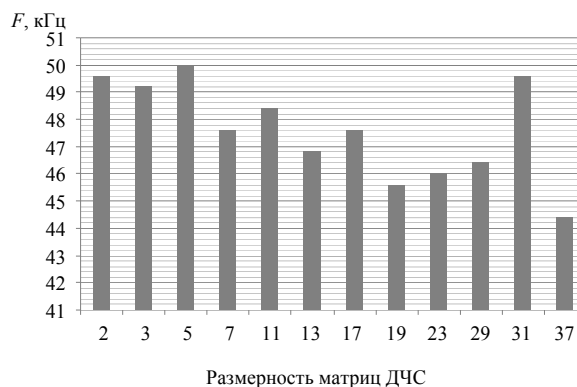


Рис. 2. Полоса суммарного сигнала при разной размерности матриц ДЧ-сигнала

С ростом размерности матриц уменьшается число подканалов. Следовательно, снижается скорость передачи и пик-фактор. Например, при $M \times M = 7 \times 7$ в полосе 47,6 кГц можно организовать 17 подканалов,

что обеспечит скорость передачи $R_{11 \times 11} = 2400$ бит/с, а максимум пик-фактора снизится до $X_{11 \times 11} = 27,6$ дБ (средний уровень составит 12,8 дБ). Применение ДЧ-сигналов размерности $M \times M = 11 \times 11$ в полосе 48 кГц позволяет организовать 11 подканалов, что обеспечивающих скорость передачи $R_{11 \times 11} = 1200$ бит/с и пик-фактор не более $X_{11 \times 11} = 23,8$ дБ (в среднем 11 дБ). Использование ДЧ-сигналов размерности $M \times M = 13 \times 13$ в полосе 47 кГц позволяет организовать 9 подканалов, обеспечивающих скорость передачи $R_{13 \times 13} = 1000$ бит/с и пик-фактор не более $X_{13 \times 13} = 22$ дБ (в среднем 10,2 дБ).

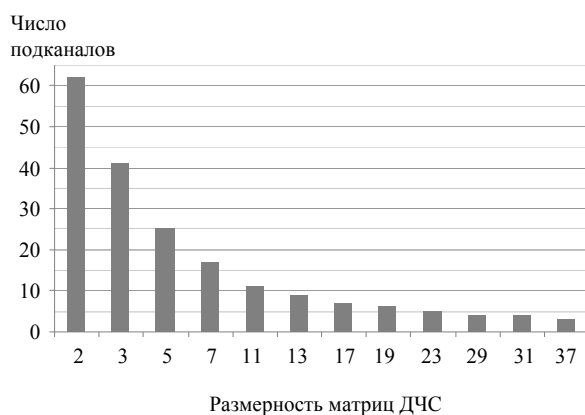


Рис. 3. Число подканалов в полосе 50 кГц в зависимости от размерности матриц ДЧ-сигнала

Анализ представленных результатов позволяет сделать вывод, что при таком построении сигнальных конструкций, обеспечивающих скорость передачи от 1000 до 4000 бит/с, наряду с высокой помехоустойчивостью значительно возрастает пик-фактор, а значит, и снижается энергия, приходящаяся на один бит информации.

В настоящее время задача снижения пик-фактора обычно решается с помощью одного из двух равноэффективных способов: подбором начальных фаз составляющих (задача Манделъштама – Папалекси [6]) либо благодаря использованию алгоритма клиппирования результирующего сигнала в модуляторе [7]. На практике использование обоих методов представляется целесообразным. Так, при передаче преамбулы, структура которой может быть одинакова для каждого из подканалов, целесообразно применять первый метод – подбор начальных фаз сигналов. Такое решение использовано в стандарте MIL-STD-188-110B app. [8]. Благодаря такому механизму пик-фактор преамбулы СДЧ-сигнала может не превышать 6 дБ. Так как во время передачи информации одновременно может присутствовать любая из M частот ДЧ-сигнала подканала, то суммарный сигнал следует подвергнуть процедуре клиппирования, что позволит

снизить пик-фактор до 5...6 дБ при передаче информационной части сигнала.

Выводы

Предложенный вариант построения сигнальных конструкций на базе дискретно-частотного сигнала заслуживает внимания, так как наряду с повышением скорости передачи он позволяет передавать информацию в подканалах связи, отстоящих друг от друга на величину интервала декорреляции частот [9], характерного для ряда каналов связи. В то же время за счет снижения скорости передачи представляется возможным организовать передачу информации по параллельным подканалам, разнесенным по частоте на интервал декорреляции канала связи, что, несомненно, повышает вероятность доставки информации.

Снижение уровня пик-фактора до величин порядка 6 дБ благодаря решению задачи по подбору начальных фаз преамбулы широкополосного дискретно-частотного сигнала, а также использование метода клиппирования при передаче информации позволит при размерности ДЧ-сигналов $M \times M = 7 \times 7$ в полосе 47,6 кГц организовать 17 подканалов и обеспечить скорость передачи $R_{7 \times 7} = 2400$ бит/с. При этом энергия, приходящаяся на один бит информации, для составного ДЧ-сигнала $E_{\text{битСДЧ}} = 2,06$ [мДж/бит], что в 24 раза меньше, чем у простого ДЧ-сигнала с аналогичной размерностью матрицы.

Библиографические ссылки

1. Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985. – 284 с.
2. Копысов А. Н., Климов И. З., Толькин М. В. Исследование алгоритмов разнесенного приема частотно-временных сигналов декаметрового диапазона // Интеллектуальные системы в производстве. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2010. – № 2. – С. 9–16.
3. Бабинцев Е. С., Копысов А. Н., Климов И. З. Структурная скрытность дискретно-частотного и многочастотного широкополосных сигналов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2010. – № 2. – С. 109–113.
4. Николаев Б. И. Последовательная передача дискретных сообщений по непрерывным каналам с памятью. – М.: Радио и связь, 1988. – 264 с.
5. Основы построения телекоммуникационных систем и сетей / под ред. В. В. Крухмалева, В. Н. Гордиенко. – Горячая линия – Телеком, 2004. – 510 с.
6. Новые исследования нелинейных колебаний / Л. И. Манделъштам [и др.]. – М.: Радиоиздат, 1936. – 95 с.
7. A new approach for evaluating clipping distortion in Multicarrier systems / Bahai A. R. S. [et al.] // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2002. – Vol. 20. – P. 3–11.
8. Department of Defense, USA. “Interoperability and Performance Standards for Data Modem MIL-STD-188-110A”, September, 1991.
9. Радиопередачи ионосферного рассеяния метровых волн / под ред. Н. Н. Шумской. – М.: Связь, 1973. – 193 с.

A. N. Kopysov, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

I. Z. Klimov, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Yu. T. Zagidullin, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

V. A. Moshonkin, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

A. A. Bogdanov, PhD in Engineering, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Synthesis of Aggregate Discrete-Frequency Signals

Comparison of variants for construction of discrete-frequency signals according to the energy per one bit of information is carried out. Facilities of increasing the information transmission rate by various discrete-frequency signals in the assigned frequency band are considered. Ways of reducing PAPR of discrete-frequency signals are defined.

Key words: time-frequency matrices, discrete-frequency signals, PAPR, phase selection, clipping.

УДК 621.396

И. З. Климов, доктор технических наук, профессор, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

В. Е. Минин, соискатель, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

В. А. Мошонкин, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОБЩЕГО КАНАЛА В ЦИФРОВОЙ СЕТИ СВЯЗИ*

Создана имитационная модель сети радиосвязи. Выполнено сравнение эффективности использования канала различными протоколами доступа к среде.

Ключевые слова: моделирование сети связи, эффективность использования канала сетью радиосвязи, правила доступа к среде, алгоритм адаптации, канальный уровень.

Рассмотрим следующую модель. Существует общая среда передачи данных. В общей среде функционируют станции. Все станции находятся в режиме постоянного прослушивания эфира. Станции синхронизированы, однако существует временная задержка на распространение сигнала от одной станции до другой. Если какой-либо из станций поступает на передачу пакет данных, то она начинает передачу согласно правилам доступа к среде того протокола, который она применяет. При попытке передачи возможны два варианта: станция-адресат приняла пакет или в общей среде происходит коллизия. При возникновении коллизии станция-отправитель повторяет попытку передачи согласно правилам доступа к среде применяемого протокола доступа. Под протоколом доступа понимаем лишь правила доступа к среде. Будем считать, что формат кадров для всех протоколов един, и со сменой протоколов изменяются лишь правила установления соединения и правила повторной передачи. После установления соединения станции переходят на другой диапазон без конкуренции, следовательно, будем считать, что факт установления соединения является конечной целью работы модели.

Согласно предложенной методике увеличения производительности сети радиосвязи за счет выбора оптимального набора правил доступа к среде [1] произведено моделирование попыток установления соединений станциями с цифровой связью, работающими в общем канале. Данная методика позволяет выбрать правила доступа к среде передачи данных на основе обучающего множества примеров. Примеры

представляют собой значения параметров (факторов, влияющих на скорость передачи канального уровня), представленные как точки в пространстве параметров, и набора правил, выбор которого при этих факторах обеспечит максимальную скорость передачи канального уровня. В результате применения алгоритма ожидается увеличение общей производительности сети связи с общим каналом.

Рассмотрим работу станций в синхронной системе связи со случайным доступом. В этой системе связи радиостанция может находиться в трех состояниях: передача; прием; подготовка к передаче. Наибольший интерес представляет момент, когда у станции имеется пакет на передачу и она производит сканирование канала и передачу. В синхронных системах связи этот момент может наступить только в случае поступления синхросигнала, сигнализирующий о начале нового слота.

В целях проведения оценки эффективности использования общего канала станциями связи разработана программа моделирования в пакете *MATLAB*.

Основной частью программы моделирования является цикл по временным слотам. Сама программа моделирует события, происходящие в момент начала очередного слота. Обработка этих событий разделена на четыре части:

- продолжение передачи, начатой в предыдущих слотах;
- начало новой передачи;
- анализ состояния канала связи после начала передачи (поиск коллизий);
- обработка успешных слотов.