

Помехоустойчивость оптимального посимвольного приема информационно-емких цифровых сигналов с корректирующим кодированием в полях Галуа

**д.ф.-м.н. Л.Е. Назаров
нач. управления В.В. Батанов
инженер 1-ой категории В.В. Лопатин**

**Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, г.Фрязино
АО «Информационные спутниковые системы» им. академика М.Ф. Решетнева», г. Железногорск
АО "НПП "Исток" им. Шокина", Фрязино**

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы:

Обеспечение высоких информационных скоростей передачи при разработке спутниковых систем связи при ограниченной частотной полосе радиоканала достигается путем использования цифровых сигналов с увеличением их частотной эффективности (информационно-емкие сигналы)

Частотно-эффективные сигналы, интенсивно используемые в приложениях, представляются двумерными «созвездиями» с различными видами манипуляции (M -объем «созвездия»):

- фазовой (ФМ-М), квадратурно-амплитудной (КАМ-М),
- амплитудно-фазовой (APSK-М).

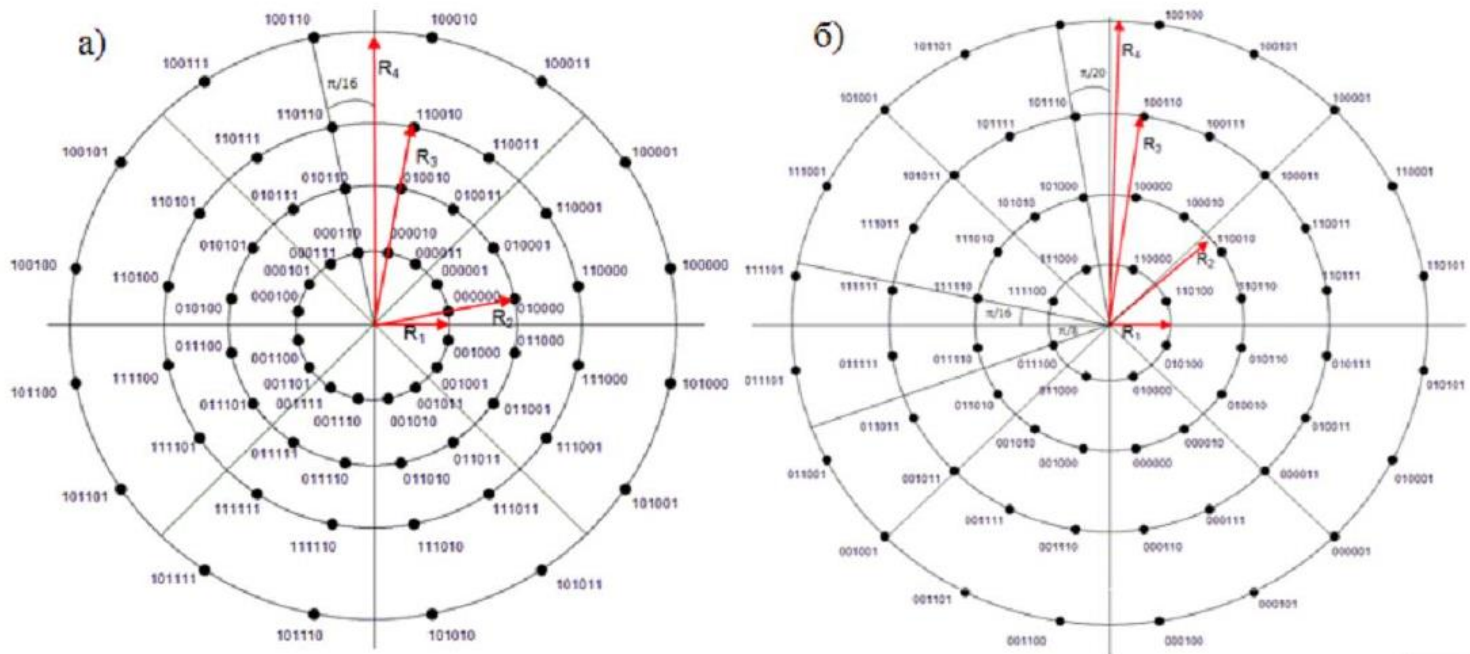
Коэффициент частотной эффективности $k = \log_2 M$ (бит/с/Гц)

Максимальная информационная скорость $R = k\Delta F$ (бит/с)

ИНФОРМАЦИОННО-ЕМКИЕ ЦИФРОВЫЕ СИГНАЛЫ

$$s(t) = \sum_i A_i U(t) \cos(2\pi f t + \varphi_i)$$

Основные классы сигнальных «созвездий», используемых в спутниковых информационных системах, определены спецификациями CCSDS, DVB-S2, DVB-S2X, 3GPP



Вид сигнальных «созвездий» 64APSK (64APSK-1, а), (64APSK-2 б)

АЛГОРИТМ ОПТИМАЛЬНОГО ПОСИМВОЛЬНОГО ПРИЕМА СИГНАЛОВ

$$\hat{a}_l = \max_{\beta \in GF(2^m)} (\Pr(b(l) = \beta | \vec{Y}))$$

Шаг 1. Спектральное преобразование в базисе $\omega_b(a)$ с размерностью 2^m над последовательностью “мягких” решений $p(y_l | b(l))$

$$C_l(r) = \sum_{b(l) \in GF(2^m)} p(y_l | b(l)) \omega_{b(l)}(r).$$

Здесь $l = 0, 1, \dots, n-1$ - номер позиции кодовых символов.

Шаг 2. Вычисляется спектральное множество $\{T_l(\lambda)\}$

$$T_l(\lambda) = \sum_{\beta \in GF(2^m)} \Pr(b(l) = \beta | \vec{Y}) \omega_\beta(\lambda), \quad \lambda \in GF(2^m).$$

Спектральное множество $\{T_l(\lambda)\}$ вычисляется с использованием $C_l(r)$ и множества кодовых слов R дуального кода C_H с параметрами $(n, n-k)$

$$T_l(\lambda) = \frac{1}{\sum_{r_p: R \in C_H} \prod_{p=0}^{n-1} C_p(r_p)} \sum_{r_p: R \in C_H} \prod_{p=0}^{n-1} C_p(r_p) \frac{C_l(\eta - \lambda)}{C_l(\eta)}.$$

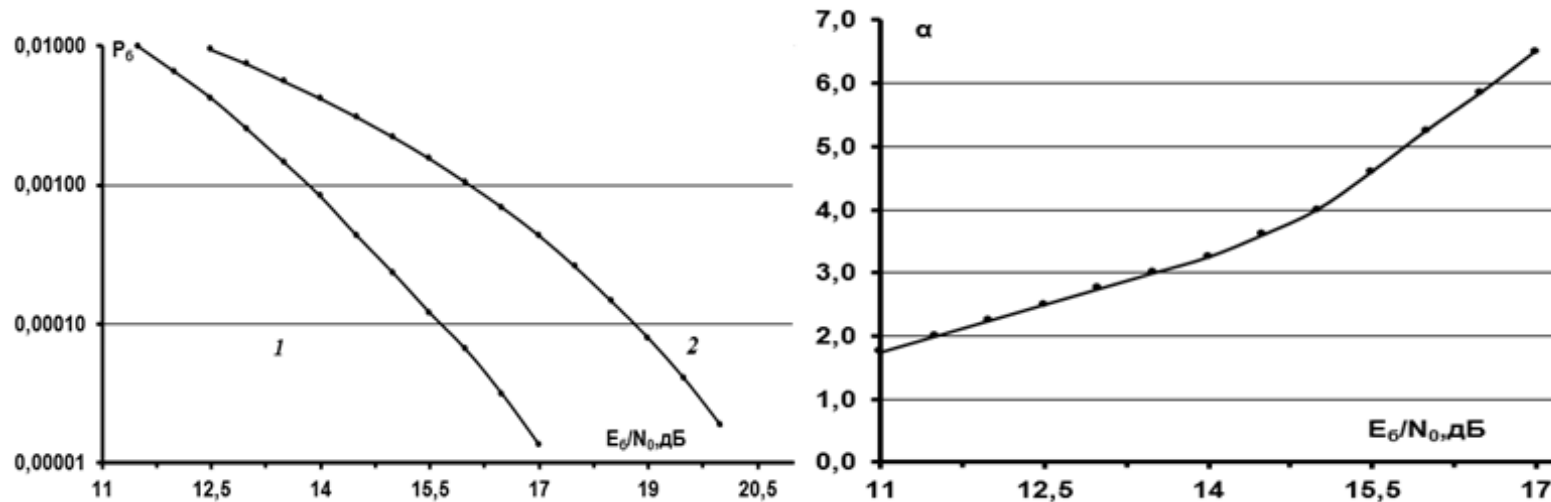
Шаг 3. Вычисляются апостериорные вероятности $\Pr(b(l) = \beta | \vec{Y})$ с использованием обратного спектрального преобразования над $T_l(\lambda)$

$$\Pr(b(l) = \beta | \vec{Y}) = \sum_{\lambda \in GF(2^m)} T_l(\lambda) \omega_\beta(\lambda).$$

АЛГОРИТМ ОПТИМАЛЬНОГО ПОСИМВОЛЬНОГО ПРИЕМА СИГНАЛОВ

Ограничивающим фактором при реализации этого алгоритма является требование высокой разрядности данных вычислений. Для упрощения этого требования предложен метод на основе нормировки (масштабирования) промежуточных вычислений $T'_i(\lambda) = T_i(\lambda)/\alpha$ при выполнении второго этапа алгоритма, α - коэффициент нормировки.

Наиболее простым является рассматриваемый алгоритм посимвольного приема для сигнальных конструкций на основе кодов с проверкой на четность.



Вероятностные характеристики приема сигналов КАМ-64 (слева, 1 – корректирующий код с обобщенной проверкой на четность; 2 – без кодирования), зависимость коэффициента нормировки от сигнал/помеха.

ВЫВОДЫ

Дано описание алгоритма оптимального посимвольного приема сигнальных конструкций на основе информационно-емких цифровых сигналов и блоковых помехоустойчивых кодов в недвоичных полях Галуа. Объем поля Галуа согласован с объемом сигнальных «созвездий». Результирующая сложность алгоритма определяется размерностью дуального кода. Ограничивающим фактором при реализации этого алгоритма является требование высокой разрядности вычислений (формат чисел double), для упрощения которого предложен метод на основе нормировки промежуточных вычислений.

Результаты моделирования алгоритма оптимального посимвольного приема для сигнальных конструкций на основе информационно-емких сигналов в сочетании с простейшим кодом (обобщенная проверка на четность) для канального шума в виде аддитивного белого гауссовского шума показывают достижение энергетического выигрыша по отношению к безизбыточной передаче до 1.5...3 дБ.

Спасибо за внимание к докладу!

1. Назаров Л. Е., Батанов В.В. Исследование помехоустойчивости оптимального посимвольного приема фазоманипулированных сигналов с корректирующими кодами в недвоичных полях Галуа. // Радиотехника и электроника. 2022. Т.67 №8. Стр. 782-787.
2. Назаров Л.Е. Исследование помехоустойчивости оптимального посимвольного приема частотно-эффективных сигналов с корректирующим кодированием в недвоичных полях Галуа. // Радиотехника и электроника. 2023. Т.68. №9. Стр.873-878.
3. ATIS 3GPP SPECIFICATION, 3GPP TS 38.211 V16.2.0 (2020-06): 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; NR; Physical channels and modulation (Release 16). Published by Alliance for Telecommunications Industry Solutions, Washington, 2020.