

# **АНАЛИЗ И СРАВНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ДЕМОДУЛЯЦИИ**

Ковалов А. И., студент кафедры Инфокоммуникационные технологии и системы связи СПбГУАП, [akovalov@vu.spb.ru](mailto:akovalov@vu.spb.ru)

## **Аннотация**

В данной статье рассматриваются алгоритмы демодуляции сигнала с точки зрения алгоритмической сложности и качества обработки сигнала на сигнальных созвездиях QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM. Статья несёт обзорный характер и не предлагает новых алгоритмов или подходов, однако позволяет оценить и сравнить ряд алгоритмов.

## **Введение**

На сегодняшний день беспроводные технологии плотно проникли в повседневную жизнь. Невозможно представить современную технику, различного уровня, без определённой системы связи: начиная от специализированной и бытовой техники, заканчивая носимыми устройствами.

В связи с важностью систем беспроводной связи, к подобным решениям предъявляется ряд серьёзных требований, главными из которых являются: стоимость решения, энергопотребление и качество обработки сигнала.

Качество обработки сигнала, в свою очередь, напрямую зависит от используемых подходов, а один из основных алгоритмов беспроводного приёмника — алгоритм демодуляции, определяющий качество и сложность обработки сигнала.

В статье произведён обзор и сравнение различных методов демодуляции сигнала на сигнальных созвездиях QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM.

## **Общая модель системы**

Упрощённая схема системы цифровой связи изображена на рисунке 1. На передающей стороне, сигнал (поток бит) последовательно проходит через следующие блоки: кодер канала, модулятор (Modulation symbol mapper, Digital up converter). На приёмной стороне: демодулятор (Digital down converter, Modulation symbol de-mapper), декодер канала.

Для простоты моделирования и наглядности результатов, в работе используется упрощённая схема приёмопередатчи с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ) [1], а сигнал представлен в комплексной форме ( $y_I/y_Q$  — мнимая/действительная компоненты, соответственно).

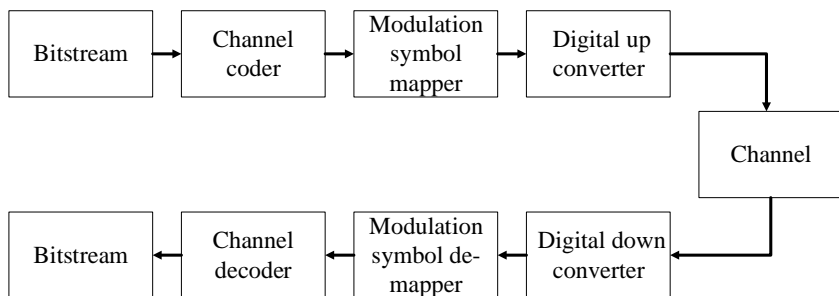


Рис. 1: Упрощённая схема системы цифровой связи

## Общая задача блока демодуляции

Функция демодулятора — расчёт функции логарифма отношения правдоподобия (LLR) для каждого бита принятого сигнала, далее, для  $i$ -го бита, записывается, как  $\lambda_i$ :

$$\lambda_i = \ln \left( \frac{Pr\{b_i = 1|r\}}{Pr\{b_i = 0|r\}} \right), \quad (1)$$

где  $r$  — принятый сигнал, а  $b_i$  —  $i$ -й бит переданного сообщения.

## Демодулятор по минимуму расстояния (под-оптимальный алгоритм)

Общее выражение (1), можно оценить следующим образом [2]:

$$\ln \left( \frac{Pr\{b_i = 1|r\}}{Pr\{b_i = 0|r\}} \right) \approx \frac{1}{\sigma^2} (d_{i,0}^2 - d_{i,1}^2),$$

где  $d_{i,j}$  — Евклидово расстояние от принятого сигнала на модуляционном созвездии до ближайшей точки с  $i$ -м битом, равным нулю или единице, соответственно.

Таким образом, в алгоритме по минимуму расстояния, LLR  $i$ -го бита вычисляется как:

$$\lambda_i = \frac{1}{\sigma^2} (d_{i,0}^2 - d_{i,1}^2). \quad (2)$$

## Демодулятор по минимуму расстояния для созвездий QAM

Для квадратурно-амплитудной модуляции существует упрощённый метод вычисления выражения 2 [3]:

$$\lambda_i = S \cdot D_i, \quad (3)$$

где  $S$  — масштабирующий коэффициент, зависящий от используемого созвездия,  $D$  — функция от принятого сигнала,  $i$  — номер бита в отображении битовой последовательности в модуляционный символ [4].

Пример расчёта для созвездия 16QAM:

$$\begin{aligned} K &= \frac{2}{\sqrt{10}}\beta, S = -2 \cdot \frac{1}{\sigma^2} \cdot K; \\ D_0 &= \begin{cases} y_I & |y_I| \leq K, \\ 2y_I - K & y_I > K, \\ 2y_I + K & y_I < -K; \end{cases} \\ D_1 &= \begin{cases} y_Q & |y_Q| \leq K, \\ 2y_Q - K & y_Q > K, \\ 2y_Q + K & y_Q < -K; \end{cases} \\ D_2 &= -|y_I| + K; \\ D_3 &= -|y_Q| + K, \end{aligned}$$

где  $K$  — параметр, задаваемый сигнальным созвездием,  $\sigma^2$  — общая энергия шума,  $\beta$  — коэффициент масштабирования принятого сигнала.

## Демодулятор порогового решения

Алгоритм демодуляции, описанный в предыдущем разделе, может быть аппроксимирован для QAM-схем, путём изменения расчёта функции  $D_i$  [5].

Пример расчёт для созвездия 16QAM:

$$\begin{aligned} K &= \frac{2}{\sqrt{10}}\beta, S = -\frac{1}{\sigma^2}; \\ D_0 &= y_I; \\ D_1 &= y_Q; \\ D_2 &= K - |y_I|; \\ D_3 &= K - |y_Q|. \end{aligned}$$

## Результаты моделирования

На рисунке 2 приведены результаты моделирования: вероятность ошибки на блок, для рассматриваемых алгоритмов.

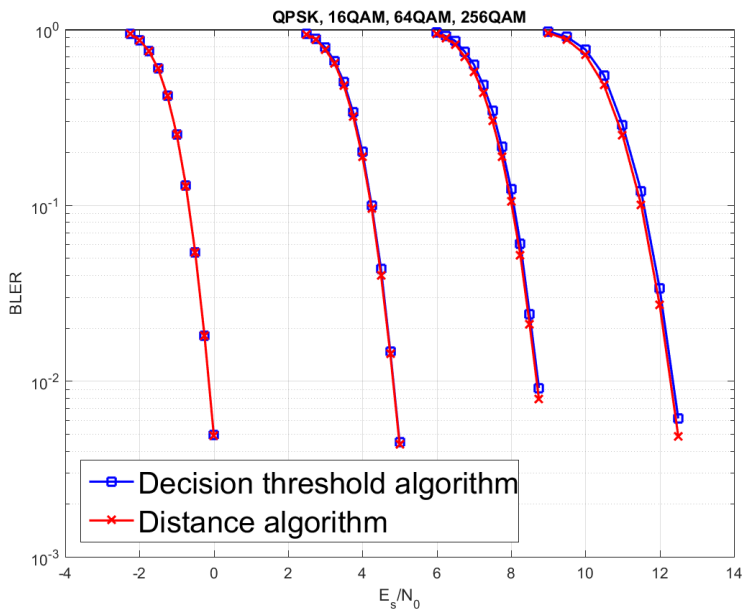


Рис. 2: Результаты моделирования с 8-ю итерациями Турбо-декодера, скоростью кода 1/3 и длиной блока 192 на сигнальных созвездиях: QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM

На рисунке 2 представлены результаты моделирования рассмотренных алгоритмов. На уровне вероятности ошибки  $10^{-2}$  демодулятор порогового решения проигрывает демодулятору по минимуму расстояний не больше 0.1 Дб, таблица 1.

Таблица 1: Таблица разницы качества обработки сигнала алгоритмом порогового принятия решений от алгоритма по минимуму расстояний при вероятности ошибки  $10^{-2}$

Созвездие	QPSK	16QAM	64QAM	256QAM
Разница, дБ	0	~ 0,02	~ 0,05	~ 0,1

С увеличением размерности сигнального созвездия, алгоритм порогового принятия решения начинает показывать значительную разницу в вероятности ошибки на блок ( $\sim 0,1$  дБ на созвездии 256QAM), по сравнению с демодулятором по минимуму расстояний.

## Результаты сравнения алгоритмов

Сложность алгоритмов приведена в базовых математических операциях: умножение ("\*"), сложение/вычитание ("+", "-") и взятие по модулю числа ("abs").

В таблице 2 под следующими колонками приведены результаты для соответствующих алгоритмов:

- A1 — демодулятор по минимуму расстояний. Расчёт по формуле 2;
- A1 — демодулятор по минимуму расстояний для созвездия QAM. Расчёт по формуле 3;
- A1 — алгоритм порогового принятия решения.

Из результатов, приведённых в таблице 2, можно видеть, что наименьшую сложность имеет алгоритм порогового решения. Использование свойств отображения битовых последовательностей на символы квадратурно-амплитудной модуляции позволяют значительно упростить реализацию демодулятора по минимуму расстояний.

## Заключение

В данной статье были рассмотрены следующие алгоритмы демодуляции сигнала: алгоритм по минимуму расстояния при помощи выражений 2 и 3 и алгоритм порогового принятия решений. Было приведено описание каждого из алгоритмов и подсчитана алгоритмическая сложность. Кроме того, было произведено сравнение качества обработки сигнала на сигнальных созвездиях QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM, из которого следует:

- расчёты по формулам 2 и 3 показывают одинаковые результаты по качеству обработки сигнала, однако вычисление 3 обладает меньшей сложностью, таблица 2;

Таблица 2: Таблица сложности демодуляторов по операциям

Созвездие	Операции	A1	A2	A3
QPSK	<, >	4	0	0
	+, -	11	1	0
	*	8	4	2
	abs	0	0	0
16QAM	<, >	10	4	0
	+, -	19	6	2
	*	14	6	4
	abs	0	2	2
64QAM	<, >	20	14	0
	+, -	27	17	6
	*	20	8	6
	abs	0	2	4
256QAM	<, >	38	30	0
	+, -	35	24	8
	*	26	10	8
	abs	0	2	6

- для сигнального созвездия QPSK все алгоритмы показали одинаковый результат по качеству обработки сигнала, и с учётом сложности алгоритмов, алгоритм порогового принятия решения является оптимальным выбором для QPSK созвездия;
- не смотря на выигрыш в производительности, алгоритм порогового принятия решений начинает отставать в качестве обработки сигнала при увеличении размерности сигнального созвездия, таблица 1.

## Литература

- [1] Трофимов А. Н. Методы передачи дискретных сообщений. // СПбГУАП. — 2010.
- [2] Mahmoudi R., Iniewski K. Low power emerging wireless technologies. — CRC Press, 2013.

- [3] Ali I., Wasenmüller U., Wehn N. A high throughput architecture for a low complexity soft-output demapping algorithm // *Advances in Radio Science*. — 2015. — T. 13. — №. C. — C. 73-80.
- [4] Kim K. S. et al. General log-likelihood ratio expression and its implementation algorithm for Gray-Coded QAM signals // *ETRI journal*. — 2006. — T. 28. — №. 3. — C. 291-300.
- [5] Tosato F., Bisaglia P. Simplified soft-output demapper for binary interleaved COFDM with application to HIPERLAN/2 // *Communications, 2002. ICC 2002. IEEE International Conference on*. — IEEE, 2002. — T. 2. — C. 664-668.