

DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.8.4>  
УДК 621.391.01

## АЛГОРИТМ АДАПТИВНОЙ КОМПЕНСАЦИИ ФАЗО-ЧАСТОТНЫХ ИСКАЖЕНИЙ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ПО ТРАНСИОНОСФЕРНЫМ РАДИОЛИНИЯМ

В. В. Батанов<sup>1</sup>, Л. Е. Назаров<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> АО «Информационные спутниковые системы им. академика М.Ф. Решетнева»,  
662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

<sup>2</sup> Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова  
РАН, 141190, г. Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1

Статья поступила в редакцию 16 августа 2021 г.

**Аннотация.** Приведены модели искажений цифровых широкополосных сигналов при их распространении по транссионферным радиолиниям, эквивалентным линейному фильтру с импульсной характеристикой, определяемой рядом параметров, в частности центральной частотой сигналов. Искажения фазо-частотных характеристик цифровых сигналов за счет дисперсионных свойств ионосферы обуславливает временное рассеяние и возникновение интерференционных помех, снижающих надежность информационных систем и, при определенных характеристиках радиолинии, разрушающих их работу. Это определяет актуальность разработки вычислительных процедур обработки цифровых сигналов, снижающих эффективность действия данного типа помех, характерным свойством которых является линейная зависимость их мощности от мощности информационных сигналов. Приведено описание алгоритма адаптивной компенсации данных искажений на основе использования информационных сигналов и формирования обратного фильтра, что соответствует общей концепции «слепой» обработки. Путем компьютерного моделирования показана возможность компенсации рассматриваемых искажений цифровых широкополосных сигналов с фазовой манипуляцией и достижения

вероятностных характеристик ошибочного приема, обеспечивающих приемлемое качество радиолинии для информационных систем.

**Ключевые слова:** ионосфера, сигналы, искажения сигналов, компенсация искажений, вероятность ошибочного приема, "слепая" обработка.

**Abstract.** The models of distortions of digital broadband signals during their propagation through transionospheric channels which are equivalent to a linear filter with an impulse response determined by a number of parameters, in particular, the central frequency of the signals, are presented. Distortions of the phase-frequency characteristics of digital broadband signals due to the dispersion properties of the ionosphere causes time scattering and the appearance of interference noise which reduces the reliability of information systems and with certain characteristics of the radiochannel destroys their operation. This determines the relevance of developing computational procedures for processing digital signals that reduce the effectiveness of this type of interference, a characteristic property of which is the linear dependence of their power on the power of information signals. The description of the algorithm for adaptive compensation of these distortions based on the use of information signals and the formation of an inverse filter is given, which corresponds to the general concept of "blind" processing. The possibility of the considered distortion compensation for digital wideband signals with phase shift keying and achievement of probabilistic characteristics of erroneous reception providing an acceptable quality of a radiochannels for information systems has been shown by means of computer simulations.

**Key words:** ionosphere channels, broadband signals, signal distortions, algorithm, error-performances, "blind" processing.

## **Введение**

При распространении по транзионосферным радиолиниям комплексные огибающие сигналов искажаются за счет влияния земной ионосферы как дисперсионной среды [1-8]. Эти искажения обуславливают возникновение интерференционных межсимвольных (МСИ) и межканальных (МКИ) помех в

дополнение к канальным тепловым шумам [1,5,8,]. Искажения огибающих сигналов и интерференционные помехи снижают надежность передачи информации по рассматриваемым радиолиниям, разрушая при определенных условиях нормальное функционирование информационных спутниковых систем [1,10,11].

Интерференционные помехи представляют случайный процесс, статистические характеристики которого (мощность, спектральная плотность мощности, др.) зависят от параметров ионосферной радиолинии, от центральной частоты и частотной полосы сигналов [11-13].

Актуальными являются проблемы разработки, моделирования и исследования алгоритмов обработки сигналов при приеме, снижающих действие рассматриваемого типа искажений с учетом их нестационарности.

## 1. Постановка задачи

Анализ распространения сигналов по рассматриваемым ионосферным радиолиниям основан на решении волнового уравнения относительно электрического поля  $\vec{E}(\vec{r}, f)$  для плоской волны с частотой  $f$  [3,12]

$$\Delta \vec{E}(\vec{r}, f) - \text{grad div} \vec{E}(\vec{r}, f) + k^2 \left( \vec{\varepsilon}(\vec{r}, f) \vec{E}(\vec{r}, f) - j \frac{2 \vec{E}(\vec{r}, f) \vec{\sigma}(\vec{r}, f)}{f} \right) = 0. \quad (1)$$

Здесь  $k = \frac{2\pi f}{c}$  - волновое число;  $c$  - скорость света в свободном пространстве;

$\vec{\varepsilon}(\vec{r}, f)$  и  $\vec{\sigma}(\vec{r}, f)$  - соответственно тензоры диэлектрической проницаемости и проводимости, зависящие от магнитного поля Земли  $\vec{H}(\vec{r})$ .

В изотропном случае без учета  $\vec{H}(\vec{r})$  при нормальном падении плоской волны на среду с неоднородной диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon(z, f)$  и  $\sigma(\vec{r}, f) = 0$ , распространяющейся по оси  $z$ , уравнение (1) имеет скалярный вид [3,11]

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

При выполнении условия  $\frac{d\varepsilon(z, f)}{dz} \lambda \ll 1$  ( $\lambda$  - длина волны) решение (2)

задается приближением геометрической оптики [3,11]

$$E(z, f) = \operatorname{Re} \left( \dot{E}(0, f) \exp \left( -jk \int_0^z n(x, f) dx \right) \right). \quad (3)$$

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

Для класса цифровых сигналов  $s(t)$  с различными видами манипуляций (фазовой, квадратурно-амплитудной, др.) решение уравнения (2) усложняется. В этом случае сигналы представляются в виде суммы монохроматических сигналов, каждый из которых приобретает дополнительное фазовое и амплитудное смещения за счет дисперсионных и поглощающих свойств земной ионосферы. Это определяет искажение комплексных огибающих  $\dot{E}(z, f)$  на входе приемных устройств, обуславливающее возникновение интерференционных помех МСИ и МКИ [14]. Особенностью этих помех по отношению к каналному тепловому шуму в виде аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ) является зависимость их мощности от мощности передаваемых сигналов [1,14].

Известные методы обработки сигналов при приеме, снижающие действие интерференционных помех, основаны на использовании пилот-сигналов, в частности, сигналов с двумя различными центральными частотами [1,12,15,16]. Реализация этих методов требует дополнительных мощностей радиолиний. Альтернативой этому направлению представляют методы адаптивной обработки сигналов при приеме на основе информационных сигналов без использования пилот-сигналов (методы «слепой» обработки).

Цель работы - дать описание и результаты моделирования алгоритма адаптивной обработки цифровых широкополосных сигналов с фазовой манипуляцией при приеме, компенсирующей искажения комплексных огибающих сигналов при их распространении по рассматриваемым ионосферным радиолиниям.



$$\hat{s}(t) = \int_0^t s(\tau)h(z, t - \tau)d\tau. \quad (6)$$

Методы анализа искажений из второго класса основаны на вычислении обратного преобразования Фурье [9,10]

$$\hat{s}(t) = \text{Re} \left( \int_{-\infty}^{\infty} \dot{S}(f) \dot{H}(z, f) \exp(-j2\pi ft) df \right). \quad (7)$$

Здесь  $\dot{S}(f)$  - спектр сигнала  $s(t)$ ;  $\dot{H}(z, f) = \exp(j2\pi f \tau(z, f))$  - коэффициент передачи ионосферной радиолинии;  $\tau(z, f) = \exp \left( j2\pi f \int_0^z \frac{dx}{c_{\Phi}(x, f)} \right)$  - фазовое время распространения гармонического сигнала с частотой  $f$  вдоль лучевой линии АВ (сплошная линия АВ на рисунке 1, поясняющем схему ионосферной радиолинии);  $c_{\Phi}(x, f) = c/n(x, f)$  - фазовая скорость.

Параметр  $\tau(z, f)$  вычисляется с использованием соотношения [11]

$$\tau(z, f) = \int_0^z \frac{n(x, f)(R_3 + x)dx}{c_{\Phi} \sqrt{n^2(x, f)(R_3 + x)^2 - (n(0, f)R_3 \sin(\theta_A - \xi_A))^2}}. \quad (8)$$

Здесь  $R_3$  - радиус Земли;  $\theta_A$  - видимый зенитный угол;  $\xi_A$  - рефракционная поправка к  $\theta_A$ , определяемая как решение уравнения [11,18]

$$\chi = \int_0^z \frac{n(0, f)R_3 \sin(\theta_A - \xi_A)dh}{(R_3 + h) \sqrt{(n(h, f)(R_3 + h))^2 - (n(0, f)R_3 \sin(\theta_A - \xi_A))^2}}. \quad (9)$$

Здесь  $\chi = \arccos \left( \frac{-L_{AB}^2 + R_3^2 + (R_3 + z)^2}{2R_3(R_3 + z)} \right)$ ,  $L_{AB}$  - расстояние линии прямой видимости (штриховая линия АВ на рис. 1)

$$L_{AB} = \sqrt{(R_3 + z)^2 - R_3^2 \sin^2(\theta_A)} - R_3 \cos(\theta_A). \quad (10)$$

Вид искаженного сигнала  $\hat{s}(t)$  определяется путем вычисления интегрального соотношения (6) с использованием оценки коэффициента передачи  $\dot{H}(z, f)$  в частотном диапазоне  $\Delta F$  цифровых сигналов.

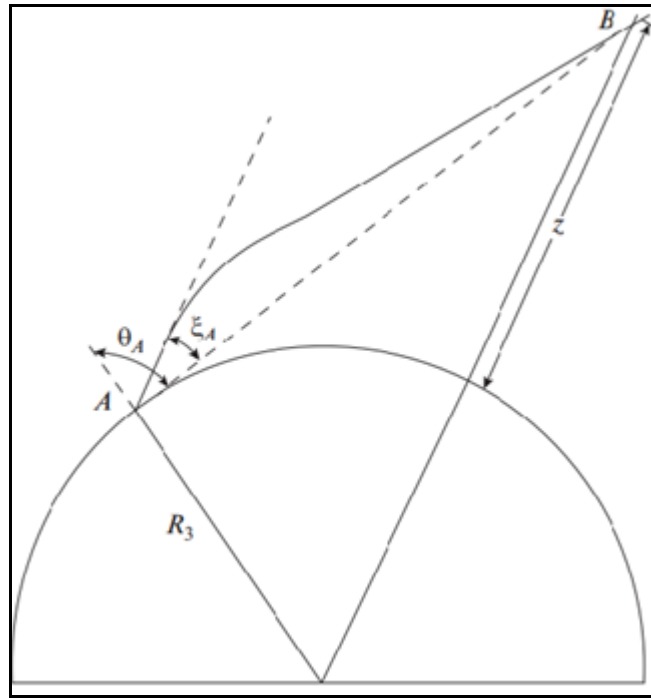


Рис.1. Распространение сигналов по спутниковой ионосферной линии.

Импульсная характеристика  $h(z, \tau)$  и коэффициент передачи ионосферной радиолинии  $\dot{H}(z, f)$  связаны функциональным соотношением на основе спектрального преобразования в базисе Фурье [14]. Из соотношений (8)-(10) для значения  $\theta_A = 0$  следует  $\xi_A = 0$ . В этом случае характеристика  $h(z, \tau)$  для стационарной неоднородной ионосферы при определенных допущениях может быть представлена аналитически [6]

$$h(z, \tau) = \delta(\tau - z/c) - u(\tau - z/c) \frac{2\pi f_{p,эф} z J_1\left(2\pi f_{p,эф} \sqrt{\tau^2 - (z/c)^2}\right)}{c \sqrt{\tau^2 - (z/c)^2}}. \quad (11)$$

Здесь  $\delta(\tau)$  - дельта-функция;  $u(\tau)$  - функция единичного скачка;

$J_1(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \cos(\theta - x \sin \theta) d\theta$  - функция Бесселя 1-го порядка [11]. Эффективное

значение собственной частоты  $f_{p,эф}$  для центральной частоты сигналов  $f_0$  определяется как решение уравнения

$$\int_0^z \sqrt{f_0^2 - f_p^2(x, f)} dx = z \sqrt{f_0^2 - f_{p,эф}^2}. \quad (12)$$

При вычислении (12) используется модель профиля  $N(z)$ .

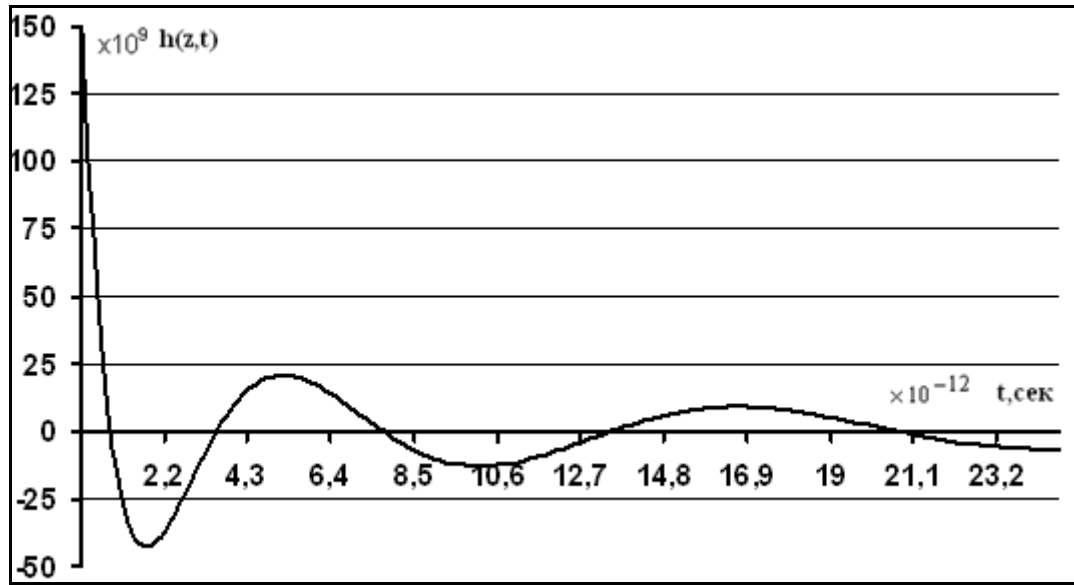
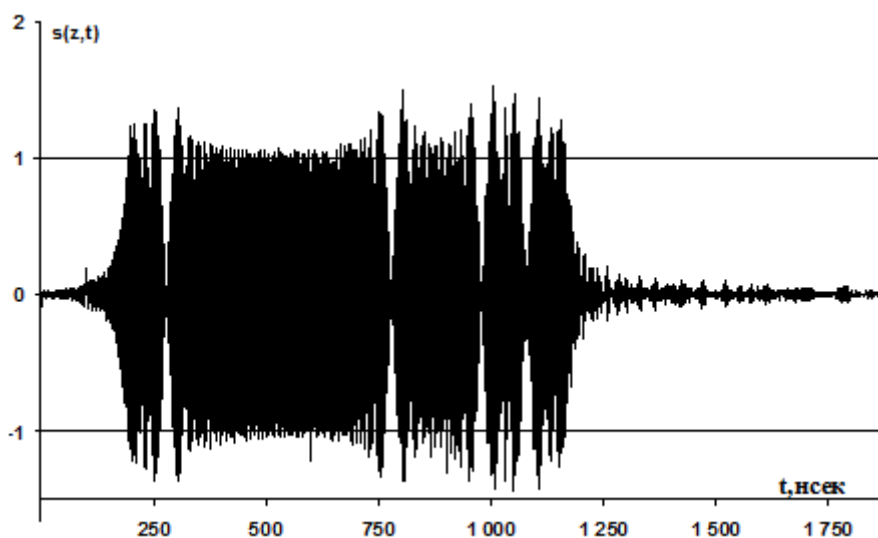


Рис.2. Вид слагаемого импульсной характеристики  $h(z, \tau)$  (высота  $z = 400$  км,  $f_{p,эф} = 3.5$  МГц).

В качестве примера на рис.2 приведен вид второго слагаемого импульсной характеристики  $h(z, \tau)$  (11) без учета дельта-функции. Кривая вычислена для высоты радиолинии  $z = 400$  км,  $f_{p,эф} = 3.5$  МГц. Видно, что импульсная характеристика обладает достаточно большой длительностью, что определяет протяженность интерференционных помех при передаче цифровых сигналов. На рис.3. приведен вид соответствующего фрагмента цифрового сигнала с фазовой манипуляцией с огибающей в виде меандра, центральная частота равна  $f_0 = 400$  МГц, длительность  $T = 100$  нсек (частотная полоса  $\Delta F = 20$  МГц), видимый зенитный угол  $\theta_A = 0$  (рис. 3а) и  $\theta_A = 60^0$  (рис. 3б). По оси абсцисс отложены значения времени относительно времени распространения сигналов в свободном пространстве. Видно искажение огибающей, временное рассеяние составляющих радиоимпульсов, определяющее интерференционные помехи, и временная задержка  $\hat{s}(t)$  относительно распространения сигнала в свободном пространстве  $s(t)$ .



а)



б)

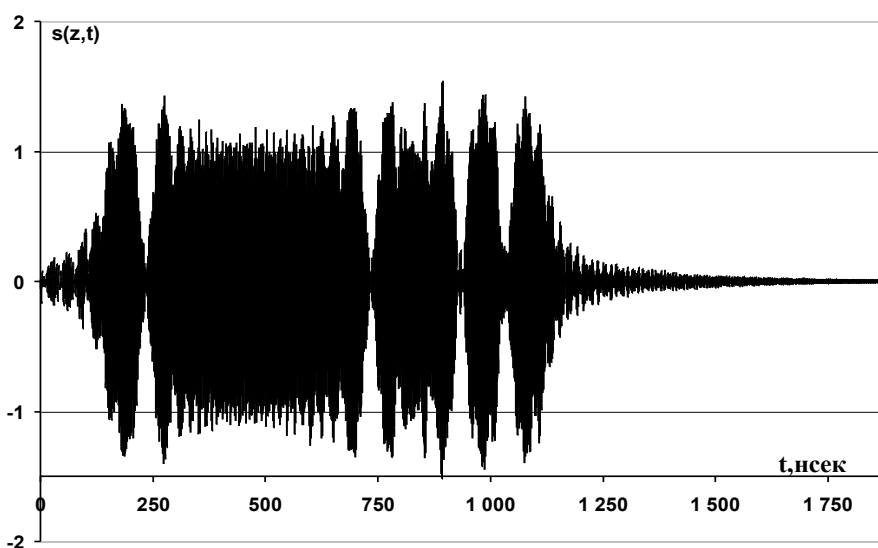


Рис.3. Вид сигнала на выходе ионосферной радиолинии: а)  $\theta_A = 0$ ; б)  $\theta_A = 60^\circ$ .

### 3. Алгоритм адаптивной обработки сигналов с искажениями

На рис.4 приведена блок-схема общей модели распространения сигналов по радиолинии и обработки сигналов с искажениями при приеме.

Цифровые сигналы  $s(t)$  в виде последовательности составляющих радиоимпульсов длительностью  $T$ , формируемые модулятором на основе информационной последовательности  $\vec{a}$ , задают выходной искаженный сигнал

$\hat{s}(t)$  при распространении по ионосферной радиолнии с коэффициентом передачи  $\hat{H}(f)$  (с импульсной характеристикой  $h(t)$ ).

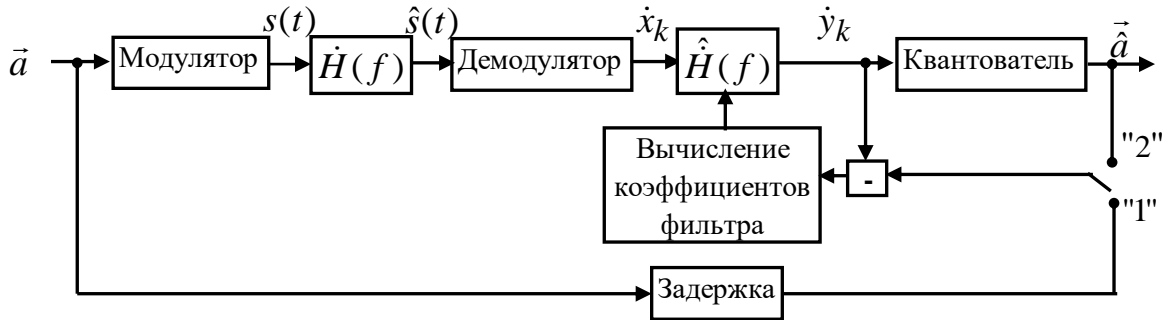


Рис.4. Блок-схема модели распространения сигналов по радиолнии и обработки сигналов при приеме.

На выходе демодулятора сигналов при условии синхронизации информационной системы поступает последовательность отсчетов  $\hat{x}_k$  (в общем случае комплексные), включающих сигнальные, шумовые и помеховые интерференционные составляющие. Задача дискретного фильтра с коэффициентом передачи  $\hat{H}(f)$  - компенсировать влияние интерференционных помех. При условии  $\hat{H}(f) = \hat{H}^{-1}(f)$  выполняется полная компенсация рассматриваемого типа помех.

Дискретный фильтр реализуется в виде трансверсального фильтра с весовыми коэффициентами  $\dot{w}(i), i = 0, 1, \dots, N$ . Сигнал  $\dot{y}_k$  на выходе фильтра вычисляется с использованием соотношения [14]

$$\dot{y}_k = \sum_{i=0}^N \dot{x}_{k+i} \dot{w}(i). \quad (13)$$

Здесь  $N$  (четное) – размерность трансверсального фильтра, определяемая условием  $h(NT) \leq \alpha$ ;  $\alpha = 0.01 \dots 0.001$  - параметр.

Весовые коэффициенты  $\vec{w}^{(n+1)}$  на  $n+1$  шаге функционирования трансверсального фильтра вычисляются с использованием рекуррентного соотношения [19]

$$\dot{w}^{(n+1)}[i] = \dot{w}^{(n)}[i] + \mu \cdot (\dot{a}[n + N/2] - \dot{y}[n]) \cdot \dot{x}[n + i], \quad i = 0, 1, \dots, N. \quad (14)$$

Здесь параметр  $\mu$  определяет скорость сходимости итеративной процедуры.

Задание начального значения вектора  $\vec{w}^{(0)}$  осуществляется на этапе синхронизации информационной системы путем вычисления соотношения (14) с использованием известной пилот-последовательности (ключ в положении «1»). Далее функционирование адаптивного алгоритма обработки и вычисления коэффициентов  $\vec{w}^{(n)}$  осуществляется с использованием оценки символов информационной последовательности  $\vec{a}$  (ключ в положении «2») на выходе блока квантования, полагая достаточное время стационарности ионосферной радиолнии для корректного процесса адаптации. Изложенный алгоритм обработки сигналов с искажениями соответствует общей концепции «слепой» обработки [19].

### Результаты моделирования

Одной из основных характеристик систем передачи информации является вероятность ошибки на сигнальный символ  $P_c$  при приеме [14,18]. Для модели канального шума АБГШ оптимальный прием основан на вычислении взаимной корреляции входной реализации  $r(t) = \hat{s}(t) + n(t)$  с передаваемым сигналом  $s(t)$  [14].

Ниже рассматриваются сигналы  $s(t)$  на основе 16-ти позиционной фазовой манипуляции (сигналы ФМ16), используемые в спутниковых информационных системах [14], для которых влияние искажений комплексных огибающих и интерференционных помех являются значительными при оценивании характеристики  $P_c$ . Сигналы  $s(t)$  представляют последовательность элементарных радиоимпульсов  $s_i(t, \varphi_{il}) = Au(t + iT)\exp(j(\varphi_{il} + 2\pi ft))$  длительностью  $T$  [14]. Здесь  $u(t + iT) = 1$  при  $iT \leq t < i(t + iT)$ , иначе  $u(t + iT) = 0$ ;  $A, \varphi_{il}$  - амплитуда и фаза. Фазы манипуляции  $\varphi_{il}$  для текущего значения  $i$  задаются правилом  $\varphi_{il} = \frac{\pi l}{16}$ ,  $l = 0, 1, \dots, 15$  и определяются значениями передаваемых информационных битов.

Моделирование ионосферных спутниковых радиолиний выполнено с целью оценивания деградации вероятности  $P_c$  при приеме сигналов  $\hat{s}(t)$  относительно распространения в свободном пространстве и оценивания эффективности приведенного алгоритма обработки сигналов при приеме, компенсирующего действие интерференционных помех. Характеристики ионосферной линии - однослойная модель (5) с параметрами дневной ионосферы, высота  $z = 400$  км, центральная частота  $f_0 = 400$  МГц, зенитный угол  $\theta_A = 60^0$ . При моделировании изменялось информационное содержание формируемых сигналов  $s(t)$  - генерировались равновероятные информационные символы, задающие начальные фазы  $\varphi_{il}$  составляющих радиоимпульсов  $s_i(t, \varphi_{il})$ .

На рис.5 (кривые 1-4) приведены вероятности  $P_c$  при приеме сигналов при наличии АБГШ. По оси абсцисс отложены значения сигнал/помеха  $E_b / N_0$ ,  $N_0$  - односторонняя спектральная плотность АБГШ,  $E_b$  - энергия сигналов на бит.

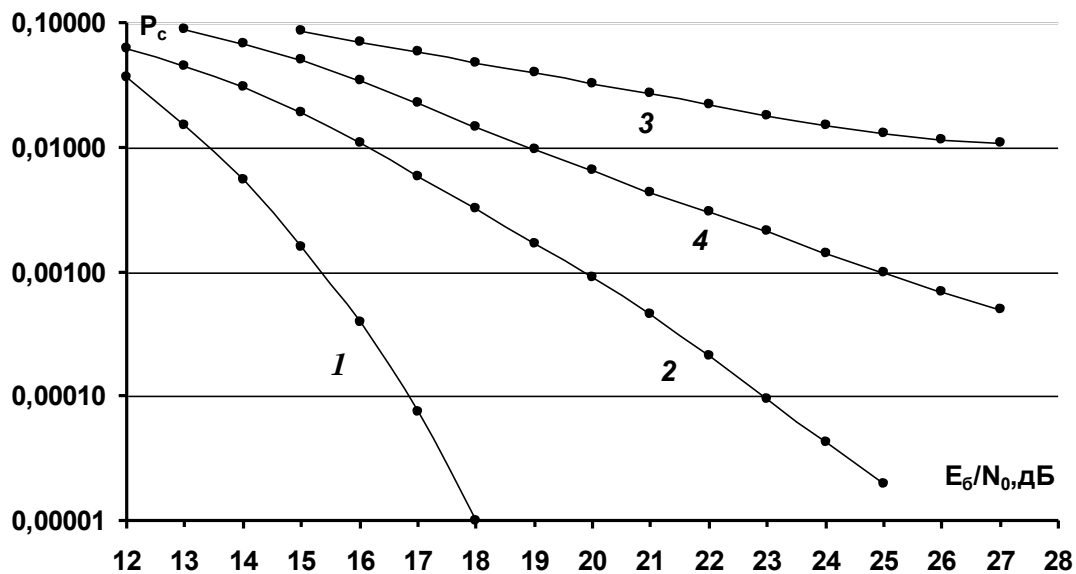


Рис.5. Вероятности ошибочного приема сигналов ФМ16 при распространении по ионосферной линии,  $\theta_A = 60^0$ : 1 - распространение в свободном пространстве; 2 - без компенсации искажений сигналов ( $T = 200$  нс,  $\Delta F = 10$  МГц); 3 - без компенсации искажений сигналов ( $T = 100$  нс,  $\Delta F = 20$  МГц); 4 - с компенсацией искажений сигналов ( $T = 100$  нс,  $\Delta F = 20$  МГц).

Кривая 1 соответствует теоретической кривой  $P_c$  при распространении сигналов  $s(t)$  в свободном пространстве [15].

Кривая 2 соответствует распространению сигналов по ионосферной радиолинии, длительность радиоимпульсов,  $T = 200$  нс, частотная полоса  $\Delta F = 10$  МГц. Видно монотонное уменьшение вероятности ошибочного приема  $P_c$  при увеличении параметра  $E_{\sigma}/N_0$ , что показывает приемлемое качество радиолинии для информационной системы за счет превышения мощности АБГШ относительно мощности интерференционных помех. В этом случае энергетические потери при  $P_c = 10^{-3}$  за счет рассеяния и влияния интерференционных помех по отношению к распространению в свободном пространстве достигают 4.5 дБ.

Кривая 3 соответствует распространению сигналов по ионосферной радиолинии, длительность радиоимпульсов  $T = 100$  нс, частотная полоса  $\Delta F = 20$  МГц. В этом случае при увеличении параметра  $E_{\sigma}/N_0$  вероятность ошибочного приема практически не изменяется ( $P_c > 0.01$ ). Это показывает разрушение нормальной работы информационной системы за счет превышения мощности интерференционных помех по отношению к мощности АБГШ. Кривая 4 соответствует вероятности  $P_c$  для данной ионосферной радиолинии с использованием адаптивного алгоритма обработки сигналов ФМ16 (13), (14) с параметрами  $N = 15$ ,  $\alpha = 0.001$   $\mu = 0.000001$ . Видно монотонное уменьшение вероятности ошибочного приема  $P_c$  при увеличении параметра  $E_{\sigma}/N_0$ , что показывает коррекцию радиолинии за счет превышения результирующей мощности АБГШ относительно мощности результирующих интерференционных помех. В этом случае энергетические потери при  $P_c = 10^{-3}$  за счет влияния интерференционных помех по отношению к распространению в свободном пространстве достигают 8.5 дБ.

Эти результаты показывают эффективность приведенного алгоритма компенсации искажений широкополосных сигналов при распространении по трансionoсферным радиолиниям.

### **Заключение**

Приведены модельные представления искажений цифровых широкополосных сигналов при их распространении по трансionoсферным радиолиниям, эквивалентным линейному фильтру с импульсной характеристикой, определяемой рядом параметров, в частности центральной частотой сигналов. Искажения фазо-частотных характеристик цифровых сигналов за счет дисперсионных свойств ионосферы обуславливает временное рассеяние и возникновение интерференционных помех, снижающих надежность информационных систем и, при определенных характеристиках радиолинии, разрушающих их работу. Приведено описание алгоритма адаптивной компенсации данных искажений на основе использования информационных сигналов и формирования обратного фильтра, что соответствует общей концепции «слепой» обработки. Путем компьютерного моделирования показана возможность компенсации рассматриваемых искажений цифровых широкополосных сигналов с фазовой манипуляцией и достижения вероятностных характеристик ошибочного приема, обеспечивающих приемлемое качество радиолинии для информационных систем.

Исследование эффективности алгоритмов адаптивной компенсации искажений за счет влияния ионосферы спутниковых радиолиний для более широкого класса цифровых сигналов, используемых в системах спутниковой связи (например, для цифровых сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией), является перспективным направлением исследований.

### **Финансирование**

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-07-00525).

## Литература

1. Колосов М.А., Арманд Н.А., Яковлев О.И. *Распространение радиоволн при космической связи*. Москва, Связь. 1969. 156 с.
2. Долуханов М.П. *Распространение радиоволн*. Москва, Гос. Издательство по вопросам связи и радио. 1960. 392 с.
3. Гинзбург В.Л. *Распространение электромагнитных волн в плазме*. Москва, Наука. 1960. 552 с.
4. 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.
5. Арманд Н.А. Распространение широкополосных сигналов в дисперсионных средах. *Радиотехника и электроника*. 2003. Т.48. №9. С.1045-1057.
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. Назаров Л.Е., Батанов В.В., Данилович Н.И. Анализ искажений сигналов с фазовой манипуляцией при распространении по ионосферным спутниковым линиям передачи. *Антенны*. 2017. №12. С.17-24.
8. Иванов Д.В., Иванов В.А., Михеева Н.Н., Рябов Н.В., Рябова М.И. Распространение коротковолновых сигналов с расширенным спектром в среде с нелинейной дисперсией. *Радиотехника и электроника*. 2015. Т.60, №11. С.1167-1177.
9. Назаров Л.Е., Батанов В.В., Зудилин А.С. Искажения радиоимпульсов при распространении по ионосферным линиям спутниковых систем связи. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2016. №2. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/feb16/1/text.pdf>.
10. Dvorak S.L., Dudley D.G. Propagation of Ultrawideband Electromagnetic Pulses Through Dispersive Media. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 1995. Vol.37. No.2. P.192-200.

11. Яковлев О.И., Якубов В.П., Урядов В.П., др. *Распространение радиоволн*. Москва, ЛЕНАНД. 2009. 496 с.
12. Дэвис К. *Радиоволны в ионосфере*. Москва, Мир. 1973. 502 с.
13. Крюковский А.С., Лукин Д.С., Кирьянова К.С. Метод расширенной бихарактеристической системы при моделировании распространения радиоволн в ионосферной плазме. *Радиотехника и электроника*. 2012. Т.57. №9. С. 1028-1034.
14. Скляр Б. *Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение*. Москва, Издательский дом “Вильямс”. 2003. 1104 с.
15. Батанов В.В., Назаров Л.Е. Алгоритм приема широкополосных сигналов при распространении по трансionoсферным линиям. *Физические основы приборостроения*. 2020. Т.9. №4(38). С.24–29. <https://doi.org/10.25210/jfop-2004-024029>.
16. Батанов В.В., Назаров Л.Е. Алгоритмы компенсации искажений сигналов при распространении по спутниковым ионосферным радиолиниям. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №6. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.6.1>
17. Bilitza D., McKinnell L.-A., Reinisch B., Fuller-Rowell T. The International Reference Ionosphere (IRI) today and in the future. *Journal of Geodesy*. 2011. Vol.85. P.909-920.
18. Назаров Л.Е., Батанов В.В. Вероятностные характеристики обнаружения радиоимпульсов при распространении по ионосферным линиям передачи спутниковых систем связи. *Радиотехника и электроника*. 2017. Т.62. №9. С.866-874.
19. Shi X. *Blind Signal Processing. Theory and Practice*. Shanghai and Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2011. 368 p.

**Для цитирования:**

Батанов В.В., Назаров Л.Е. Алгоритм адаптивной компенсации фазо-частотных искажений широкополосных сигналов при распространении по трансionoсферным радиолиниям. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.8.4>