

Исследование помехоустойчивости алгоритма приема частотно-эффективных сигналов для ионосферных спутниковых радиолиний с замираниями

Л.Е. Назаров, 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*

Приведены результаты исследований разработанного алгоритма оптимального посимвольного приема частотно-эффективных цифровых сигналов при их распространении по ионосферным спутниковым радиолиниям. Даны результаты моделирования разработанного алгоритма приема класса цифровых сигналов с амплитудно-фазовой манипуляцией, интенсивно используемых в приложениях, с целью исследования его помехоустойчивости для анализируемых радиолиний P- частотного диапазона с замираниями за счет рассеяния на ионосферных неоднородностях. Показано, что для этих радиолиний применение разработанного алгоритма приема обеспечивает энергетический выигрыш до 8 дБ и более по отношению к передаче сигналов без кодирования.

Ключевые слова: цифровые сигналы, ионосфера, частотно-эффективные сигналы, спутниковые ионосферные радиолинии, замирания

Investigation of algorithm noise-immunity for symbol-by-symbol decoding frequency-efficient signals for ionospheric satellite radio channels with fading

L.E. Nazarov, Z.T. Nazarova

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

The results of studies of the developed algorithm for optimal symbol-by-symbol decoding of frequency-efficient digital signals during their propagation over ionospheric satellite radio channels are presented. The results of modeling the developed algorithm for symbol-by-symbol decoding a class of digital signals with amplitude-phase keying, intensively used in applications, are given in order to study its noise-immunity for the analyzed P-frequency range with fading due to scattering by ionospheric irregularities. It is shown that for these radio channels the use of the developed algorithm provides an energy gain of up to 8 dB or more in relation to the transmission of signals without coding.

Keywords: digital signals, ionosphere, transionospheric channels, fading

Введение

Класс частотно-эффективных цифровых сигналов с различными типами манипуляций используется для увеличения информационной скорости передачи при ограниченной частотной полосе радиолинии [1]. Известен достаточно широкий класс данных цифровых сигналов с различными типами манипуляций и «созвездий» (фазовая (ФМ), квадратурно-амплитудная (КАМ), амплитудно-фазовая (АФМ) манипуляции), интенсивно используемых в спутниковых информационных системах: спутниковое цифровое телевидение DVB-S2X (Second Generation Satellite Extensions) [2]; спутниковая связь, соответствующая стандартам 3GPP (3rd Generation Partnership Project) [3]; стандарт Международного Консультативного Комитета по космическим системам передачи CCSDS (Consultative Committee for Space Data Systems) [4].

Данный класс цифровых сигналов существенно подвержен искажающему влиянию тепловых шумов и искажениям комплексных огибающих при распространении по ионосферным спутниковым радиолиниям по отношению к распространению в свободном пространстве [5].

Для повышения верности передачи с использованием рассматриваемых сигналов применяются схемы корректирующего кодирования. В частности, в работах [5,6] анализируется алгоритм приема сигнальных конструкций на основе цифровых сигналов из данного класса в сочетании с корректирующими кодами в полях Галуа $GF(2^m)$, объем которых согласован с объемом 2^m соответствующих сигнальных «созвездий». Показано, что существенным недостатком алгоритма является необходимость обеспечения высокой разрядности представления чисел при его исполнении. Это критически усложняет его реализацию [6].

Актуальной является проблема модификации этого алгоритма с целью понижения сложности реализации относительно требуемой разрядности чисел без снижения помехоустойчивости при приеме сигнальных конструкций на основе рассматриваемого класса сигналов, а также анализ помехоустойчивости результирующего алгоритма приема для ионосферных радиолиний с амплитудными замираниями за счет рассеяния на ионосферных неоднородностях.

Анализ сложности алгоритма посимвольного приема цифровых сигналов

Одной из основных характеристик цифровых сигналов $s_i(t)$ является частотная эффективность $m = \log_2 M$ (бит/с/Гц), определяющая скорость передачи $R = m\Delta F$ (бит/с) для канала с частотной полосой ΔF [1]. Сигнальные конструкции $s(t)$ на основе корректирующих кодов задаются в виде последовательности $s_i(t)$ [1]

$$s(t) = \sum_i A_i U(t) \cos(2\pi f t + \varphi_i), \quad f - \text{несущая частота; } U(t) = 1 \text{ при } iT \leq t < (i+1)T, \text{ иначе}$$

$U(t) = 0$; A_i, φ_i - амплитуда и фаза, задающие «созвездие» V_i ; T - тактовый интервал.

Известен ряд корректирующих кодов, рекомендованных протоколами спутниковых информационных систем DVB-S2X, 3GPP, CCSDS [2-4]. Альтернативу данным кодам относительно сложности процедур формирования/приема, задержек демодуляции и приема и избыточности кодирования представляют корректирующие коды в полях $GF(2^m)$, объем которых согласован с объемом 2^m соответствующих сигнальных «созвездий». Это новое научное направление, основу приема соответствующих сигнальных конструкций составляет подход, минимизирующий вероятность ошибки на сигнальный символ «созвездия» P_c [5,6]. При реализации данного подхода вычисляются апостериорные вероятности $\Pr(a_i = \beta | \vec{Y})$, $\beta \in GF(2^m)$ и принимаются решения относительно передаваемого символа \hat{a}_i с использованием правила $\hat{a}_i = \max_{\beta \in GF(2^m)} (\Pr(a_i = \beta | \vec{Y}))$. 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 символов цифровых сигналов вычисляются как $\Pr(a_i = \beta | \vec{Y}) = \sum_{\vec{B}: a_i = \beta} \frac{\Pr(\vec{B})}{p(\vec{Y})} p(\vec{Y} | \vec{B})$, $p(\vec{Y} | \vec{B}) = \prod_{i=0}^{n-1} p(\dot{y}_i | b_i)$ - функция правдоподобия для кодового слова \vec{B} .

Ограничением при реализации разработанного алгоритма вычисления $\Pr(b_i = \beta | \vec{Y})$ является требование высокой разрядности чисел (128 разрядов и более), которая определяется рядом параметров: отношением сигнал/помеха, объемом M сигнальных «созвездий», длиной кодовых слов. Для меньших форматов чисел результирующие значения при вычислениях могут превышать или быть меньшими возможных предельных значений ($\approx 10^{\pm 308}$ для формата double). Это приводит к значимой деградации вероятностных характеристик P_C при приеме по отношению к потенциально возможным характеристикам.

Для решения этой проблемы предложена методика ограничения диапазона вычислений, используя нормализацию $(p(\dot{y}_l | \dot{V}_i))^{1/\alpha}$, α - коэффициент нормализации в виде нелинейной функциональной зависимости от параметра сигнал/помеха.

Альтернативой по отношению к предложенному методу адаптивного ограничения диапазона чисел является использование выражения при вычислении $p(\dot{y}_l | \dot{V}_i) = K \exp\left(-\|\dot{y}_l - \mu \dot{V}_i\|^2 / 2\right)$. В этом случае \dot{y}_l компенсирует увеличение диапазона аргумента чисел, то есть можно использовать формат float представления чисел (32 разряда) без снижения вероятностных характеристик. Этот подход существенно упрощает выполнение алгоритма посимвольного приема.

Модель ионосферных спутниковых радиолиний с замиранием

Замирания сигналов при распространении по рассматриваемым радиолиниям приводят к деградации вероятностных характеристик по отношению к распространению в свободном пространстве [6]. Количественные значения энергетических потерь определяются статистическими свойствами случайных вариаций амплитуды сигналов A . Один из подходов при развитии моделей замираний основан на эмпирических соотношениях для плотности распределения $p(A)$ [6]. В этом случае модели связывают параметры распределения $p(A)$ с индексом сцинтилляции $S_4^2 = (\langle A^4 \rangle - (\langle A^2 \rangle)^2) / (\langle A^2 \rangle)^2$ [7], $\langle \rangle$ - усреднение по времени. Замирания классифицируются как слабые ($S_4 < 0.3$), средние ($0.3 < S_4 < 0.6$) и сильные ($S_4 > 0.6$).

Плотность $p(A)$ 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_0^2 , σ^2 - мощности регулярной и случайных составляющих; σ^2 , A_0^2 связаны $d = \frac{A_0^2}{2\sigma^2} = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{m^2 - m}}{m - \sqrt{m^2 - m}}$; $m = 1/S_4^2$.

Результаты моделирования

В докладе приведены результаты моделирования алгоритма посимвольного приема с целью исследования его помехоустойчивости, в частности, для класса цифровых сигналов с амплитудно-фазовой манипуляцией (АФМ- сигналы) с частотной эффективностью до 8 бит/с/Гц, задаваемых форматом спутниковой связи 3GPP [3]. Моделирование алгоритма приема выполнено для сигнальных конструкций на основе этого класса цифровых сигналов в сочетании с корректирующим кодом с проверкой на четность при распространении по ионосферной спутниковой радиолинии P - частотного диапазона с замираниями. Получены оценки вероятностей ошибки P_c 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 приема рассматриваемых сигнальных конструкций на основе АФМ-64 - кривые соответствуют вероятностям P_c при распространении в свободном пространстве (кривая 1), для радиолиний с замиранием без применения (кривая 2) и с применением корректирующего кодирования (кривая 3). Для параметра $S_4 = 0.3$ вероятность ошибки $P_c = 10^{-5}$ достигается при значении сигнал/помеха 26 дБ, соответствующее значение энергетического выигрыша по отношению к передаче без кодирования по радиолинии с замиранием достигает 8 дБ.

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

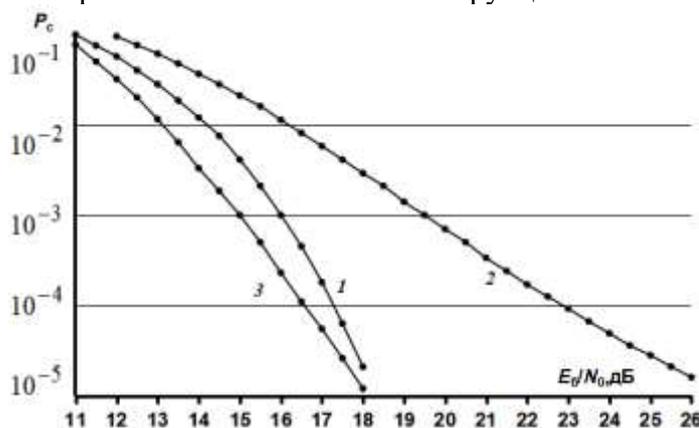


Рис.1 Вероятности ошибки при приеме сигнальной конструкции на основе АФМ-64: 1 - без кодирования, распространение в свободном пространстве; 2 - без кодирования, радиолиния с замиранием ($S_4 = 0.3$); 3 - с корректирующим кодом, радиолиния с замиранием ($S_4 = 0.3$).

Выводы

Даны результаты исследований помехоустойчивости разработанного алгоритма посимвольного приема с пониженной сложностью реализации для сигнальных конструкций на основе интенсивно используемых в приложениях цифровых частотно-эффективных сигналов в сочетании с корректирующим кодированием (коды с проверкой на четность) в полях Галуа, объем которых согласован с объемом сигнальных «созвездий». Показано, что применение разработанного алгоритма приема для модели ионосферных спутниковых радиолиний с замираниями за счет рассеяния на ионосферных неоднородностях обеспечивает значимый энергетический выигрыш до 8

дБ и более по отношению к передаче цифровых сигналов без кодирования для модели каналов с замираниями с параметром индекса сцинтилляции $S_4 = 0.3$.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ 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. 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.
4. Low density parity check codes for use in near-earth and deep space applications. Experimental specification. CCSDS 131.1-O-2. 2007. 44 p
5. 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. DOI: 10.31857/S003384942309019X.
6. 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). Стр.44-49. DOI: 10.25210/jfop-2203-044049.
7. Rino C.L. The Theory of Scintillation with Applications in Remote Sensing. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2011.