

Применение четырехмерных ансамблей сигналов для улучшения энергоэффективности систем СВЯЗИ

Л. А. Антюфриева

Московский физико-технический институт (государственный университет)¹
antyufrieva@phystech.edu

Аннотация. Рассматривается проблема энергетической эффективности систем связи. Анализируются методы построения оптимальных многомерных ансамблей сигналов на примере четырех измерений.

Ключевые слова: цифровая оюработка сигналов, энергетическая эффективность систем связи, предел Шеннона, многомерный ансамбль сигналов, проектирование систем связи.

I. ВВЕДЕНИЕ

Важным аспектом проектирования систем связи является обеспечение наименьшего энергетического потенциала линии. Это связано с необходимостью ограничения мощности радиочастотного излучения и уменьшения помех для других систем. Улучшение энергетической эффективности системы позволяет увеличить скорость и надежность передачи данных, а значит и пропускную способность канала, при сохранении мощности передатчика.

II. МНОГОМЕРНЫЕ АНСАМБЛИ СИГНАЛОВ

В фундаментальной работе Шеннона [1] определена предельная пропускная способность линии связи

$$R_f = \log_2(1 + SNR), \quad (1)$$

где R_f – предельная удельная скорость передачи сообщения, SNR – соотношение сигнал/шум на входе демодулятора. При выводе формулы (1) используется идея представления сложного сигнала в виде точки в многомерном пространстве. В более поздней его работе [2] заложены основы концепции многомерных поверхностно-и объемно-сферических ансамблей (созвездий) сигналов, развитой в ряде статей и монографии [3, 4, 5].

Определим $\{\vec{c}_1, \vec{c}_2, \dots, \vec{c}_M\}$ – набор N -мерных векторов, характеризующих сигнальные точки ансамбля сигналов, $d_{jk} = \|\vec{c}_j - \vec{c}_k\|$ – расстояние между

сигнальными точками. $d_{\min} = \min_{j \neq k} (d_{jk})$, $1 \leq j, k \leq M$ – минимальное расстояние между сигнальными точками. Средняя энергия символа E_s определяется

$$\text{выражением } E_s = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \|\vec{c}_k\|^2.$$

В работе [6] задача построения энергетически оптимального ансамбля сигналов сводится к задаче уменьшения средней энергии символа при сохранении минимального расстояния между сигнальными точками, которая в свою очередь сводится к задаче поиска наиболее плотной упаковки N -мерных сфер. Для демонстрации эффективности в статье используется зависимость вероятности ошибочного приема символа от соотношения сигнал/шум на один бит передаваемой информации. Это не отражает возможности сокращения числа ошибок на один бит, связанной с применением кода Грея.

Ансамбли сигналов с размерностью $N > 2$ используются в оптических каналах связи, где существует возможность разложения сигнала на 4 составляющие за счет поляризации [6, 7]. Нет принципиального запрета использования многомерных ансамблей сигналов в стандартных радиоканалах. Для построения таких ансамблей возможно объединение нескольких I-Q созвездий ортогональных по времени или частоте. Недостатком использования таких многомерных ансамблей является необходимость экспоненциального увеличения количества сигнальных точек для сохранения удельной скорости передачи сообщения (2). Поэтому ограничимся рассмотрением $N = 2$ и $N = 4$.

$$R_f = \frac{2}{N} \log_2 M \quad (2)$$

III. ДВУМЕРНЫЕ И ЧЕТЫРЕХМЕРНЫЕ АНСАМБЛИ СИГНАЛОВ

Для сравнения ансамблей сигналов проведено моделирование, в котором выполнен расчет вероятности ошибочного приема бита информации (BER) от

соотношения сигнал/шум на один бит информации в канале с аддитивным белым гауссовским шумом.

А. Гиперкубический ансамбль сигналов

Любой N -мерный гиперкубический ансамбль сигналов является линейной комбинацией двумерных ансамблей квадратурно-фазовой модуляции и совпадает с двумерным по энергоэффективности [6]. То же самое распространяется на линейные комбинации ансамбля квадратурно-амплитудной модуляции. Отличительной особенностью подобных ансамблей является возможность применения кода Грея для уменьшения числа битовых ошибок. Для сравнения с четырехмерными ансамблями выбраны двумерные QPSK и 16-QAM с применением кода Грея.

В. Плотная упаковка N -мерных сфер

В качестве алгоритма поиска наиболее плотной упаковки N -мерных сфер используют перебор конфигураций, полученных при моделировании притяжения случайного расположения M N -мерных сфер одинакового радиуса [6]. Лучший известный четырехмерный ансамбль сигналов с $M = 16$ (3) [6] соответствует удельной скорости передачи QPSK. В данном ансамбле сигналов код Грея неприменим.

$$c_{4,16} = \{(a + \sqrt{2}, 0, 0, 0), (a, \pm\sqrt{2}, 0, 0), (a, 0, \pm\sqrt{2}, 0), (a, 0, 0, \pm\sqrt{2}), (a - c, \pm 1, \pm 1, \pm 1), (a - c - 1, 0, 0, 0)\} \quad (3)$$

где $a = (1 + \sqrt{2} + 9c)/16$, $c = \sqrt{2\sqrt{2} - 1}$.

С. Поверхностно-сферический ансамбль сигналов

В качестве поверхностно-сферического ансамбля сигналов взят 4-мерный ансамбль $M = 256$ (соответствует удельной скорости передачи 16-QAM), рассчитанный в монографии [5]. Недостатком поверхностно-сферических ансамблей сигналов является то, что они становятся энергоэффективными только при больших N , когда основная часть объема многомерной сферы концентрируется у поверхности, а также невозможность применения кода Грея.

Д. Результаты моделирования

Результаты моделирования зависимости вероятности ошибки на бит сигнала от соотношения энергии бита к энергии шума представлены на рис. 1. При большом отношении E_b/N_0 ансамбль $c_{4,16}$ дает меньшее количество ошибок, чем QPSK. Выигрыш QPSK при низком E_b/N_0 связан с применением кода Грея. Из данных приведенных в статье [8] следует, что применение

данного ансамбля сигналов может дать энергетический выигрыш при высоких скоростях помехоустойчивого кода и высоком соотношении сигнал/шум.

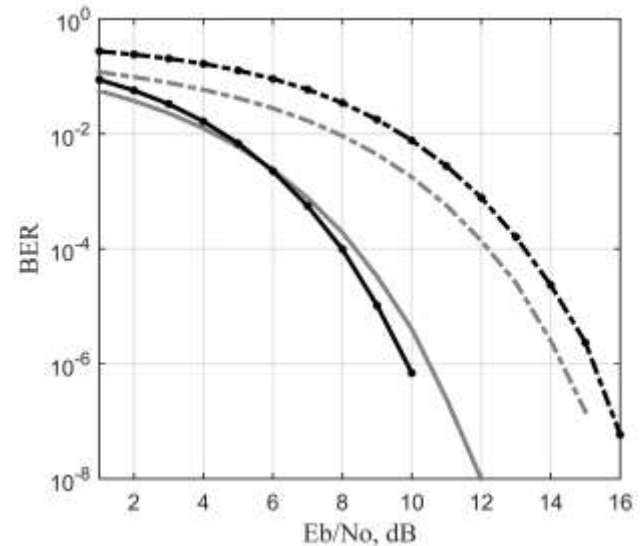


Рис. 1. Зависимость вероятности ошибки на бит сигнала от соотношения энергии бита к энергии шума. Черная сплошная линия – плотная упаковка 4-мерных сфер $c_{4,16}$. Серая сплошная – QPSK. Серая точка-тире – 16-QAM. Черная точка-тире – 4-мерный поверхностно-сферический ансамбль сигналов $M = 256$.

Поверхностно-сферический ансамбль сигналов существенно проигрывает 16-QAM, так как четырех измерений недостаточно для получения энергетической выгоды.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты моделирования демонстрируют возможность применения ансамблей сигналов, построенных на основе плотной упаковки 4-мерных сфер с высоким соотношением сигнал/шум. В дальнейшем планируется добавление помехоустойчивого кодирования и использование неравномерных созвездий сигналов.

ВЫРАЖЕНИЕ ПРИЗНАТЕЛЬНОСТИ

Выражаю благодарность Марку Ароновичу Быховскому за предоставленные материалы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Shannon C. Communication in the presence of noise, Proc. IRE, № 1, 1949. (Перевод на русский язык статьи «Связь при наличии шума», опубликована в книге Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. М.: Из-во иностранной литературы/под ред. Р.Л. Добрушина и О.Б. Лупанова, 1963).
- [2] Shannon C. Probability of error for optimal codes in Gaussian channel. Bell System Techn. J., May, 1959. (Перевод на русский язык статьи «Вероятность ошибки для оптимальных кодов в гауссовском канале», опубликована в книге Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. М.: Из-во иностранной литературы/Под ред. Р.Л. Добрушина и О.Б. Лупанова, 1963).

- [3] Быховский М.А. Помехоустойчивость приема оптимальных сигналов, расположенных на поверхности N-мерного шара // Электросвязь №3, 2016.
- [4] Быховский М.А. Теоретические основы проектирования систем связи с высокой энергетической эффективностью // Цифровая обработка сигналов, №2, 2017.
- [5] Быховский М.А. Гиперфазовая модуляция – оптимальный метод передачи сообщений в гауссовских каналах связи. М.: Техносфера, 2018, 310 с.
- [6] Karlsson M., Agrell E. Four-dimensional optimized constellations for coherent optical transmission systems, 36th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC), 2010.
- [7] Karlsson M., Agrell E. Power-efficient modulation formats in coherent transmission systems, Journal of Lightwave Technology (Volume: 27, Issue: 22, Nov.15, 2009).
- [8] Tahir B., Schwarz S., BER comparison between Convolutional, Turbo, LDPC, and Polar codes, 24th International Conference on Telecommunications (ICT), 2017.