

УДК 621.391.266

ФОРМИРОВАНИЕ И ОБРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЗНАЧНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ В МНОГОКАНАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

Е. А. Григорьевых,

старший преподаватель, младший научный сотрудник

Р. Г. Хафизов,

доктор техн. наук, доцент

Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола

Предложен подход к организации многоканальной передачи информации с использованием комплекснозначных последовательностей. Показано, что применение комплекснозначных последовательностей, обладающих равномерным энергетическим спектром, позволяет устранить влияние соседних каналов. Рассмотрен принцип формирования кадра при многоканальной передаче информации на примере двоичных каналов.

Ключевые слова — многоканальная связь, комплекснозначный сигнал, кодовое разделение каналов, пропускная способность.

Введение

В многоканальных системах передачи информации, функционирующих по принципу кодового разделения каналов, используются сигналы, полоса которых во много раз превышает полосу частот при обычной передаче данных, например, в системах с частотным разделением каналов [1, 2]. Прием осуществляется оптимальным приемником, который для сигнала с полностью известными параметрами вычисляет корреляционный интеграл. Затем результат сравнивается с пороговым значением. Коррелятор (согласованный фильтр) производит «сжатие» спектра широкополосного входного сигнала путем умножения его на эталонную копию с последующей фильтрацией, что и приводит к улучшению отношения сигнал/шум на выходе коррелятора. Выбирая определенный ансамбль сигналов с «хорошими» автокорреляционными функциями (АКФ), можно обеспечить в процессе корреляционной обработки разделение сигналов.

В работе [3] показано, что большинство сигналов с идеальными АКФ и, соответственно, с равномерным энергетическим спектром являются комплекснозначными. Комплекснозначная последовательность $\Gamma = \{\gamma(n)\}_{0, s-1}$ размерности s , состоящая из последовательности элементов $\gamma(n)$, т. е.

$$\Gamma = \{\gamma(0), \gamma(1), \dots, \gamma(s-1)\},$$

где $\gamma(n) = |\gamma(n)| \exp\{i\varphi(n)\}$, $n = 0, 1, \dots, s-1$, будет обладать равномерным энергетическим спектром, т. е. $|\rho(0)|^2 = |\rho(1)|^2 = \dots = |\rho(s-1)|^2$, в том случае, если составляющие его элементы равны

$$\gamma(n) = \frac{|\rho|}{s} \sum_{m=0}^{s-1} \left\{ \cos \left[\frac{2\pi}{s} mn + \theta(m) \right] + i \sin \left[\frac{2\pi}{s} mn + \theta(m) \right] \right\},$$

$$n = 0, 1, \dots, s-1.$$

Комплекснозначная последовательность, характеризующаяся равномерным энергетическим спектром, имеет только один значащий отсчет АКФ $\eta(0) = \|\Gamma\|^2$, соответствующий главному лепестку функции. Здесь $\|\Gamma\|^2$ — квадрат нормы последовательности. Все остальные отсчеты, образующие боковые лепестки АКФ, равны нулю. В данной работе рассмотрена возможность применения комплекснозначных последовательностей для организации многоканальной передачи информации.

Кодирование канальных сообщений комплекснозначными последовательностями

Использование комплекснозначных последовательностей с равномерным энергетическим спектром в системах передачи данных с кодовым разделением каналов основано на возможности идеального разделения каналов при корреляцион-

ной обработке сигнала за счет нулевой величины скалярного произведения между сигналами различных каналов, полученных путем циклического сдвига общей базовой кодирующей последовательности. Рассмотрим принцип формирования одного кадра при многоканальной передаче информации на примере двоичных каналов.

Применение в системах передачи данных с кодовым разделением каналов комплекснозначных последовательностей с равномерным энергетическим спектром основано на возможности идеального разделения каналов при корреляционной обработке сигнала за счет нулевой величины скалярного произведения между сигналами различных каналов, полученных путем циклического сдвига общей базовой кодирующей последовательности.

Имеется базовая кодирующая последовательность $\Gamma_0 = \{\gamma(n)\}_{0, s-1}$. Последовательности для нуля Γ_j^0 и единицы Γ_j^1 в j -м канале получаются циклическим сдвигом базовой последовательности соответственно на $2j$ и $2j + 1$ элементов, т. е.

$$\Gamma_j^0 = \{\gamma_j^0(n)\}_{0, s-1} = \{\gamma(n + 2j)_s\}_{0, s-1};$$

$$\Gamma_j^1 = \{\gamma_j^1(n)\}_{0, s-1} = \{\gamma(n + 2j + 1)_s\}_{0, s-1},$$

где $(\bullet)_s$ — операция взятия по модулю s .

Групповой сигнал формируется путем векторного суммирования канальных сигналов, т. е.

$$\Gamma_{гр} = \{\gamma_{гр}(n)\}_{0, s-1} = \sum_{j=0}^{M-1} \Gamma_j^X = \left\{ \sum_{j=0}^{M-1} \gamma_j^X(n) \right\}_{0, s-1},$$

где M — количество каналов; X — символ, передаваемый в j -м канале. На приемной стороне вычисляется скалярное произведение между эталонной кодирующей последовательностью каждого символа и принятым групповым сигналом $\Gamma_{гр}$:

$$(\Gamma_{гр}, \Gamma_j) = \eta = \sum_{n=0}^{s-1} \gamma_{гр}(n) \gamma_j^*(n).$$

Поскольку все используемые сигналы ортогональны, то взаимное влияние каналов при обнаружении и распознавании сигналов исключено. С учетом того, что кодирующие последовательности получены циклическим сдвигом базовой, операция обработки принятой кодовой последовательности сводится к вычислению ее циклической взаимной корреляционной функции (ВКФ) с базовой кодовой последовательностью:

$$\eta_r = \sum_{n=0}^{s-1} \Gamma_{гр} \gamma_0^*(n+r)_s, \quad r = 0, 1, \dots, 2M - 1.$$

Рассмотрим принцип построения одного кадра многоканальной системы передачи информации с кодовым уплотнением каналов на примере комплекснозначной последовательности $\Gamma =$

$\{1, 1, 1, 1, -0.5+0.866i, -0.5-0.866i, 1, -0.5-0.866i, -0.5+0.866i\}$. Каждому символу в каждом канале ставится в соответствие своя комплекснозначная последовательность, получаемая циклическим сдвигом базовой комплекснозначной последовательности на один элемент (таблица) [4].

При указанном методе кодирования количество каналов составляет $s/2 = 4,5$, где $s = 9$. Допустим, что в текущем кадре передается следующая комбинация $\{1, 1, 0, 1\}$, т. е. в первом канале передается 1, во втором — 1, в третьем — 0 и т. д.

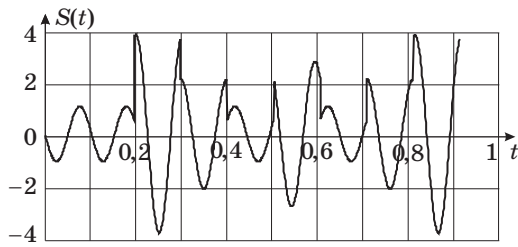
Групповой сигнал $\Gamma_{гр} = \{-0.5+0.866i, -0.5+0.866i, 2.5-0.866i, 2.5-0.866i, 1, 1+1.732i, 1.25-0.866i, 2.5-0.866i, -0.5+0.866i, -0.5+0.866i, 2.5-0.866i, 1, 1+1.732i, 1\}$, элементы которого равны сумме элементов в соответствующих столбцах, задает последовательность, передаваемую в линию связи.

Комплекснозначные кодовые последовательности являются лишь математической моделью реального сигнала и не могут непосредственно использоваться в системах передачи и извлечения информации.

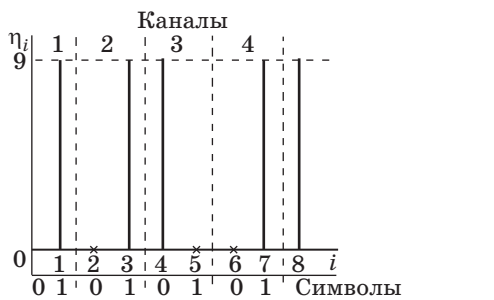
Реальным физическим носителем сигнала в пространстве может быть гармоническое колебание, какие-либо параметры которого изменяются по закону формирования элементов комплекснозначной последовательности [5]. В данной работе в качестве физического носителя был использован амплитудно-фазокодированный сигнал. При этом каждый элемент $\gamma(n)$, $n = 0, 1, \dots, s - 1$, комплекснозначной последовательности $\Gamma = \{\gamma(n)\}_{0, s-1}$ ассоциируется с n -м кодовым интервалом сигнала. В его пределах сигнал представляет собой отрезок синусоиды, амплитуда которой определяется модулем $|\gamma(n)|$, а начальная фаза — аргументом $\varphi(n)$ элемента $\gamma(n)$:

■ Таблица соответствия символов и комплекснозначных последовательностей в многоканальной системе связи

Канал	Символ	Кодовая комбинация
1	«0»	1, 1, 1, 1, -0.5+0.866i, -0.5-0.866i, 1, -0.5-0.866i, -0.5+0.866i
	«1»	-0.5+0.866i, 1, 1, 1, 1, -0.5+0.866i, -0.5-0.866i, 1, -0.5-0.866i
2	«0»	-0.5-0.866i, -0.5+0.866i, 1, 1, 1, 1, -0.5+0.866i, -0.5-0.866i, 1
	«1»	1, -0.5-0.866i, -0.5+0.866i, 1, 1, 1, 1, -0.5+0.866i, -0.5-0.866i
3	«0»	-0.5-0.866i, 1, -0.5-0.866i, -0.5+0.866i, 1, 1, 1, 1, -0.5+0.866i
	«1»	-0.5+0.866i, -0.5-0.866i, 1, -0.5-0.866i, -0.5+0.866i, 1, 1, 1, 1
4	«0»	1, -0.5+0.866i, -0.5-0.866i, 1, -0.5-0.866i, -0.5+0.866i, 1, 1, 1
	«1»	1, 1, -0.5+0.866i, -0.5-0.866i, 1, -0.5-0.866i, -0.5+0.866i, 1, 1



■ Рис. 1. Пример фазокодированного сигнала суммарной комплекснозначной последовательности



■ Рис. 2. Результат вычисления ВКФ между базовой последовательностью и принятым сигналом

$$s(t) = \begin{cases} |\gamma(0)| \sin\left(\frac{2\pi t}{\tau_{к.и}} + \arg(\gamma(0))\right) & \text{при } 0 \leq t < \tau_{к.и}; \\ |\gamma(1)| \sin\left(\frac{2\pi t}{\tau_{к.и}} + \arg(\gamma(1))\right) & \text{при } \tau_{к.и} \leq t < 2\tau_{к.и}; \\ \dots \\ |\gamma(s-1)| \sin\left(\frac{2\pi t}{\tau_{к.и}} + \arg(\gamma(s-1))\right) & \text{при } (s-1)\tau_{к.и} \leq t < s\tau_{к.и}, \end{cases}$$

где $\tau_{к.и}$ — длительность кодового интервала.

Пример амплитудно-фазокодированного сигнала, сформированного на базе суммарной комплекснозначной последовательности $\Gamma_{гр}$, представлен на рис. 1.

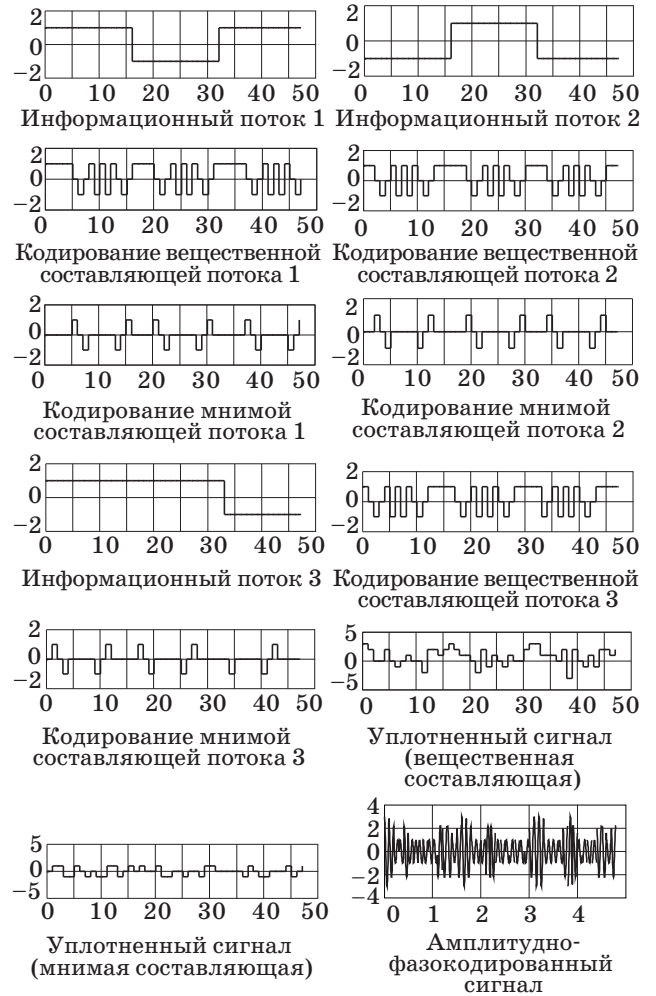
Для рассмотренного примера кодирования сигнал на выходе коррелятора будет иметь вид, показанный на рис. 2.

Положение ненулевых отсчетов на графике ВКФ соответствует сдвигам последовательностей относительно базовой.

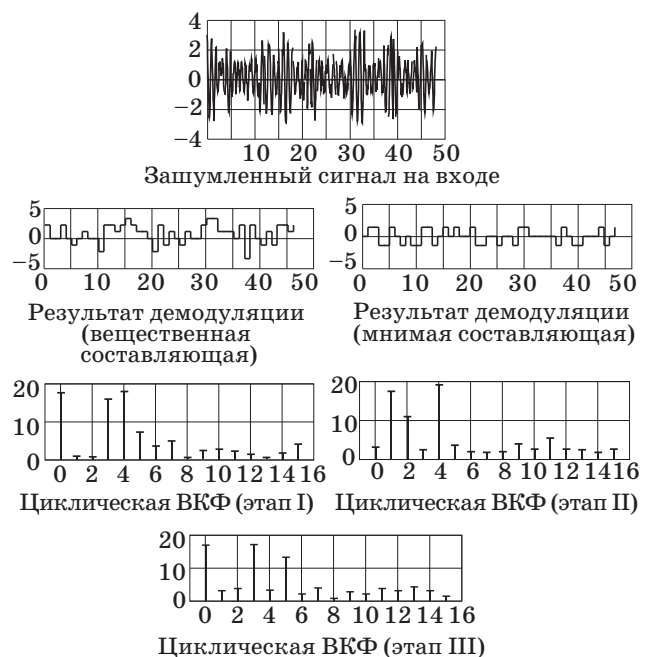
Таким образом, формирование группового сообщения сводится к суммированию отдельных кодирующих последовательностей, образуемых на основе базовой путем циклического сдвига и выбираемых в соответствии с передаваемым сообщением.

Организация многоканальной передачи информации с использованием комплекснозначных последовательностей

Рассмотрим передачу трех информационных потоков (рис. 3). Длительность информационных



■ Рис. 3. Уплотнение трех канальных сигналов



■ Рис. 4. Декодирование сложного сигнала

символов — 16. В качестве ортогональной функции взята комплекснозначная последовательность с равномерным энергетическим спектром размерности $s = 16$. Система ортогональных функций образована циклическим сдвигом элементов комплекснозначной последовательности. Каждому символу каждого потока соответствует своя последовательность.

Процесс демодуляции сложного сигнала в смеси с шумом представлен на рис. 4.

Как видно, корреляторы уверенно выделяют информацию даже на фоне помехи, несмотря на то, что передача ведется по разным каналам одновременно в общей полосе частот. Для эффективной работы системы критически важно отсутствие временных сдвигов между входящим сложным сигналом и сигналом, выдаваемым генератором комплекснозначных последовательностей. Это достигается применением специальной синхронизирующей последовательности.

Анализ эффективности системы передачи данных

Предельная пропускная способность системы передачи с равномерной АЧХ и линейной ФЧХ в пределах полосы пропускания ΔF тракта передачи при наличии стационарного гауссова шума средней мощностью $P_{\text{ш}}$ и сигналов со средней мощностью P_c определяется по формуле Шеннона

$$C = F \log_2(1 + P_c/P_{\text{ш}}).$$

При многоканальной передаче возникают специфические переходные помехи между каналами, обусловленные неидеальностью разделяющих устройств на приемной стороне и устройств формирования сигналов на передающей, линейными и нелинейными искажениями в групповом тракте передачи. Качество многоканальной системы с точки зрения переходных помех характеризуется величиной затухания $A_{ik} = 10 \lg(P_i/P_{ik})$, где P_i и P_{ik} — мощности на входе влияющего и выходе подверженного влиянию каналов. Для мощности помех, наводимых i -м каналом на выходе k -го канала, имеем $P_{ik} = P_i 10^{-0,1A_{ik}}$, а общая мощность переходных помех $P_{\text{п}} = \mu P_c$, где $\mu = \sum_{i=1}^N 10^{-0,1A_{ik}}$ ($i \neq k$) — коэффициент взаимных переходных помех между каналами. Если в формуле Шеннона учесть действия переходных помех, то

$$C = F \log_2 \left(1 + \frac{P_c}{P_{\text{ш}} + \mu P_c} \right).$$

Поскольку обычно $P_{\text{ш}} \leq \mu P_c$, то для пропускной способности системы многоканальной связи можно записать

$$C = F \log_2(1 + 1/\mu).$$

Последнее выражение позволяет учесть ограничение пропускной способности из-за действия переходных помех в отсутствии белого шума.

При использовании в качестве адресных сигналов дискретных комплекснозначных последовательностей, обладающих равномерным энергетическим спектром, величина затухания между влияющим i -м каналом и подверженным влиянию k -м каналом стремится к бесконечности. Коэффициент взаимных переходных помех μ при этом стремится к нулю.

Заключение

Применение комплекснозначных последовательностей с равномерным энергетическим спектром в многоканальных системах передачи информации теоретически дает возможность идеального разделения каналов при корреляционной обработке сигнала за счет нулевой величины скалярного произведения между сигналами различных каналов. Достоинством данной системы является тот факт, что взаимное влияние каналов при обнаружении и распознавании сигналов исключено, поскольку все используемые в системе сигналы ортогональны.

Литература

1. Многоканальные системы передачи / под ред. Н. Н. Боевой и В. Н. Гордиенко. — М.: Радио и связь, 1996. — 344 с.
2. Цветков К. Ю., Коровин В. М., Косаревич Д. В. Оптимальный ансамбль нелинейных сигналов для синхронных систем передачи информации с кодовым разделением абонентов // Информационно-управляющие системы. 2011. № 6(55). С. 40–44.
3. Введение в контурный анализ и его приложение к обработке изображений и сигналов / под ред. Я. А. Фурмана. — М.: Физматлит, 2002. — 592 с.
4. Хафизов Р. Г., Григорьевых Е. А. Применение комплекснозначных сигналов в системах асинхронной передачи данных // Телекоммуникации. 2007. № 10. С. 14–18.
5. Хафизов Р. Г., Смирнов А. В., Григорьевых Е. А. Исследование помехоустойчивости физических носителей комплекснозначных сигналов / МарГТУ, Йошкар-Ола, 2005. Деп. в ВИНТИ 22.07.05. № 1070-В2005.