

**Исследование помехоустойчивости посимвольного приема информационно-емких цифровых сигналов при распространении по транссионосферным каналам с замираниями**

Л.Е. Назаров, В.В. Батанов, З.Т. Назарова

*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 141190, Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1.*

*E-mail: levnaz2018@mail.ru*

*Дано описание разработанного алгоритма посимвольного приема информационно-емких цифровых сигналов в сочетании с корректирующим кодированием в полях Галуа. Даны результаты моделирования алгоритма с целью исследования его помехоустойчивости для транссионосферных каналов с замираниями за счет рассеяния на ионосферных неоднородностях. Показано, что для этих каналов применение алгоритма посимвольного приема обеспечивает энергетический выигрыш до 24 дБ по отношению к передаче сигналов без кодирования.*

*Ключевые слова: цифровые сигналы, ионосфера, транссионосферные радиолнии, замирания*

**Investigation of symbol-by-symbol reception noise-immunity for information-capacitive digital signals under propagation along transionospheric channels with fading**

L.E. Nazarov, V.V. Batanov, Z.T. Nazarova

*Fryazino Branch, Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics, Russian Academy of Sciences, 141190, Fryazino, Moscow oblast Vvedensky Sq. 1*

*A description of the developed algorithm for symbol-symbol reception of information-capacious digital signals in combination with corrective coding in Galois fields is given. The results of modeling the algorithm are given in order to study its noise immunity for transionospheric channels with fading due to scattering on ionospheric inhomogeneities. It is shown that for these channels the use of the symbol-by-symbol reception algorithm provides an energy gain of up to 24 dB with respect to the reception of signals without coding.*

*Keywords: digital signals, ionosphere, transionospheric channels, fading*

**Введение**

Современной тенденцией при разработке информационных систем является использование информационно-емких цифровых сигналов со сложными «созвездиями», определяющими повышение их информативной емкости [1,2]. Этот подход дает возможность увеличения скорости передачи информации при ограниченной частотной полосе канала.

В работах [3,4] приведено описание разработанного алгоритма оптимального посимвольного приема сигнальных конструкций на основе цифровых сигналов из данного класса с различными манипуляциями (например, с использованием многоуровневой фазовой манипуляции) в сочетании с корректирующими кодами в недвоичных полях Галуа  $GF(2^m)$ , объем которых согласован с объемом  $2^m$  соответствующих сигнальных «созвездий».

Исследование помехоустойчивости алгоритма посимвольного приема произведено для канала с аддитивным белым гауссовским шумом [3,4]. Актуальной является проблема исследования помехоустойчивости алгоритма посимвольного приема сигнальных конструкций из этого класса на основе корректирующего кодирования в

недвоичных полях Галуа  $GF(2^m)$  при передаче по каналам с амплитудными замираниями, в частности, при многолучевом распространении по транссионосферным каналам (спутниковым ионосферным каналам) с замираниями за счет рассеяния на ионосферных неоднородностях.

### Алгоритм оптимального посимвольного приема цифровых сигналов

Характеристикой цифровых сигналов  $s(t)$  является частотная эффективность  $m = \log_2 M$  (бит/с/Гц), определяющая максимальную скорость передачи  $R = m\Delta F$  (бит/с) для канала с частотной полосой  $\Delta F$  [1]. Сигнальные конструкции на основе  $s(t)$  и корректирующих кодов в полях  $GF(2^m)$  задаются соотношением [1]  $s(t) = \sum_i A_i U(t) \cos(2\pi f t + \varphi_i)$ ,  $f$  - несущая частота;  $U(t) = 1$  при  $iT \leq t < (i+1)T$ , иначе  $U(t) = 0$ ;  $A_i, \varphi_i$  - амплитуда и фаза радиоимпульсов в составе  $s(t)$ , задающие вид сигнального «созвездия»;  $T$  - тактовый интервал.

При использовании оптимального посимвольного приема этих сигналов вычисляются апостериорные вероятности  $\Pr(a_i = \beta | \vec{Y})$ ,  $\beta \in GF(2^m)$  и принимаются решения относительно символов  $\hat{a}_i$  с использованием правила  $\hat{a}_i = \max_{\beta \in GF(2^m)} (\Pr(a_i = \beta | \vec{Y}))$  [1,2,3]. Здесь  $\vec{Y} = (\dot{y}_l; 0 \leq l \leq n-1)$  - реализация с выхода демодулятора сигналов,  $\dot{y}_l$  - комплексные отсчеты квадратурных каналов.

Апостериорные вероятности  $\Pr(a_i = \beta | \vec{Y})$  для символов сигнальных конструкций вычисляются с использованием соотношения  $\Pr(a_i = \beta | \vec{Y}) = \sum_{\vec{B}: a_i = \beta} \Pr(\vec{B} | \vec{Y}) = \sum_{\vec{B}: a_i = \beta} \frac{\Pr(\vec{B})}{p(\vec{Y})} p(\vec{Y} | \vec{B})$ ,  $p(\vec{Y} | \vec{B}) = \prod_{i=0}^{n-1} p(\dot{y}_i | b_i)$  - функция правдоподобия.

Сложность вычисления  $\Pr(a_i = \beta | \vec{Y})$  определяется требуемым объемом вычислительных операций и представляет трудоемкую задачу. В работах [3,4] приведено описание разработанного алгоритма для решения этой задачи с существенно более низкой сложностью реализации. Основу алгоритма составляет быстрое спектральное преобразование в базисе Уолша-Адамара с размерностью  $2^m$ .

### Статистические модели канала с замиранием

Замирания сигналов приводят к деградации вероятностных характеристик (вероятность ошибки на информационный бит  $P_G$ ) по отношению к распространению в свободном пространстве [1]. Количественные значения соответствующих энергетических потерь определяются статистическими свойствами амплитуды сигналов  $A$  как случайного процесса.

При создании и развитии моделей замираний сигналов для транссионосферных каналов используются два подхода - на основе аналитического описания процесса распространения сигналов [1] и на основе использования эмпирических соотношений относительно плотности распределения  $p(A)$  [5].

Аналитические подходы основаны на решении стохастического нелинейного волнового уравнения относительно электрического поля. Соответствующие решения,

полученные с использованием борновского приближения и приближения Рытова, дают возможность оценить вторые статистические моменты функционалов от амплитуды  $A$ .

Модели замираний из второго класса связывают параметры эмпирической плотности распределения  $p(A)$  с индексом сцинтилляции [5]

$S_4^2 = (\langle A^4 \rangle - (\langle A^2 \rangle)^2) / (\langle A^2 \rangle)^2$ , здесь  $\langle \rangle$  - усреднение по времени, полагая процесс  $A$  эргодическим. Относительно значений  $S_4$  замирания классифицируются как слабые для  $S_4 < 0.3$ , средние для  $0.3 < S_4 < 0.6$  и сильные для  $S_4 > 0.6$  [2].

Для слабых, средних и отчасти сильных замираний распределение  $p(A)$  аппроксимируется распределением Релея-Райса  $p(A) = \frac{A}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{A^2 + A_0^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{AA_0}{\sigma^2}\right)$ ,

$A_0$  - амплитуда регулярной сигнальной составляющей;  $I_0(x)$  - модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка. Значения  $\sigma^2, A_0^2$  для распределения

Релея-Райса связаны через коэффициент Райса  $d$  [2]  $d = \frac{A_0^2}{2\sigma^2} = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{m^2 - m}}{m - \sqrt{m^2 - m}}$ .

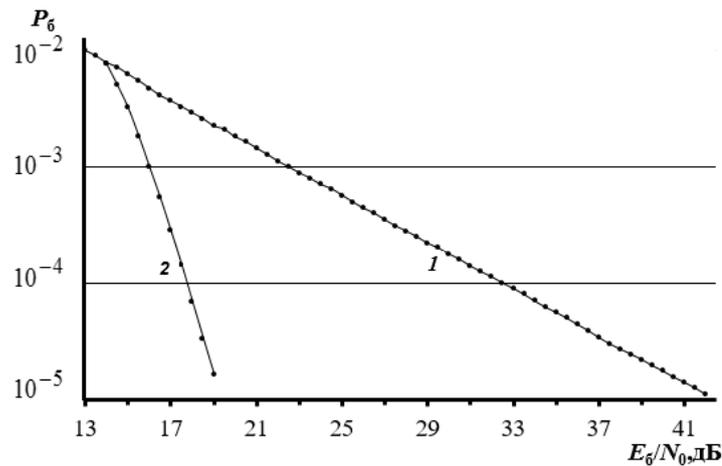
Параметры  $S_4$  и  $m$  связаны соотношением  $m = 1/S_4^2$ .

### Результаты моделирования

В докладе даны результаты моделирования алгоритма посимвольного приема с целью исследования его помехоустойчивости, в частности, для цифровых сигналов с многофазовой манипуляцией с частотной эффективностью до 4 бит/с/Гц. Моделирование алгоритма посимвольного приема с целью оценивания помехоустойчивости выполнено для сигнальных конструкций на основе этих цифровых сигналов в сочетании с простым корректирующим кодом с проверкой на четность при распространении по транссионосферным каналам с замираниями. Моделирование произведено для условий идеальной синхронизации по частоте, фазе и временным тактам. Получены оценки вероятностей ошибки  $P_6$  и соответствующих энергетических потерь для каналов с параметрами сцинтилляции  $S_4 = 0.3$  и  $S_4 = 0.6$  по отношению к распространению в свободном пространстве.

В качестве примера на рисунке 1 приведены вычисленные вероятностные кривые для посимвольного приема рассматриваемых сигнальных конструкций - кривые соответствуют вероятностям  $P_6$  без применения (кривые 1) и с применением корректирующего кодирования (кривые 2). Для параметра  $S_4 = 0.6$  вероятность ошибки  $P_6 = 10^{-5}$  достигается при значении сигнал/помеха 42.0 дБ, соответствующее значение энергетического выигрыша по отношению к передаче без кодирования по транссионосферному каналу достигает 24 дБ.

Подобные оценки вероятностных характеристик и соответствующих энергетических выигрышей получены для ряда рассматриваемых сигнальных конструкций.



**Рис.1** Вероятности ошибки при приеме сигнальной конструкции на основе сигналов ФМ-8 для канала с замиранием (параметр  $S_4 = 0.6$ ): 1 - без кодирования; 2 - с использованием корректирующего кода в поле  $GF(2^3)$ .

### Выводы

Даны результаты исследований помехоустойчивости алгоритма оптимального посимвольного приема для сигнальных конструкций на основе используемых в приложениях цифровых информационно-емких сигналов в сочетании с корректирующим кодированием (коды с проверкой на четность) в полях Галуа, объем которых согласован с объемом сигнальных «созвездий» анализируемых цифровых сигналов. Показано, что применение алгоритма посимвольного приема для модели трансферных каналов с замираниями за счет рассеяния на ионосферных неоднородностях обеспечивает энергетический выигрыш до 24 дБ по отношению к передаче цифровых сигналов без кодирования для модели каналов с замираниями с параметрами индекса сцинтилляции  $S_4 = 0.3$  и  $S_4 = 0.6$ .

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИПЭ им. В.А. Котельникова РАН.*

### Литература

1. Proakis J.G., Salehi M. Digital communication. 5 Edition. McGraw-Hill, Huger Education, 2001. 768 p.
2. Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications Part 2: DVB-S2 Extensions (DVB-S2X) DVB. 2020. Document A083-2. European Broadcasting Union CH-1218, Geneva. 159 p.
3. 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. С.873-878. DOI: [10.31857/S003384942309019X](https://doi.org/10.31857/S003384942309019X).
4. Назаров Л. Е. Алгоритм оптимального посимвольного приема сигнальных конструкций на основе ортогональных сигналов и корректирующих кодов в недвоичных полях Галуа. // Физические основы приборостроения. 2022. Т. 11. № 3 (45). С.44-49. DOI: [10.25210/jfop-2203-044049](https://doi.org/10.25210/jfop-2203-044049).
5. Rino C.L. The Theory of Scintillation with Applications in Remote Sensing. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2011.