



ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ФОРМИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ КАНАЛЬНЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ СИСТЕМ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ

Д. В. УРСОЛ

*Белгородский
государственный
университет*

В статье рассматривается новый метод формирования канальных сигналов, которые обладают высоким уровнем помехоустойчивости и имеют максимальную концентрацию энергии в заданном интервале частот. Исследования в помехоустойчивости проводится между разработанным методом и BPSK при воздействии различного вида и уровнях помех.

Ключевые слова: методы передачи данных, цифровая связь, мобильные системы, частотное уплотнение.

При построении систем связи с подвижными объектами всегда стремятся использовать радиосигналы с возможно меньшей шириной спектра. Дефицит частотных полос, выделяемых на ту или иную систему радиосвязи, накладывает ограничения на ширину спектра частот, используемых в системе. Канальные сигналы занимают слишком большую ширину полосы, что для исключения интерференционного влияния на соседние каналы требует введения так называемых заградительных полос и это не позволяет реализовывать потенциально достижимую скорость передачи. Разработчики всегда стремились минимизировать ширину спектра радиосигнала в канале с целью разместить в выделенной полосе как можно больше радиоканалов.

В настоящее время в системах мобильной связи стандарта GSM используется Гауссовская двухпозиционная частотная манипуляция с минимальным сдвигом (GMSK – Gaussian Minimum Shift Keying). Гауссовская манипуляция обладает двумя особенностями, одна из которых – "минимальный сдвиг", другая – гауссовская фильтрация. Обе особенности направлены на сужение полосы частот, занимаемой GMSK-сигналом. Однако, при передаче GMSK-сигнала существует высокая вероятность ошибочного приема передаваемой информации. Двоичная фазовая манипуляция (BPSK) лишена этого недостатка, но при этом приходится платить достаточно широкой полосой радиочастот.

Разработка метода синтеза сигналов конечной длительности, оптимальных в смысле максимальной концентрации энергий в заданных частотных интервалах, является актуальной задачей. Именно в такой постановке проблема формирования канальных сигналов и рассматривается в данной работе.

Математическая формулировка проблемы формирования оптимальных канальных сигналов имеет вид

$$P_V = \int_{v \in V} |X(v)|^2 dv = \max \quad (1)$$

при условии

$$\|\vec{x}_N\|^2 = \sum_{i=1}^N x_i^2 = c^2, \quad (2)$$

где $\vec{x}_N = (x_1, \dots, x_N)^T$ – вектор, компоненты которого являются искомыми отсчетами канального сигнала; подынтегральная функция является квадратом модуля трансформанты Фурье

$$X(v) = \sum_{k=1}^N x_k \exp(jv(k-1)); \quad (3)$$



V – заданный частотный интервал

$$V = [-v_2, -v_1) \cup [v_1, v_2), \tag{4}$$

границы которого удовлетворяют условию $0 \leq v_1 < v_2 \leq \pi$.

При этом, как известно, справедливо представление для компонент рассматриваемого вектора на основе трансформанты Фурье

$$x_i = \int_{-\pi}^{\pi} X(v) \exp(-jv(i-1)) dv / 2\pi, i = 1, \dots, N. \tag{5}$$

Квадрат модуля правой части представления (5) характеризует распределение энергии сигнала по оси частот, при этом имеет место равенство Парсевала

$$\|\vec{x}\|^2 = \int_{-\pi}^{\pi} |X(v)|^2 dv / 2\pi = \sum_{k=1}^N x_k^2. \tag{6}$$

Может показаться, что для вычисления значения P_V необходимо определить модуль трансформанты Фурье во всех точках используемого частотного интервала, чтобы затем выполнить интегрирование. Однако это не так, что легко показать, подставив в правую часть определения (1) представление (5) и выполнив несложные преобразования.

В результате нетрудно получить представление

$$P_V = \vec{x}' A \vec{x}, \tag{7}$$

которое, позволяет вычислить искомую долю энергии вектора конечной размерности в заданном частотном интервале без предварительного вычисления трансформанты Фурье.

Здесь A – квадратная, симметричная субполосная матрица с элементами

$$A = \{a_{ik}\}, i, k = 1, \dots, N, \tag{8}$$

$$a_{ik} = \int_{v \in V} \exp[-jv(i-k)] dv / 2\pi, j = \sqrt{-1}. \tag{9}$$

Отсюда и из определения (4) следует окончательное выражение для искомых элементов матрицы в представлении (8)

$$a_{ik} = \{\sin[v_2(i-k)] - \sin[v_1(i-k)]\} / [\pi(i-k)], i \neq k; \tag{10}$$

$$a_{ik} = (v_2 - v_1) / \pi, i = k.$$

Забегая вперёд, отметим, что матрицы с такими элементами возникают и при рассмотрении проблемы полосовой оптимальной фильтрации. Поэтому представляется уместным именовать их субполосными матрицами, подразумевая соответствие выбранному частотному интервалу.

Исходя из выражения (8) условие вариационной задачи (1) можно представить в виде

$$\vec{x}'^T A \vec{x} - \lambda \|\vec{x}\|^2 = \max. \tag{11}$$

Для достижения поставленной задачи (11) или (1) необходимо выполнение условия

$$\lambda \vec{x} = A \vec{x}. \tag{12}$$

Тем самым, помножив обе части выражения (12) на \vec{x}'^T мы получаем выражение

$$\vec{x}'^T \lambda \vec{x} = \vec{x}'^T A \vec{x},$$

$$\vec{x}'^T \vec{x} = c^2,$$

$$\lambda c^2 = \vec{x}'^T A \vec{x} = \max \tag{13}$$



Таким образом, из равенства следует, для достижения условия поставленной вариационной задачи (1), необходимо чтобы значение λ было максимальным или близким к максимальному значению.

Поскольку, матрица с элементами (10) является положительно определённой, и в силу симметричности обладают полным набором ортогональных собственных векторов, удовлетворяющих условиям

$$\lambda_i \vec{q}_i = A \vec{q}_i \quad (14)$$

где для определённости предполагается, что собственные числа упорядочены по убыванию и обладают следующими свойствами

$$\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_N > 0; \quad (15)$$

$$\|\vec{q}_i\|^2 = \sum_{k=1}^N q_{ki}^2 = 1; \quad (16)$$

$$(\vec{q}_k, \vec{q}_i) = \sum_{r=1}^N q_{ri} q_{rk} = 0, i \neq k.$$

Исходя из условия (16) значения собственных чисел соответствующих собственных векторов не превышают единицу, поскольку

$$\lambda_i = \frac{1}{2\pi} \int_{w \in V} |Q_i(w)|^2 dw \leq \sum_{k=1}^N q_{ik}^2 \quad (17)$$

$$Q_i = \sum_{k=1}^N q_{ik} e^{-jw(k-1)} \quad (18)$$

Таким образом, из условия (17) следует, что собственные векторы, энергия которых максимально сосредоточена в заданной полосе, обладают соответствующими собственными числами, значения которых равны или близки к единице.

Суть метода состоит в формировании канального сигнала на основе собственных векторов с определенными коэффициентами, которыми являются информационные биты исходного сигнала. Последовательность бит должна иметь биполярный вид. Такой вид исходной последовательности исключает возможность потери собственного вектора при перемножении на нулевой коэффициент.

Для формирования оптимального канального сигнала, прежде всего, следует вычислить элементы субполосной матрицы A для заданного частотного интервала по формуле (10).

Количество собственных чисел близких или равных единице определяют сколько собственных векторов удовлетворяют условию по оптимальному занятию выделенной полосы частот, тем самым можно определить количество бит J , которые можно передать в выбранной последовательности, при том что один бит соответствует одному собственному вектору.

Формируем матрицу $Q_1 = \{\vec{q}_1, \vec{q}_2, \dots, \vec{q}_J\}$ размерностью $[N \times J]$, состоящую из собственных векторов \vec{q} , соответствующие собственные числа которых близки или равны единице.

Пусть задан информационный вектор размерностью J , в виде последовательности бит, который подлежит передаче по каналу связи в частотном интервале вида (2) с использованием канального дискретного сигнала (вектора).

$$\vec{e} = (e_1, \dots, e_J)' \quad (19)$$

Вектор \vec{e} представляет собой набор двоичных значений, принимающих значения 1 либо -1.

Формирования канального сигнала осуществляется по формуле

$$\vec{x} = Q_1 \cdot \vec{e} = (\vec{q}_1, \vec{q}_2, \dots, \vec{q}_J) \cdot \vec{e} = \sum_{i=1}^J e_i \vec{q}_i. \tag{20}$$

Поскольку собственные вектора ортогональны то, сформированный канальный сигнал обладает хорошей помехоустойчивостью, сравнимой с помехоустойчивостью канального сигнала сформированного с использование фазовой модуляции.

Свойство ортогональности собственных векторов позволяет записать равенство

$$Q \cdot Q^T = 1. \tag{21}$$

На приемной стороне регистрируются N значений, и осуществляется перемножение на заранее известную транспонированную матрицу собственных векторов Q и исходя из условия (16) можно восстановить переданный информационный вектор.

$$\vec{e} = Q^T \cdot \vec{x} = Q^T \cdot Q \cdot \vec{e} = 1 \cdot \vec{e},$$

где \vec{e} восстановленный информационный вектор.

Таким образом, имея идеальный канал связи, т.е. передача канального сигнала осуществляется без искажений и помех, восстановленный вектор будет совпадать с первоначальным.

Если, $\hat{x} = \vec{x} + \vec{\varepsilon}$, где $\vec{\varepsilon}$ - помехи в канале связи, то необходимо использовать решающую процедуру отнесения символа e_i к 1 или к 0, на основе скалярных произведений $\hat{e}_i = e_i + (\vec{\varepsilon}_i \vec{q}_i)$.

Решающее устройство с порогом $h=0$, принимает решение о наличии логической единицы, если $\hat{e}_i > 0, i=1...J$ или логического нуля, если $\hat{e}_i < 0, i=1...J$, таким образом восстанавливая исходный информационный вектор. Безопасность передачи информации обеспечивается за счет перестановок собственных векторов перед формированием канального сигнала, что потребует знание точного расположения переставленных собственных векторов при восстановлении данных на приемной стороне, ключом данного метода защиты будет являться карта точного расположения собственных векторов.

Вычислительные эксперименты для оценивания помехоустойчивости и доли энергии за пределами заданного частотного диапазона выполнялись с помощью математического пакета MatLab и встроенного пакета Simulink для построения моделей в реальном масштабе времени. Общий вид модели по формированию канальных сигналов представлен на рис 1.

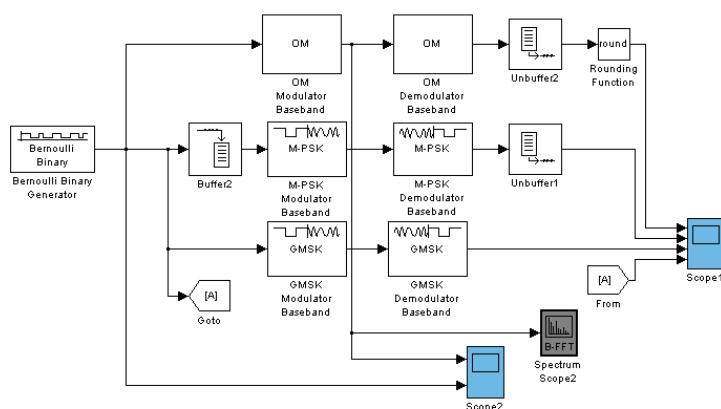


Рис. 1. Модель формирования канальных сигналов в режиме реального времени

Основными критериями определения эффективности метода передачи были установлены: просачивание энергии за пределы полосы частот, которая выделяется



для передачи сформированного сигнала, помехоустойчивость (вероятность ошибочно принятой информации при различном уровне помех) и скорость передачи (количество информационных бит переданных в единицу времени).

Для сравнительных исследований с оптимальным канальным сигналом были выбраны два вида манипуляции наиболее помехоустойчивая и с минимальной занимаемой полосой частот:

– GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying) – это гауссовская двухпозиционная частотная манипуляция с минимальным сдвигом, обладающая двумя особенностями, одна из которых – "минимальный сдвиг", другая – гауссовская фильтрация. Обе особенности направлены на сужение полосы частот, занимаемой GMSK-сигналом;

– BPSK (Binary Phase-Shift Keying) – скачкообразное переключение фазы синусоидального сигнала на 180° при неизменной амплитуде, при этом фазе 0° ставится в соответствие логический ноль, а 180° логическая единица.

Для проведения вычислительных экспериментов в модели задается произвольная последовательность бит длительностью τ_0 (по стандарту GSM $\tau_0 = 3.36 \cdot 10^{-6}$ с), формируются собственные вектора и на их основе формируются оптимальный канальный сигнал. Канальные сигналы GMSK и BPSK формируются с помощью модуляторов, входящих в состав пакета Simulink. Канальные сигналы подвергаются воздействию различного вида помех:

- белый шум,
- частотно-селективные помехи,
- импульсные помехи.

На приемной стороне восстанавливается передаваемая битовая информация соответствующими методами и вычисляется вероятность возникновения ошибок в передаваемой информации по следующей формуле:

$$P = \frac{J_{\text{ош}}}{J}, \quad (22)$$

где $J_{\text{ош}}$ – количество неверно принятых бит на протяжении всего времени передачи; J – количество всего передаваемых бит.

В табл. 1 приведены результаты экспериментов по расчету доли энергии в заданном интервале частот для различных методов формирования канальных сигналов.

Таблица 1

Доля энергии за пределами частотного диапазона различных методов передачи

Оптимальный канальный сигнал	0,001673
GMSK	0,043116
BPSK	0,360282

Как видно из таблицы оптимальный канальный сигнал в 25 раз имеет меньшую долю энергии в заданной полосе частот (200 кГц) по сравнению с наиболее узкополосным сигналом известным на сегодняшний день. При этом информационная и техническая скорость сравниваемых методов остаются одинаковыми (1 бит=1 бод). Если сформировать канальный сигнал с долей энергии за пределами полосы около 1% – 4% то станет возможным увеличить скорость передачи в 1,5 раза (1,5 бит = 1 бод), не теряя при этом в помехоустойчивости.

Оценивание помехоустойчивости моделируемых методов на воздействие белого шума осуществлялось следующим образом: выбирались различные уровни энергии белого шума по отношению к уровню энергии канального сигнала, на приемной стороне проводилась демодуляция и сравнение с исходной передаваемой информацией.

В табл. 2 приведены результаты эксперимента по проверке помехоустойчивости моделируемых методов, при различных соотношениях шум/сигнал.

Таблица 2

Вероятность ошибки при различных уровнях белого шума

Шум/Сигнал	Оптимальный метод	BPSK
10	0,32546	0,32589
4	0,13346	0,13225
2	0,01306	0,01267
1,33	0,00041	0,00045
1	3,75e-006	3,75e-006
0,5	0	0

Как видно из таблицы вероятность правильного приема при передаче информации оптимальным методом сравнима с двоичной фазовой манипуляцией, которая обладает наиболее высокой помехоустойчивостью среди существующих методов. Высокая помехоустойчивость оптимального метода обуславливается тем, что при умножении собственного вектора на отрицательный коэффициент фаза этого собственного вектора меняется на противоположную.

На рис. 2 представлен результат вычислительных экспериментов проверки помехоустойчивости при воздействии частотно-селективных помех различной мощности, вся энергия помехи расположена в частотном диапазоне в котором передаются каналные сигналы.

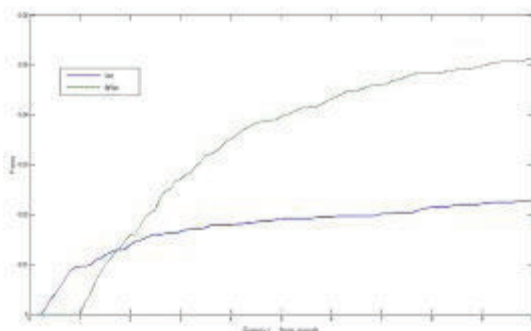


Рис. 2. Вероятность появления ошибочных бит при изменении энергии частотно-селективной помехи

Как видно из графиков при увеличении энергии частотной помехи уровень возникновения ошибочных бит у оптимального канального сигнала изменяется незначительно. Это объясняется тем, что помеха воздействует на один собственный вектор, и на соседние вектора, которые несут информацию, не затрагивая при этом собственные вектора расположенные в другой части частотного диапазона.

На рис. 3 представлен результат вычислительных экспериментов проверки помехоустойчивости при воздействии импульсных помех при различной вероятности возникновения импульсных помех.

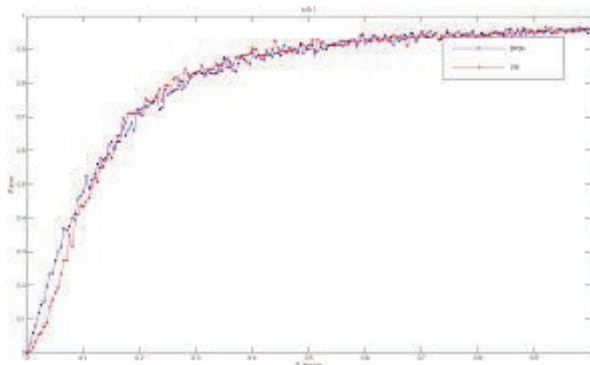


Рис. 3. Вероятность появления ошибочных бит при изменении вероятности появления импульсных помех



Из рисунка видно, что помехоустойчивость оптимального канального сигнала и помехоустойчивость канального сигнала двоичной фазовой манипуляции сравнимы, как и в случае воздействия помех в виде белого шума.

Таким образом, разработанный метод позволяет существенно повысить эффективность использования частотных ресурсов путем минимизации доли энергии за пределами заданного частотного интервала, при этом существенно понизить интерференцию между соседними каналами. Кроме того, сформированный канальный сигнал обладает помехоустойчивостью сравнимой с наиболее помехоустойчивой двоичной фазовой манипуляцией, без потерь в скорости передачи информации, и даже обладает преимуществами при различных уровнях помех, не теряя при этом скорости передачи полезной информации.

Литература

1. Ануфриев И.Е., Смирнов А.Б., Смирнова Е.И. МАТЛАВ 7. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 1104 с.
2. Жилияков Е.Г. Вариационные методы анализа и построения функций по эмпирическим данным: моногр. / Е.Г. Жилияков. – Белгород: Изд-во БелГУ, 2007. – 160 с.
3. Кузнецов М.А. GPRS – технология пакетной передачи данных в сетях GSM / Кузнецов М.А., Абатуров П.С., Никодимов И.Ю., Певцов Н.В., Рыжков А.Е., Сиверс М.А.. СПб: Судостроение, 2002. – 144 с.
4. Сюваткин В.С. WiMAX – технология беспроводной связи: теоретические основы, стандарты, применение / В.С. Сюваткин, В.И. Есипенко, И.П.Коваль, В.Г. Сухоревров // под ред. д.т.н., проф, Крылова В.В. : БХВ- Петербург, 2005. – 354 с.
5. Рабинер, Л.Р. Цифровая обработка речевых сигналов [Текст]: Пер. с англ. / Рабинер Л.Р., Шафер Р.В.; под ред. Назарова М.В., Прохорова Ю.Н. – М.: Радио и связь 1981. – 495 с.

Научно-исследовательская работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы. (ГК П2038 от 2 ноября 2009 г.)

RESEARCH OF THE METHOD FORMATION OPTIMAL CHANNEL SIGNALS FOR MOBILE COMMUNICATION SYSTEMS

D. V. URSOL

Belgorod State University

This article describes a new method of formation channel signals which have a high level of noise immunity and have a maximum concentration of energy at a given frequency range. Researches to noise stabilities it is spent between the developed method and BPSK at effect of various types and noise levels.

Key words: methods of data transmission, digital communications, mobile systems, frequency-division multiplexing.