

Исследования вероятностных характеристик приема цифровых сигналов при распространении по спутниковым ионосферным радиолиниям

В.В. Батанов¹, Б.Г. Кутуза², Л.Е. Назаров^{1,3}

¹Информационные спутниковые системы имени академика М.Ф. Решетнёва, 662972, г. Железногорск, ул. Ленина, 52

²Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 125009, г. Москва ул. Моховая 11, корп. 7

³Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 141190, Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1.
E-mail: levnaz2018@mail.ru

Приведены подходы при анализе искажений комплексных огибающих цифровых сигналов при распространении по спутниковым ионосферным радиолиниям, обуславливающих интерференционные помехи в дополнение к тепловым канальным шумам. Разработана методика оценки статистических характеристик интерференционных помех. Оценены вероятностные характеристики и асимптотические вероятности ошибочного приема рассматриваемых сигналов с увеличением частотной полосы с использованием вычисленных статистических характеристик для радиолиний Р- частотного диапазона.

Ключевые слова: ионосфера, цифровые сигналы, вероятностные характеристики, модели искажений, энергетические потери.

Studies of the probabilistic characteristics of the digital signal reception for propagation over satellite ionosphere radio links

V.V. Batanov¹, B. G. Kutuzov², L.E. Nazarov^{1,3}

¹JSC “Information Satellite Systems“ academician M.F. Reshetnev Company“, 662972, Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, , Lenin Str., 52

²Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, 125009, Moscow, Mokhovaya str., 11-7

³Fryazino Branch, Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics, Russian Academy of Sciences, 141190, Fryazino, Moscow oblast Vvedensky Sq. 1

Models of signal propagation lines in transionosphere channels are presented. Modeling of the propagation of digital signals using these models during propagation with typical characteristics was carried out in order to evaluate the probabilistic characteristics of the reception of digital signals with the frequency band extension. The probabilistic characteristics and asymptotic probabilities of erroneous reception of the considered signals with increasing frequency band are estimated using the calculated statistical characteristics for radio links of the P-frequency range.

Keywords: digital signals, ionosphere, distortion models, dielectric constant, energy losses

Введение

При распространении по спутниковым каналам передачи сигналы испытывают искажения – изменяются комплексные огибающие сигналов за счет дисперсионных свойств ионосферы [1-6]. Эти искажения обуславливают возникновение интерференционных помех межсимвольной и межканальной интерференций [1,6] в дополнение к тепловым помехам в виде аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ) [7]. Дополнительные интерференционные помехи снижают надежность

передачи информации по рассматриваемым в докладе каналам, разрушая при определенных условиях штатное функционирование спутниковых информационных систем различного назначения [7].

Созданию моделей рассматриваемых искажений посвящен широкий ряд работ [1,2,5,6]. Актуальной является проблема оценивания статистических характеристик интерференционных помех (например, оценивание их мощности, спектральной мощности) для цифровых сигналов с использованием этих моделей и вычисление вероятностных характеристик при приеме цифровых сигналов различными видами «созвездий» [7].

Описание распространения сигналов по спутниковым ионосферным линиям основано на решении волнового уравнения относительно электрического поля $E(z, f, t)$ монохроматической плоской волны с частотой f [3,4]. При нормальном падении плоской волны с частотой f на изотропную среду с неоднородной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon(z, f)$ и распространяющейся по оси z с граничным условием $E(0, f)$ решение волнового уравнения в оптическом приближении имеет вид

$$E(z, f) = \operatorname{Re} \left(E(0, f) \exp \left(-j2\pi f c^{-1} \int_0^z n(x, f) dx \right) \right) \quad [3]. \quad \text{Здесь} \quad n(x, f) = \sqrt{\varepsilon(x, f)} \quad -$$

коэффициент преломления среды.

Для цифровых сигналов $s(t)$, представляющих последовательность радиоимпульсов $s_i(t)$ с задаваемым «созвездием» длительностью T задача усложняется - сигналы представляются суммой спектральных составляющих с дополнительным фазовым смещением за счет дисперсионных свойств ионосферы, что определяет искажение комплексной огибающей сигналов [1,4,6] и возникновение интерференционных помех в виде случайного процесса (в общем случае нестационарного), статистические характеристики которого зависят от центральной частоты f и полосы частот ΔF сигналов, от последовательности $s_i(t)$ и от характеристик линии передачи.

Цель работы – оценить статистические характеристики интерференционных помех для класса цифровых сигналов с «созвездиями» фазовой манипуляции, оценить вероятностные характеристики приема данных сигналов при распространении по спутниковым ионосферным радиолиниям.

Известные модели земной ионосферы спутниковых линий соответствуют сферически-симметричной среде с неоднородной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon(z, f)$ [1,2] $\varepsilon(z, f) = 1 - f_p^2(z) / f^2$. Здесь $f_p(z) = \sqrt{80.8 N_9(z)}$ - собственная частота ионосферы (кГц); $N_9(z)$ (эл/см³) – высотный профиль электронной плотности ионосферы на высоте z . Ниже рассматривается однослойная модель электронной плотности $N_9(z)$ [6]

$$N_9(z) = \sqrt{\gamma \cdot \exp[-(\exp(b(z - z_M)) + bz)]}. \quad (1)$$

Здесь γ, b - параметры модели; z_M - высота, на которой достигается максимальное значение электронной плотности N_M (для дневного времени $N_M \leq 10^6$ эл/см³ при $z_M = 300...350$ км, $b = 0.01$, $\gamma = 5 \cdot 10^{13}$ [6]).

Искаженные сигналы $\hat{s}(t)$ представляются в виде $\hat{s}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \dot{S}(f) \dot{H}(z, f) \exp(j2\pi f t) df$.

Здесь $\dot{S}(f)$ - спектр сигнала $s(t)$; $\dot{H}(z, f) = \exp(j2\pi f \tau(z, f))$ - коэффициент передачи спутниковой ионосферной линии, как линейного фильтра;

$\tau(z, f) = \exp\left(j2\pi f \int_0^z dx / c_{\phi}(x, f)\right)$ - время распространения сигнала с частотой f вдоль лучевой линии; $c_{\phi}(x, f) = c/n(x, f)$ - фазовая скорость; время распространения

$$\tau(z, f) = \int_0^z \frac{n(x, f)(R_3 + x) dx}{c_{\phi} \sqrt{n^2(x, f)(R_3 + x)^2 - (n(0, f)R_3 \sin(\theta_A - \xi_A))^2}} \quad [6].$$

Здесь R_3 - радиус Земли; θ_A - зенитный угол; ξ_A - рефракционная поправка к θ_A .

Приближенное выражение для $\tau(z, f)$ получается при упрощающем условии сравнительно быстрого снижения электронной плотности от ее максимального значения N_m и без учета параметра ξ_A вследствие его малого значения [1]

$$\tau(z, f) = \frac{4.03 \cdot 10^7}{f^2} \frac{(R_3 + z_m)}{\sqrt{(R_3 + z_m)^2 - (R_3 \sin \theta_A)^2}} \int_0^z N_{\vartheta}(x) dx.$$

Вид искаженного сигнала $\hat{s}(t)$ определяется путем оценивания коэффициента передачи $\dot{H}(z, f)$ спутниковой ионосферной линии радиолнии в частотном диапазоне сигналов ΔF и вычисления приведенного выше соотношения.

Результаты моделирования

Моделирование спутниковых ионосферных линий произведено с целью оценивания вероятностей ошибки на бит P_6 (включая асимптотические значения) при приеме класса цифровых сигналов с «созвездием» фазовой манипуляции. Характеристики линии - однослойная модель с параметрами дневной ионосферы, высота $z = 400$ км, центральная частота соответствует P - частотному диапазону. Варьируемые параметры: частотная полоса сигналов ΔF ; зенитный угол θ_A .

Моделирование произведено для сигналов ФМ4, ФМ8, ФМ16 [7] - асимптотические значения P_6 уменьшаются с увеличением длительности T (с увеличением частотной полосы) и с уменьшением значений угла θ_A . В частности, при $T = 50$ нс и $\theta_A = 80^\circ$ для ФМ16 асимптотическое значение $P_6 = 6.5 \cdot 10^{-2}$. Данное поведение вероятности ошибки P_6 представляет ограничивающий фактор применения сигналов с фазовой манипуляцией с расширением их частотного спектра в спутниковых информационных системах.

Выводы

При распространении по спутниковым ионосферным линиям передачи искажаются комплексные огибающие цифровых сигналов. Эти искажения обуславливают возникновение интерференционных помех, которые снижают надежность связи, разрушая при определенных условиях нормальное функционирование спутниковых

информационных систем. Особенностью интерференционных помех является невозможность их компенсации путем повышения мощности передаваемых сигналов. Приведены результаты моделирования спутниковых ионосферных линий с целью оценивания деградации вероятностных характеристик приема класса фазоманипулированных сигналов по отношению к распространению в свободном пространстве. Показано, что теоретические асимптотические вероятности ошибочного приема рассматриваемых сигналов с учетом статистических характеристик интерференционных помех для радиолинии P - частотного диапазона для сигналов ФМ16 с частотной полосой 20 МГц (длительность сигналов $T = 100$ нс) превышает 0.065. Это определяет актуальность разработки и исследования алгоритмов приема рассматриваемых сигналов, снижающих искажающее влияние искажений.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект №20-07-00525).

Литература

1. Колосов М.А., Арманд Н.А., Яковлев О.И. Распространение радиоволн при космической связи. М.: Связь. 1969. 156 с.
2. Кутуза Б.Г., Мошков А. В., Пожидаев В. Н. Комбинированный метод, который устраняет влияние ионосферы при обработке сигналов бортовых радиолокаторов Р-диапазона с синтезированной апертурой. // Радиотехника и электроника. 2015. Т.60. №9. С.889-895.
3. Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. М.: Наука. 1960. 552 с.
4. Арманд Н.А. Распространение широкополосных сигналов в дисперсионных средах. // Радиотехника и электроника. 2003. Т.48. №9. С.1045-1057.
5. Крюковский А.С., Лукин Д.С., Кирьянова К.С. Метод расширенной бихарактеристической системы при моделировании распространения радиоволн в ионосферной плазме // Радиотехника и электроника. Т. 57. № 9. С. 1028–1034. 2012.
6. Назаров Л.Е., Батанов В.В. Анализ искажений радиоимпульсов при распространении по ионосферным линиям передачи спутниковых систем связи. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2016. Т.21. №5. С.37-45.
7. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М.: Издательский дом “Вильямс”. 2003. 1104 с.