

ИССЛЕДОВАНИЕ ИСКАЖЕНИЙ ЦИФРОВЫХ СИГНАЛОВ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ПО ИОНОСФЕРНЫМ СПУТНИКОВЫМ РАДИОЛИНИЯМ

Назаров А. Е., Батанов В. В.

Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, Фрязинский филиал, <http://fire.relarn.ru>
Фрязино 141190, Московская обл., Российская Федерация

Поступила 26.03.2019, принята 31.03.2019

Представлена чл.-корр. РАЕН Я.А. Плушиным

Приведены методы описания искажений сигналов при их распространении по ионосферным спутниковым радиолиниям. Разработанные методы основаны на решении волнового уравнения для электрического поля, распространяющегося в среде с неоднородной диэлектрической проницаемостью и на использовании моделей ионосферных радиолиний. Показано, что действие ионосферных радиолиний эквивалентно линейной фильтрации. Искажения цифровых сигналов обуславливают возникновение межсимвольных помех в дополнение к аддитивным канальным тепловым шумам, которые снижают надежность связи. Рассмотрено действие ионосферных радиолиний на цифровые сигналы с двухфазовой манипуляцией, активно используемые в приложениях. Путем компьютерного моделирования спутниковой ионосферной радиолинии определены количественные оценки энергетических потерь при приеме искаженных цифровых сигналов с двухфазовой манипуляцией по отношению к распространению в свободном пространстве.

Ключевые слова: ионосфера, ионосферные спутниковые радиолинии, сигналы, искажения сигналов, вероятность ошибки

УДК 621.391.01

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (65)
2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ (66)
3. МОДЕЛИ ИОНОСФЕРЫ (67)
4. ОПИСАНИЕ ИСКАЖЕНИЙ ЦИФРОВЫХ СИГНАЛОВ (67)
5. РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛЕНИЙ (69)
6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (70)

Литература (71)

1. ВВЕДЕНИЕ

Ионосфера является неоднородной дисперсионной средой распространения, которая обуславливает фазо-частотные и амплитудно-частотные искажения цифровых сигналов при их распространении [1-4]. Эти искажения приводят к возникновению межсимвольных помех (МСИ) в дополнение к аддитивным канальным тепловым шумам (АБГШ) и к энергетическим

потерям при корреляционной обработке сигналов, составляющей основу процедур обнаружения сигналов при установлении синхронизации и при демодуляции сигналов в цифровых системах связи по отношению к распространению в свободном пространстве [5-7].

Актуальной является проблема исследования и количественного оценивания искажений цифровых сигналов с фазовой манипуляцией с расширением спектра при их распространении по ионосферным радиолиниям для спутниковых систем связи, спутниковых систем навигации [5-9]. Количественные оценки данных искажений производятся на основе сравнительного анализа вероятностных характеристик при приеме искаженных сигналов и неискаженных сигналов и зависят от рабочих диапазонов частот [1, 4]. В настоящей статье эти оценки даны для радиолиний P -частотного

диапазона, интенсивно используемых при разработке и создании ряда спутниковых информационных систем с расширением спектра сигналов различного назначения, например, при разработке международной спутниковой поиско-спасательной системы Коспас-Саргат второго поколения (центральная частота 406.1 МГц) [10].

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Основу методов анализа влияния ионосферы на искажения цифровых сигналов составляет решение волнового уравнения при распространении по оси z плоской волны $E(z, f)$ с частотой f , нормально падающей на слой неоднородной среды с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon(z, f)$ [2, 6]

$$\frac{d^2 E(z, f)}{dz^2} + \frac{(2\pi)^2 f^2}{c^2} \varepsilon(z, f) E(z, f) = 0. \quad (1)$$

Здесь c – скорость света в вакууме.

Волновое уравнение (1) определяет рассматриваемую ниже частную модель распространения радиоволн в направлении магнитного поля Земли. В этом случае при распространении происходит лишь поворот плоскости поляризации радиоволн [3, 4]. Альтернативной является модель распространения радиоволн в направлении, перпендикулярном к направлению магнитного поля Земли, учитывающая двухлучевое распространение (возникновение обыкновенной и необыкновенной волн) и в добавление к рассматриваемым искажениям также и замирания сигналов (частотно-селективные и частотно-неселективные) [3]. Этой модели предполагается самостоятельное исследование.

Ряд аналитических решений уравнения (1) получен при использовании упрощений относительно $\varepsilon(z, f)$, полагая, в частности, среду распространения изотропной (модель «холодной» плазмы), а также плоскостной или сферически слоистой [2]. Важным направлением является определение

приближенных решений волнового уравнения (1) при использовании данных упрощений, в частности, приближение геометрической оптики. Достаточным условием применимости этого приближения является медленность изменения диэлектрических свойств среды на длине волны λ , т.е. $\frac{d\varepsilon(z, f)}{dz} \lambda \ll 1$ [2, 4]. В этом случае приближение геометрической оптики к решению волнового уравнения без учета отражения для неоднородной ионосферы имеет вид [2]

$$E(z, t) = E(0, t) \exp\left(\frac{j2\pi f}{c} \int_0^z n(z, f) dz\right). \quad (2)$$

Здесь $n(z, f) = \sqrt{\varepsilon(z, f)}$ – коэффициент преломления среды.

Соотношение (2) справедливо для монохроматических волн. Для цифровых сигналов с центральной частотой f_0 , задаваемых в виде [5]

$$E(0, t) = \dot{A}(t) \exp(j2f_0 t) \quad (3)$$

и представляющих спектр монохроматических волн, задача усложняется. В этом случае каждая спектральная компонента при распространении приобретает частное фазовое смещение и частное изменение амплитуды, что обуславливает результирующее искажение сигналов на входе приемного устройства. В (3) обозначение $\dot{A}(t)$ соответствует комплексной огибающей сигналов, задаваемой сигнальным «созвездием» с длительностью T составляющих элементов с фазовой или квадратурно-амплитудной манипуляцией [5].

Суть задачи – дать описание искажений сигналов при их распространении по спутниковым ионосферным радиолиниям и произвести оценивание влияния этих искажений на вероятностные характеристики при приеме сигналов.

3. МОДЕЛИ ИОНОСФЕРЫ

Для частот f , используемых в системах спутниковой связи ($f > 30$ МГц [1]), коэффициент диэлектрической проницаемости ионосферы $\varepsilon(z, f)$ в виде неоднородной сферически-симметричной среды задается соотношением [1, 3, 4]

$$\varepsilon(z, f) = 1 - f_p^2(z) / f^2. \tag{4}$$

Здесь $f_p(z) = \sqrt{80.8 N_e(z)}$ – собственная частота ионосферы (кГц); $N_e(z)$ – электронная плотность ионосферы (эл/см³) на высоте z .

Данная модель диэлектрической проницаемости $\varepsilon(z, f)$ (4) является вещественной, явления отражения, рассеяния и поглощения радиоволн полагаются малыми. Это обуславливает лишь фазо-частотные искажения при распространении сигналов [10].

Электронная плотность ионосферы $N_e(z)$ зависит от высоты, широты и долготы, от времени суток и солнечной активности. Разработке и развитию ее моделей посвящен ряд работ [1-4, 11]. Эти модели используются при решении частных задач навигации, связи, распространения радиоволн и др. Ниже при вычислениях используется известная и наиболее простая модель (однослойная модель Чэпмана) для $N_e(z)$ [3]

$$N_e(z) = \sqrt{\gamma \exp[(\exp(b(z - z_{\max,e})) + bz)]}. \tag{5}$$

Здесь γ, b – параметры модели; $z_{\max,e}$ – высота над земной поверхностью, для которой достигается максимальное значение электронной плотности. Для дневного времени максимальное значение $N_e(z) = 10^6$ эл/см³ [3] (параметры модели $b = 0.01$, $\gamma = 5 \cdot 10^{13}$, $z_{\max,e} = 300$ км), соответствующее значение собственной частоты ионосферы для $z_{\max,e}$ равно $f_p = 9$ МГц.

Использование модели (5) дает возможность определения примерных искажений сигналов при вариации ее параметров (в частности, при количественном оценивании искажений для

наиболее выраженного влияния ионосферы в дневное время). Для дальнейшего уточнения количественных оценок искажений необходимо использование более сложных частных моделей ионосферы, например, статистических моделей IRI и ее модификаций [11].

4. ОПИСАНИЯ ИСКАЖЕНИЙ ЦИФРОВЫХ СИГНАЛОВ

Методы анализа рассматриваемых искажений при распространении цифровых сигналов относятся к двум общим классам [2, 6, 9]. В первый класс входят методы анализа искажений во временной области с использованием импульсной характеристики $h(z, \tau)$ ионосферной линии [12, 13, 14]. Во второй класс входят методы анализа искажений в частотной области с использованием аппарата спектрального преобразования Фурье для $h(z, \tau)$ [2, 6, 15].

Представление сигнала $E(z, t)$ с использованием импульсной характеристики ионосферной линии задается соотношением свертки [13]

$$E(z, t) = \int_0^\infty E(0, \tau) h(z, t - \tau) d\tau. \tag{6}$$

Методы анализа искажений из второго класса основаны на вычислении обратного преобразования Фурье [2, 6]

$$E(z, t) = \int_{-\infty}^\infty g(f) \exp(j(\varphi(f, z) + 2\pi ft)) df. \tag{7}$$

Здесь $g(f)$ – спектр сигнала; $\varphi(f, z) = \int^z k(f, z) dz$ – фаза спектральной компоненты для частоты f ; $k(f, z) = 2\pi f \sqrt{\varepsilon(z, f)} / c$ – волновое число.

Импульсная характеристика $h(z, \tau)$ в (6) для стационарной неоднородной ионосферы может быть представлена в виде приближенного аналитического выражения. Одно из таких выражений приведено в [13]

$$h(z, \tau') = \delta(\tau') - u(\tau') \frac{2\pi f_{p,eff}(z, f) \sqrt{z}}{\sqrt{2c\tau'}} J_1 \left(4\pi f_{p,eff}(z, f) \sqrt{\frac{z\tau'}{2c}} \right). \tag{8}$$

Здесь $\delta(\tau)$ – дельта-функция; $\tau' = \tau - z/c$; $u(\tau)$ – функция единичного скачка;

$$J_n(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \cos(n\theta - x \sin \theta) d\theta - \text{функция Бесселя}$$

n -го порядка. Для неоднородной ионосферы ее эффективное значение собственной частоты $f_{p,\text{eff}}$ для f_0 определяется как решение уравнения

$$\int_0^z \sqrt{f_0^2 - f_p^2(x, f)} dx = z \sqrt{f_0^2 - f_{p,\text{eff}}^2}. \quad (9)$$

При вычислении (9) и фазы $\varphi(f, z)$ в (7) используется модель профиля $N_e(z)$ (5).

Для частотного диапазона спутниковых радиолиний передачи выполняется условие $f_0 \gg f_p(z, f)$ и вычисление $f_{p,\text{eff}}$ можно производить с использованием соотношения $f_{p,\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{z} \int_0^z f_p^2(x) dx}$. При этом эффективная собственная частота $f_{p,\text{eff}}$ практически не зависит от значений центральной частоты f_0 и функционально связана с полным электронным содержанием $\alpha = \int N_e(x) dx = f_{p,\text{eff}}^2 z / 80.8$, этот параметр является одной из основных характеристик ионосферы Земли [3, 4].

В [14] приведено второе аналитическое выражение относительно

$$h(z, \tau) = \delta(\tau - z/c) - u(\tau - z/c) \frac{2\pi f_{p,\text{eff}} z J_1(2\pi f_{p,\text{eff}} \sqrt{\tau^2 - (z/c)^2})}{c \sqrt{\tau^2 - (z/c)^2}}. \quad (10)$$

Для радиолиний спутниковых цифровых систем связи выполняется условие $T \ll z/c$, в этом случае в [14] доказана тождественность выражений (8) и (10).

Соотношения (8) и (10) соответствуют углу места $\theta = 90^\circ$ приемного устройства на борту космического аппарата по отношению к передающему устройству на земной поверхности. Для произвольного угла места $\theta \in (0; 90^\circ)$ в (10) используется наклонная дальность z_{incl} , вычисляемая с использованием соотношения

$$(z + R_E)^2 = R_E^2 + z_{\text{incl}}^2 + 2R_E z_{\text{incl}} \sin(\theta).$$

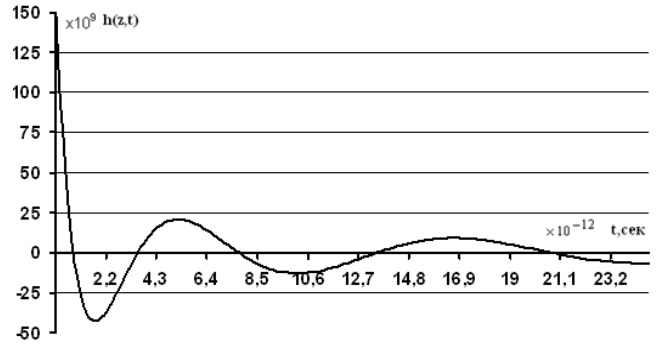


Рис. 1. Вид слагаемого импульсной характеристики $h(z, \tau)$ (высота $z = 400$ км, $f_{p,\text{eff}} = 3.5$ МГц).

На рис. 1 приведен вид второго слагаемого характеристики $h(z, \tau)$ (10) без учета дельта-функции и знака. Кривая вычислена для высоты $z = 400$ км, $f_{p,\text{eff}} = 3.5$ МГц, $\theta = 90^\circ$. Видно, что характеристика $h(z, \tau)$ обладает достаточно большой протяженностью, что определяет последствие искаженных составляющих элементов и, как следствие, наличие МСИ при передаче цифровых сигналов.

На рис. 2 приведен вид исходного элемента цифрового сигнала с двухфазовой (ФМ2) манипуляцией с огибающей в виде меандра (кривая 1), центральная частота радиоимпульса равна $f_0 = 400$ МГц, длительность $T = 50$ нс. Кривая 2 вычислена с использованием соотношения (10) и соответствует этому элементу при распространении в ионосфере, характеризуемой эффективным значением собственной частоты $f_{p,\text{eff}} = 3.5$ МГц, высота ионосферы над земной поверхностью равна $z = 400$ км. Видно, что искаженный элемент имеет отмеченное выше последствие

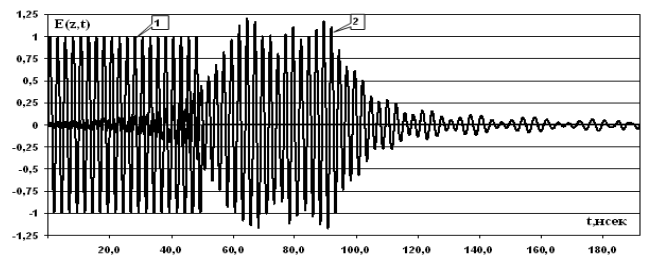


Рис. 2. Вид элемента цифрового сигнала ФМ2: кривая 1 – исходный элемент ($f_0 = 400$ МГц, $T = 50$ нс); кривая 2 – вид элемента при распространении в ионосфере ($f_{p,\text{eff}} = 3.5$ МГц, $z = 400$ км).

радиоимпульсов. Различие времени появления исходного импульса $E(0,t)$ для модели распространения в свободном пространстве и импульса $E(z,t)$ на выходе ионосферной радиолинии обусловлено отличием групповой скорости $v_{gr} = c\sqrt{\epsilon(z, f)}$ от скорости света $c > v_{gr}$.

Искажения составляющих элементов $E(z,t)$ обуславливают наличие энергетических потерь ΔE по отношению к распространению в свободном пространстве. Эти потери обусловлены изменением огибающей искаженных сигналов с вариацией их мощностей и возникновением помех МСИ [12, 14].

Оценивание энергетических потерь ΔE производится на основе сравнительного анализа вероятностей ошибочного приема информационных битов P_b для сигналов без искажений и с искажениями.

Для базовой модели канальной помехи АБГШ правило оптимального приема основано на вычислении взаимной корреляции входной реализации с исходными сигналами, вероятность ошибочного приема P_b для сигналов ФМ2 определяется соотношением [5]

$$P_b = 1 - F\sqrt{2E_b / N_0}. \tag{11}$$

Здесь E_b – энергия сигналов на информационный бит, N_0 – спектральная плотность АБГШ (односторонняя),

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp(-t^2 / 2) dt.$$

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Ниже приведены результаты оценивания энергетических потерь ΔE при распространении цифровых сигналов с двухфазовой (“созвездие” ФМ2) и четырехфазовой (“созвездие” ФМ4) манипуляцией по ионосферной радиолинии с параметрами модели дневной ионосферы (5) – высота $z = 400$ км, центральная частота $f_0 = 400$ МГц. Эти сигналы являются базовыми при

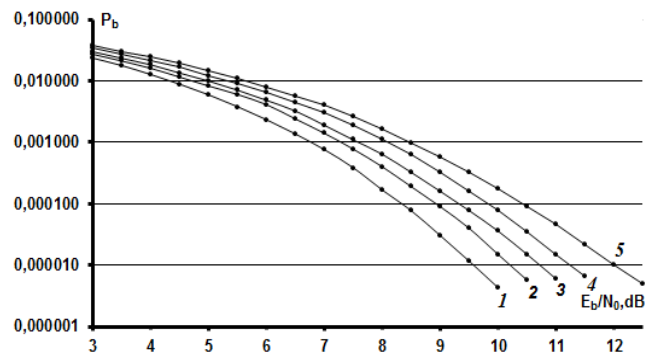


Рис. 3. Вероятности ошибочного приема сигналов ФМ2 при распространении по ионосферной линии, $f_0 = 400$ МГц, $z = 400$ км: 1 - распространение в свободном пространстве; 2 - $\theta = 90^\circ$, $T = 100$ нс, $\Delta F = 20$ МГц; 3 - $\theta = 10^\circ$, $T = 100$ нс, $\Delta F = 20$ МГц; 4 - $\theta = 90^\circ$, $T = 50$ нс, $\Delta F = 40$ МГц; 5 - $\theta = 10^\circ$, $T = 50$ нс, $\Delta F = 40$ МГц.

разработке спутниковых информационных систем различного назначения [5, 8, 10]. Варьируемые параметры – длительность элементов сигналов T , частотная полоса сигналов $\Delta F = 2/T$, отношение сигнал/помеха E_b/N_0 , угол места θ .

Целью моделирования являлось вычисление примерных оценок ΔE для наиболее выраженного влияния ионосферы в дневное время. Эти оценки необходимо учитывать при расчете энергетического бюджета создаваемых спутниковых радиолиний P -частотного диапазона, примером является разрабатываемая спутниковая система Коспас-Сарсат второго поколения [10].

На рис. 3, рис. 4 приведены зависимости

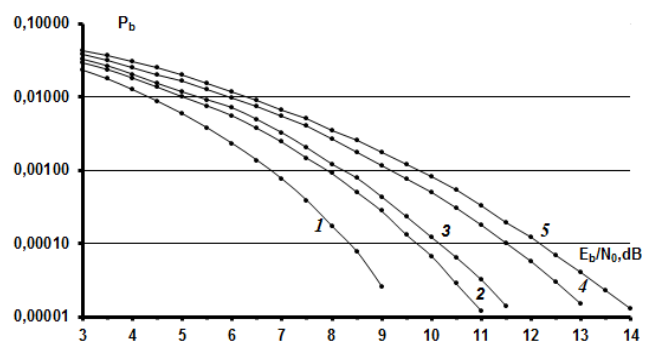


Рис. 4. Вероятности ошибочного приема сигналов ФМ4 при распространении по ионосферной линии, $f_0 = 400$ МГц, $z = 400$ км: 1 - распространение в свободном пространстве; 2 - $\theta = 90^\circ$, $T = 100$ нс, $\Delta F = 20$ МГц; 3 - $\theta = 10^\circ$, $T = 100$ нс, $\Delta F = 20$ МГц; 4 - $\theta = 90^\circ$, $T = 50$ нс, $\Delta F = 40$ МГц; 5 - $\theta = 10^\circ$, $T = 50$ нс, $\Delta F = 40$ МГц.

вероятностей ошибки P_b от E_b/N_0 для сигналов ФМ2 и ФМ4, вычисленные путем компьютерного моделирования алгоритма приема на основе корреляционных соотношений.

При моделировании приема сигналов производилась интервальная оценка вероятности P_b путем вычисления частоты $w = x/u$. Здесь x – число ошибочных решений в последовательности независимых вычислительных экспериментов объемом u , определяемых размером доверительного интервала, вероятностью P_b , доверительной вероятностью P_{conf} . Например, для $P_b = 10^{-5}$, $\alpha = 0.5P_b$ (доверительный интервал $[0.5P_b, 1.5P_b]$) и $P_{conf} = 0.95$ требуемое количество экспериментов $u > 1540000$.

Кривая 1 на рис. 3 вычислена с использованием соотношения (11) и соответствует распространению сигналов ФМ2 в свободном пространстве – вероятность $P_b = 10^{-5}$ обеспечивается при отношении $E_b/N_0 = 9.5$ дБ. Кривые 2, 3, 4, 5 получены путем моделирования и соответствуют распространению по ионосферной радиолнии. Кривые 2 и 3 соответствуют длительности $T = 100$ нс ($\Delta F = 20$ МГц) и углам места $\theta = 90^\circ$ и $\theta = 10^\circ$. Кривые 4 и 5 соответствуют длительности $T = 50$ нс ($\Delta F = 40$ МГц) и углам места $\theta = 90^\circ$ и $\theta = 10^\circ$.

В сводной **Таблице** приведены соответствующие оценки энергетических потерь ΔE для значения $P_b = 10^{-5}$. Видно монотонное уменьшение вероятности P_b

Таблица
Оценки энергетических потерь ΔE при распространении сигналов ФМ2 и ФМ4 по ионосферной радиолнии относительно распространения в свободном пространстве ($P_b = 10^{-5}$).

Параметры		$T = 100$ нс	$T = 50$ нс
ФМ2	$\theta = 90^\circ, \Delta E$ дБ	0.5	1.0
	$\theta = 10^\circ, \Delta E$ дБ	1.5	2.5
ФМ4	$\theta = 90^\circ, \Delta E$ дБ	1.5	3.5
	$\theta = 10^\circ, \Delta E$ дБ	2.0	4.5

до 0.000001 в зависимости от E_b/N_0 , что показывает достаточно малое влияние помех МСИ на вероятностные характеристики в этом случае относительно влияния за счет вариаций энергии элементов цифровых сигналов. Видно также, что с уменьшением длительности T (увеличением частотной полосы ΔF) наблюдается увеличение значений ΔE – при $\theta = 0^\circ$ имеем $\Delta E = 0.5$ дБ для $T = 100$ нс и $\Delta E = 1.0$ дБ для $T = 50$ нс; при $\theta = 10^\circ$ имеем $\Delta E = 1.5$ дБ для $T = 100$ нс и 2.5 дБ для $T = 50$ нс.

На рис. 4 приведены вероятностные кривые для сигналов ФМ4. Кривая 1 вычислена также с использованием соотношения (11) и соответствует распространению в свободном пространстве. Кривые 2, 3, 4, 5, 6 получены путем моделирования и соответствуют распространению по ионосферной радиолнии. Кривые 2 и 3 соответствуют длительности $T = 100$ нс ($\Delta F = 20$ МГц) и углам $\theta = 90^\circ$ и $\theta = 10^\circ$. В сводной таблице приведены соответствующие оценки энергетических потерь ΔE для ФМ4 сигналов при $P_b = 10^{-5}$. Видно, что по отношению к сигналам ФМ2 энергетические потери увеличиваются – при $P_b = 10^{-5}$ потери ΔE по отношению к кривой 1 достигают 1.5 и 2.0 дБ. Кривые 4 и 5 соответствуют длительности $T = 50$ нс ($\Delta F = 40$ МГц) и углам $\theta_A = 90^\circ$ и $\theta_A = 10^\circ$. В этом случае потери ΔE также увеличиваются и достигают 3.5 и 4.5 дБ, что показывает увеличение влияния помех МСИ и вариаций энергии элементов цифровых сигналов на вероятностные характеристики приема по отношению к сигналам ФМ2.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены методы описания цифровых сигналов при их распространении по ионосферным радиолниям спутниковых

систем передачи информации. Методы описания основаны на использовании модели стационарной ионосферной радиолинии в виде линейного фильтра с импульсной характеристикой, представимой аналитическими выражениями.

Даны результаты количественного оценивания энергетических потерь при приеме искаженных сигналов ФМ2 и ФМ4 при их распространении по радиолиниям P -частотного диапазона относительно распространения в свободном пространстве. Путем моделирования показано, что энергетические потери зависят от длительности элементов цифровых сигналов (частотной полосы сигналов) и от угла места и достигают 2.5 дБ и 4.5 дБ соответственно для сигналов ФМ2 и сигналов ФМ4 для наиболее выраженного влияния ионосферы в дневное время, что необходимо учитывать при расчете энергетического бюджета спутниковых радиолиний.

Оценивание энергетических потерь с использованием более сложных моделей высотных профилей электронной плотности ионосферы, учитывающих, в частности, двухлучевое распространение сигналов с различными “созвездиями”, представляет перспективное направление исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колосов МА., Арманда НА, Яковлев ОИ. *Распространение радиоволн при космической связи*. М., Связь, 1969, 156 с.
2. Гинзбург ВА. *Распространение электромагнитных волн в плазме*. М., Наука, 1967, 684 с.
3. Долуханов МП. *Распространение радиоволн*. М., Гос. издательство по вопросам связи и радио, 1960, 336 с.
4. Яковлев ОИ, Якубов ВП, Урядов ВП, Павельев АГ. *Распространение радиоволн*. М., ЛЕНАНД, 2009, 496 с.
5. Складар Б. *Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение*. М., Изд. дом “Вильямс”, 2003, 1104 с.
6. Арманда НА. Распространение широкополосных сигналов в дисперсионных средах. *Радиотехника и электроника*, 2003, 48(9):1045-1057.
7. Иванов ДВ, Иванов ВА, Михеева НН, Рябов НВ, Рябова МИ. Распространение коротковолновых сигналов с расширенным спектром в среде с нелинейной дисперсией. *Радиотехника и электроника*, 2015, 60(11):1167-1177.
8. Hofmann-Wellenhof B, Lichtenegger H, Collins J. *Global Positioning System. Theory and Practice*. Springer-Verlag, New York, 1994, 392 p.
9. Кутуза БГ, Мошков АВ, Пожидаев ВН. Комбинированный метод, который устраняет влияние ионосферы при обработке сигналов бортовых радиолокаторов P -диапазона с синтезированной апертурой. *Радиотехника и электроника*, 2015, 60(9):889-895.
10. Specification for 2-generation COSPAS-SARSAT 406 MHz distress beacons. *C/S T.018. Issue 1. 2016*.
11. Bilitza D, McKinnell LA, Reinisch B, Fuller-Rowell T. The International Reference Ionosphere (IRI) today and in the future. *Journal of Geodesy*, 2011, 85:909-920.
12. Назаров ЛЕ, Батанов ВВ. Вероятностные характеристики обнаружения радиоимпульсов при распространении по ионосферным линиям передачи спутниковых систем связи. *Радиотехника и электроника*, 2017, 62(9):866-874.
13. Dvorak SL, Dudley DG. Propagation of Ultrawideband Electromagnetic Pulses Through Dispersive Media. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1995, 37(2):192-200.

14. Назаров АЕ, Батанов ВВ, Зудилин АС. Искажения радиоимпульсов при распространении по ионосферным линиям спутниковых систем связи. *Журнал радиоэлектроники*, 2016, №2. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/feb16/1/text.pdf>.
15. Назаров АЕ, Батанов ВВ. Анализ искажений радиоимпульсов при распространении по ионосферным линиям передачи спутниковых систем связи. *Электромагнитные волны и электронные системы*, 2016, 21(5):37-45.

Назаров Лев Евгеньевич

д.ф.-м.н., с.н.с.

ФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН

1, пл. Введенского, Фрязино 141190, Моск. обл, Россия

nazarov@ire.rssi.ru

Батанов Виталий Викторович

инженер-программист

ФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН

1, пл. Введенского, Фрязино 141190, Моск. обл, Россия

bvitaly@mail.ru.

THE INVESTIGATION OF IONOSPHERIC CHANNEL INFLUENCES FOR PHASED SHIFT KEYING DIGITAL SIGNALS

Lev E. Nazarov, Vitaly V. Batanov

Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Fryazino Branch, <http://fire.relarn.ru>
Fryazino 141190, Moscow Region, Russian Federation

nazarov@ire.rssi.ru, batanov@mail.ru.

Abstract. The results of analysis for signals propagating through the ionospheric satellite communication channels are presented in the article. As a measure of distortion estimates concerning to the free space propagating the signal/noise degradation and the detection error-performances are used. The descriptions of signal distortions due to ionospheric influence are based on the time-domain solution for ionospheric channel as linear stationary filter. The signal/noise and error-performance degradations for two-phased shift keying signals are evaluated. The computer simulations for evaluation of these error-performance degradations concerning signal/noise decreasing are performed - the degradation of signal/noise is about 2.5 dB for bit-error 0.00001.

Keywords: ionosphere, satellite ionospheric channel, error-performances, signals, phase shift keying signals

UDC 621.391.01

Bibliography – 15 references

RENSIT, 2019, 11(1):65-72

Received 26.03.2019, *accepted* 31.03.2019

DOI: 10.17725/rensit.2019.11.065