

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.10.2>

УДК: 621.391.01

## КОМПЕНСАЦИЯ ИСКАЖЕНИЙ СИГНАЛОВ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ПО ТРАНСИОНОСФЕРНЫМ РАДИОЛИНИЯМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЛОБАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ЗЕМНОЙ ИОНОСФЕРЫ

Л.Е. Назаров

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал  
141190, Фрязино, пл. Введенского, 1

Статья поступила в редакцию 29 августа 2022 г.

**Аннотация.** Приведено описание искажений комплексных огибающих цифровых сигналов при их распространении по транссионосферным радиолиниям, действие которых эквивалентно линейной фильтрации. Показано, что искажения сигналов за счет дисперсионных свойств земной ионосферы обуславливают возникновение интерференционных помех, снижающих надежность передачи информации. Отмечено, что действие методов обработки цифровых сигналов при приеме, снижающих искажающее влияние интерференционных помех, заключается в формировании линейного фильтра с инверсным коэффициентом передачи относительно транссионосферной радиолинии. Рассматривается метод формирования обратного фильтра с использованием глобальной модели земной ионосферы Клобушара, разработанной и интенсивно используемой в спутниковой навигационной системе GPS для повышения точности навигационных измерений. Дано детальное описание этого метода, основанного на оценивании полного электронного содержания транссионосферной радиолинии с использованием рассматриваемой модели Клобушара. Определены ограничения при применении

рассматриваемого метода, обусловленные ограниченностью пространственной орбитальной группировки системы GPS, а также временной нестационарностью трансionoсферных радиолиний.

**Ключевые слова:** трансionoсферные радиолинии, искажения сигналов, модель Клобушара, интерференционные помехи, компенсация помех.

**Финансирование:** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №20-07-00525).

**Автор для переписки:** Назаров Лев Евгеньевич, [levnaz2018@mail.ru](mailto:levnaz2018@mail.ru)

## Введение

Цифровые сигналы при распространении по трансionoсферным радиолиниям искажаются (изменяются комплексные огибающие сигналов) за счет влияния ионосферы Земли как дисперсионной среды [1-5]. Эти искажения порождают интерференционные межсимвольные и межканальные помехи в дополнение к тепловым аддитивным шумам. Интерференционные помехи снижают надежность передачи информации по рассматриваемым радиолиниям, разрушая при определенных их состояниях и при использовании класса цифровых сигналов с увеличением частотной эффективности нормальное функционирование спутниковых информационных систем [2-7].

Интерференционные помехи представляют случайный процесс, статистические характеристики которого (мощность, спектральная плотность мощности) зависят от физического состояния трансionoсферной радиолинии, от центральной частоты и частотной полосы сигналов, от солнечной активности. Особенностью данного типа помех по отношению к тепловому шуму является зависимость их мощности от мощности передаваемых сигналов [8]. Вследствие этого невозможно обеспечить снижение искажающего влияния этих помех путем увеличения мощности передающих устройств.

Актуальной является проблема разработки методов приема цифровых сигналов, снижающих искажающее действие рассматриваемых интерференционных помех [7,9,10].

## 1. Постановка задачи

Распространение сигналов по трансферным радиолиниям представляется решением волнового уравнения относительно электрического поля  $\vec{E}(\vec{r}, f)$  для плоской электромагнитной волны с частотой  $f$ . В изотропном случае без учета магнитного поля Земли и при нормальном падении волны на непоглощающую среду с неоднородной диэлектрической проницаемостью  $\vec{\varepsilon}(\vec{r}, f)$  (распространение волны по оси  $z$ ) волновое уравнение имеет скалярный вид [2,10,11]

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

здесь  $k = 2\pi f/c$  – волновое число;  $c$  – скорость света в свободном пространстве.

При выполнении условия  $\frac{d\varepsilon(z, f)}{dz} \lambda \ll 1$  ( $\lambda$  – длина волны) решение уравнения (1) задается приближением геометрической оптики [2]

$$E(z, f) = \operatorname{Re} \left( \dot{E}(0, f) \exp \left( -jk \int_0^z n(x, f) dx \right) \right). \quad (2)$$

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

Для цифровых сигналов решение уравнения (1) является более сложным по отношению к (2). В этом случае сигналы представляются суммой спектральных монохроматических сигналов, при распространении каждый приобретает дополнительное фазовое смещение и изменение амплитуд за счет дисперсионных и поглощающих свойств ионосферы Земли [8]. Фазовые и амплитудные вариации спектральных составляющих обуславливают возникновение интерференционных помех.

Суть известных методов обработки цифровых сигналов при приеме, снижающих искажающее влияние этих помех, заключается в формировании инверсного линейного фильтра с обратным коэффициентом передачи относительно трансверсальной радиолинии как линейного фильтра [10]. При

формировании инверсного фильтра используются известные пилот-сигналы с целью идентификации радиолинии, а также применяются методы адаптивной обработки на основе информационных сигналов без использования пилот-сигналов (методы «слепой» обработки) [7,10].

Альтернативу этим направлениям представляют методы формирования инверсного фильтра с использованием глобальных моделей ионосферы Земли (модель Клобушара, модель NeQuik, др.), разработанных и интенсивно используемых в спутниковых навигационных системах [12,13].

Цель работы – дать описание метода компенсации искажений комплексных огибающих цифровых сигналов путем формирования обратного фильтра на основе глобальной модели земной ионосферы Клобушара [13].

## 2. Модели распространения сигналов по трансionoсферным радиолиниям

При выполнении теоретических исследований трансionoсферных радиолиний рассматривается модель земной ионосферы в виде сферически-симметричной среды с неоднородной вещественной диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon(z, f)$ , т.е. поглощение радиоволн полагается малым и рассматриваются лишь фазо-частотные искажения комплексных огибающих цифровых сигналов при их распространении [1,14-18].

Известные методы анализа исследуемых искажений сигналов можно отнести к двум общим классам [2]. В первый класс входят методы описания сигналов на входе приемного устройства  $\hat{s}(t)$  во временной области с использованием импульсной характеристики трансionoсферной радиолинии, действие которой эквивалентно линейной фильтрации [19].

Во второй класс входят методы описания сигналов  $\hat{s}(t)$  в частотной области. В этом случае сигналы  $\hat{s}(t)$ , соответствующие передаваемым сигналам  $s(t)$ , задаются соотношением [2,4,6]

$$\hat{s}(t) = \operatorname{Re} \left( \int_{-\infty}^{\infty} \dot{S}(f) \dot{H}(z, f) \exp(-j2\pi ft) df \right). \quad (3)$$

здесь  $\dot{S}(f)$  – частотный спектр сигнала  $s(t)$ ;  $H(z, f) = \exp(j2\pi f \tau(z, f))$  – коэффициент передачи трансферной радиолнии;

$\tau(z, f) = \int_0^z \frac{dx}{c_\phi(x, f)}$  – фазовое время распространения гармонического сигнала с частотой  $f$  вдоль лучевой линии АВ (сплошная линия АВ на рисунке 1, поясняющем схему радиолнии);  $c_\phi(x, f) = c/n(x, f)$  – фазовая скорость [11,14].

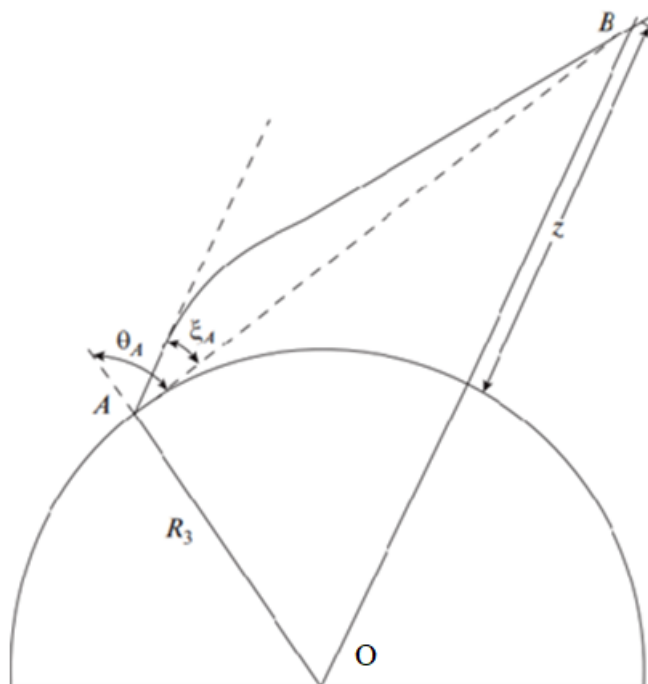


Рис. 1. Распространение сигналов по спутниковой ионосферной линии

Фазовое время  $\tau(z, f)$  вычисляется с использованием соотношения [10]

$$\tau(z, f) = \int_0^z \frac{n(x, f)(R_3 + x)dx}{c_\phi \sqrt{n^2(x, f)(R_3 + x)^2 - (n(0, f)R_3 \sin(\theta_A - \xi_A))^2}}. \quad (4)$$

здесь  $R_3$  – радиус Земли;  $\theta_A$  – видимый зенитный угол;  $\xi_A$  – угловая поправка к  $\theta_A$ , учитывающая рефракцию распространения электромагнитных волн.

При упрощающем условии быстрого снижения электронной плотности  $N_y(z)$  от ее максимального значения  $N_M$  без учета угловой поправки  $\xi_A$

вследствие ее малого значения и для углов  $\theta_A$ , удовлетворяющих условию

$$\cos(\theta_A) \gg \sqrt{\frac{e^2 N_M}{\pi f^2 m}}, \text{ известно приближение [1]}$$

$$\tau(z, f) = \frac{4.03 \cdot 10^7}{cf^2} \frac{(R_3 + z_M)}{\sqrt{(R_3 + z_M)^2 - (R_3 \sin \theta_A)^2}} \int_0^z N_3(x) dx + L_{AB} / c. \quad (5)$$

Интегрирование в (5) производится по линии СВ (рис.1);  $z_M = 300...350$  км – высота, на которой достигается максимальное значение электронной плотности  $N_M$ ;  $e, m$  – заряд и масса электрона (система СГС). Для значения  $N_M = 3.5 \cdot 10^6$  см<sup>-3</sup> и  $f = 4 \cdot 10^8$  Гц (*P*-частотный диапазон) приближение (5) удовлетворяет приведенным условиям при  $\theta_A < 70^0$ .

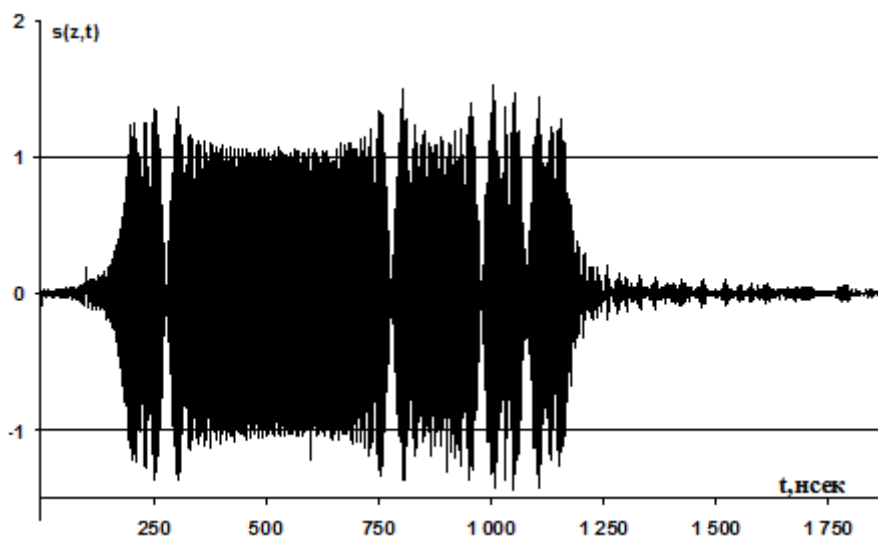
Расстояние линии  $L_{AB}$  (штриховая линия АВ на рисунке 1) задается соотношением

$$L_{AB} = \sqrt{(R_3 + z)^2 - R_3^2 \sin^2(\theta_A)} - R_3 \sin(\theta_A). \quad (6)$$

Вид искаженного сигнала  $\hat{s}(t)$  определяется вычислением (3) для значений коэффициента передачи  $\dot{H}(z, f)$  в частотном диапазоне сигналов  $\Delta F$ . На рис.2 приведен фрагмент искаженного сигнала  $\hat{s}(t)$  [4]. Передаваемый сигнал  $s(t)$  – последовательность радиоимпульсов с фазовой манипуляцией и с огибающей в виде меандра, центральная частота  $f = 4 \cdot 10^8$  Гц, длительность радиоимпульсов  $T = 100$  нс (частотная полоса  $\Delta F = 20$  МГц), зенитный угол  $\theta_A = 0$  и  $\theta_A = 60^0$ . По оси абсцисс отложено время относительно распространения в свободном пространстве. Видны искажения комплексной огибающей и временное рассеяние составляющих радиоимпульсов, порождающие интерференционные помехи. Анализ показывает, что для 16-ти позиционной фазовой манипуляции радиоимпульсов наличие этих интерференционных помех обуславливает нарушение работы информационных спутниковых систем – увеличение мощности передающих устройств не

уменьшает вероятности ошибки на сигнальный символ относительно асимптотического значения 0.01 [7].

а)



б)

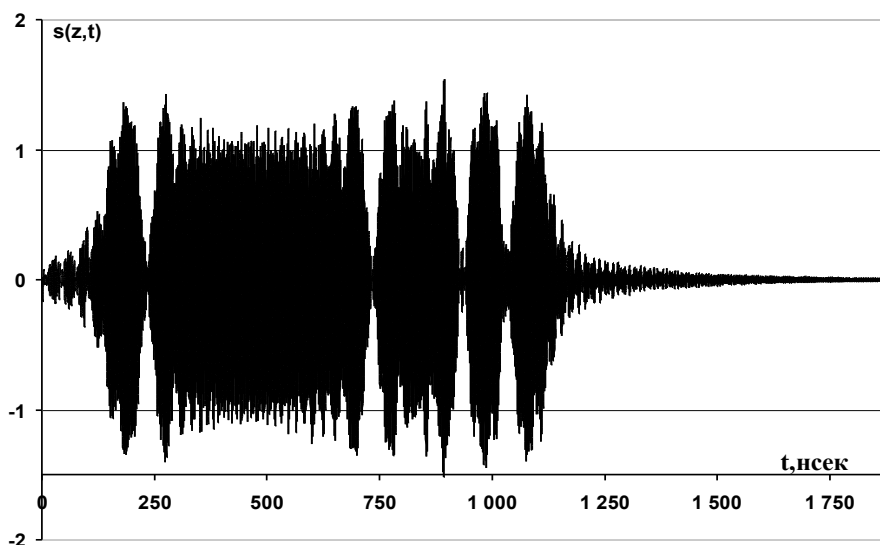


Рис. 2. Вид сигнала на выходе ионосферной радиолинии: а)  $\theta_A=0$ ; б)  $\theta_A=60^0$

Инверсный фильтр для трансionoсферной радиолинии, включение которого при приеме цифровых сигналов компенсирует влияние интерференционных помех, задается коэффициентом передачи  $\dot{H}^{-1}(z, f) = \exp(-j\varphi(z, f))$ , здесь фаза  $\varphi(z, f) = 2\pi f\tau(z, f)$ .

Результирующий сигнал  $s_r(t)$  с учетом инверсного фильтра определяется соотношением [4,7]

$$s_r(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \dot{Y}(f) H^{-1}(z, f) \exp(j2\pi f t) df. \quad (7)$$

здесь  $\dot{Y}(f)$  – частотный спектр реализации  $y(t)$  на входе приемного устройства.

Из соотношения (5) следует, что для вычисления параметра  $\tau(z, f)$  при формировании обратного фильтра необходимо знание относительно полного электронного содержания (ПЭС)  $\alpha_{\text{ПЭС}}$

$$\alpha_{\text{ПЭС}} = \int_0^z N_o(x) dx. \quad (8)$$

Для оценивания  $\alpha_{\text{ПЭС}}$  применяются методики на основе двухчастотных пилот-сигналов [4,7,9]. Ниже для решения этой задачи дается описание альтернативной методики, которая основана на использовании глобальной одночастотной модели Клобушара земной ионосферы, разработанной для повышения точности измерений навигационной системы GPS [13].

### 3. Глобальная одночастотная модель земной ионосферы Клобушара

Глобальная одночастотная модель земной ионосферы Клобушара разработана для коррекции временных задержек  $\Delta\tau_{\text{и}}$  за счет различия групповой скорости при распространении сигналов по трансionoсферной радиолинии по отношению к групповой скорости распространения в свободном пространстве [13].

Алгоритм оценки  $\Delta\tau_{\text{и}}$  при использовании этой модели включает выполнение следующих шагов [13].

Инициализация. Задаются входные данные:

- долгота  $\psi_{\text{ПР}}$  и широта  $\lambda_{\text{ПР}}$  приемной наземной станции;
- угол места  $E_{\text{КА}}$  и азимут  $A_{\text{КА}}$  космического аппарата GPS;
- время  $T_{\text{GPS}}$  (сек) в формате всемирного времени UT;
- коэффициенты  $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  и  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ , передаваемые в альманахе

навигационных сообщений либо по наземным линиям в формате REXIX [20].



Шаг 1. Вычисляется угол  $\varphi = \frac{0.0137}{E_{KA} + 0.11} - 0.022$ .

Шаг 2. Вычисляется значение ионосферной широты  $\psi_l = \psi_{IP} + \varphi \cos(A_{KA})$ .

Если  $\psi_l > 0.416$ , то  $\psi_l = 0.416$ . Если  $\psi_l < -0.416$ , то  $\psi_l = -0.416$ .

Шаг 3. Вычисляется значение ионосферной долготы

$$\lambda_l = \lambda_{IP} + \varphi \sin(A_{KA}) / \cos(\psi_l).$$

Шаг 4. Вычисляется геомагнитная долгота

$$\psi_m = \psi_l + 0.064 \cos(\lambda_l - 1.617).$$

Шаг 5. Вычисляется локальное время  $t = 4.32 \cdot 10^4 \lambda_l + T_{GPS}$ . Если  $t > 86400$ , то  $t > t - 86400$ . Если  $t < 0$ , то  $t > t + 86400$ .

Шаг 6. Вычисляется коэффициент склонения  $F = 1.0 + 16.0(0.53 - E_{KA})$

Шаг 7. Оценивается коррекция временной задержки  $\Delta\tau_{и}$

$$\Delta\tau_{и} = F \left( 5 \cdot 10^{-9} + \sum_{n=0}^3 \alpha_n \psi_m^n (1 - x^2 / 2 + x^4 / 24) \right),$$

$$x = \frac{2\pi(t - 50400)}{\sum_{n=0}^3 \beta_n \psi_m^n}.$$

здесь в соответствии с соотношением (5)

$$\Delta\tau_{и} = \frac{4.03 \cdot 10^7}{cf^2} \frac{(R_3 + z_M)}{\sqrt{(R_3 + z_M)^2 - (R_3 \sin \theta_A)^2}} \int_0^z N_3(x) dx.$$

#### 4. Применение глобальной модели земной ионосферы для компенсации искажений сигналов

Приведенная процедура дает возможность вычислить параметр  $\Delta\tau_{и}$  для несущей частоты  $f_{L1} = 1.575$  ГГц навигационной системы GPS [13]. На основе величин  $\Delta\tau_{и}$ ,  $f_{L1}$ , видимого зенитного угла  $\theta_{A,GPS}$  и использования соотношения (5), можно оценить значение  $\alpha_{ПЭС}$

$$\alpha_{ПЭС} = \frac{\Delta\tau_{и}}{4.03 \cdot 10^7 \frac{(R_3 + z_M)}{cfL1 \sqrt{(R_3 + z_M)^2 - (R_3 \sin \theta_{A,GPS})^2}}}. \quad (9)$$

Расстояние  $L_{AB,GPS}$  в дополнение к (6) также может быть вычислено с использованием соотношения

$$L_{AB,GPS} = \sqrt{(R_3 + H_{GPS})^2 + R_3^2 - 2(R_3 + H_{GPS})R_3 \cos(\vartheta)}. \quad (10)$$

здесь  $H_{GPS}$  – высота КА GPS;  $\vartheta$  – угол  $\angle AOB$  (рис. 1).

Для приближения сферичности Земли можно записать выражение относительно угла  $\vartheta = 90^0 - E_{КА}$ .

Угол  $\vartheta$  также можно определить с использованием соотношения

$$\cos(\vartheta) = \frac{(\vec{r}_{GPS} \vec{r}_{ПР})}{|\vec{r}_{GPS}| |\vec{r}_{ПР}|}. \quad (11)$$

здесь  $\vec{r}_{ПР}$  и  $\vec{r}_{GPS}$  – векторы  $OA$  и  $OB$  в декартовой системе координат, связанные известными соотношениями с значениями  $R_3, H_{GPS}, \psi_{ПР}, \lambda_{ПР}, E_{КА}, A_{КА}$ , определенными в сферической системе координат;  $|\vec{r}_{GPS}|, |\vec{r}_{ПР}|$  – нормы векторов;  $(\vec{r}_{GPS} \vec{r}_{ПР})$  – операция скалярного произведения векторов [20].

Соотношения (9) - (11) определяют связь углов  $\theta_{A,GPS}$  и  $\vartheta$ .

Полученное значение  $\alpha_{ПЭС}$  и соотношение (5) дают возможность оценить временные задержки  $\tau(z, f)$  в частотной полосе  $\Delta F$  цифровых сигналов и сформировать инверсный фильтр  $\dot{H}^{-1}(z, f)$  для трансферной радиолинии.

Пример расчета временной задержки сигналов  $\Delta\tau_{и}$  при распространении по трансферной радиолинии с использованием модели Клобушара приведен в [13] для пространственных координат приемной наземной станции и космического аппарата GPS  $\psi_{ПР} = 40^0$  с.ш.,  $\lambda_{ПР} = 100^0$  з.д.,  $E_{КА} = 20^0$ , азимут  $A_{КА} = 210^0$ . Параметры модели Клобушара  $\alpha_0 = 3.82 \times 10^{-8}$ ,  $\alpha_1 = 1.49 \times 10^{-8}$ ,

$$\alpha_2 = -1.79 \times 10^{-7}, \quad \alpha_3 = 0, \quad \beta_0 = 1.43 \times 10^5, \quad \beta_1 = 0, \quad \beta_2 = -3.28 \times 10^5, \\ \beta_3 = 1.13 \times 10^5.$$

Для этих параметров модели  $\Delta\tau_{\text{и}}$  достигает 77.6 нс [13], соответствующее значение видимого зенитного угла  $\vartheta = 70^\circ$  и значение  $\alpha_{\text{ПЭС}}$ , вычисленное с использованием соотношения (9), равно  $6.48 \times 10^{13}$  эл/см<sup>2</sup>.

Приведенная методика имеет следующие основные ограничения.

Во-первых, значения  $\alpha_{\text{ПЭС}}$ , вычисленные с использованием (9)-(11), соответствуют высоте спутника  $z = H_{GPS}$  ( $\approx 20000$  км) [20]. На рис. 3 приведены зависимости  $\alpha_{\text{ПЭС}}$  (ночное время (кривая 1) и дневное время (кривая 2)) от высоты  $z$ , вычисленные с использованием однослойной двухпараметрической модели высотного профиля электронной плотности [4,14]. Видно практически постоянное значение  $\alpha_{\text{ПЭС}} = 10^{13}$  эл/см<sup>2</sup> для  $z > 1100$  км (ночное время) и  $\alpha_{\text{ПЭС}} = 4 \cdot 10^{13}$  эл/см<sup>2</sup> для  $z > 1400$  км (дневное время), эти значения совпадают с значениями ПЭС для радиолиний навигационной системы GPS. Вследствие этого изложенная методика формирования фильтра с инверсным коэффициентом передачи  $\dot{H}^{-1}(z, f)$  с целью снижения искажающего влияния земной ионосферы корректна для приведенных высот с нижними границами трансионосферной радиолинии.

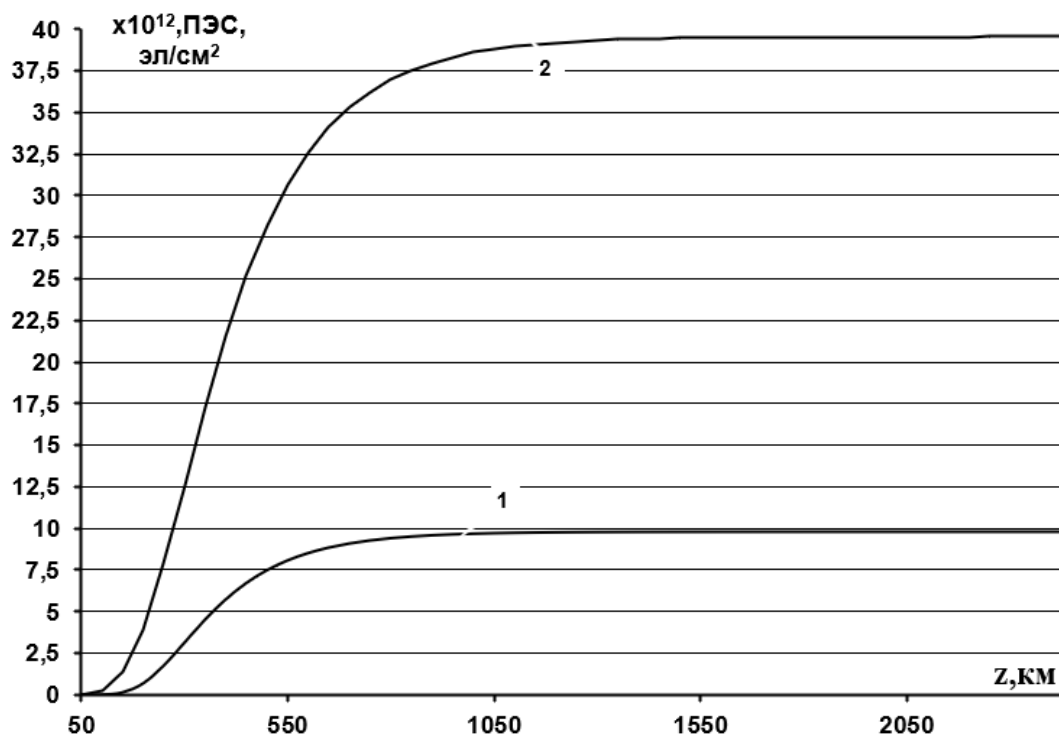


Рис. 3. Модельные зависимости  $\alpha_{ПЭС}$  от высоты  $z$  трансионосферной радиолинии: 1 – ночное время; 2 – дневное время

Во-вторых, входные данные относительно угла места  $E_{КА}$  и азимута  $A_{КА}$  космического аппарата GPS соответствуют его орбитальному движению и зависят от времени  $T_{GPS}$ . Таким образом, значения  $\alpha_{ПЭС}$  для задаваемого времени  $T_{GPS}$  характеризуются пространственной дискретностью, соответствующей орбитальному размещению аппаратов спутниковой системы GPS [21]. Для оценки  $\alpha_{ПЭС}$  в произвольной пространственной точке целесообразно производить аппроксимацию, например, использовать значение ПЭС для аппарата с наименьшей метрикой относительно анализируемой точки с учетом первого ограничения. Решение этой задачи также может быть основано на совместном использовании информации других глобальных моделей ионосферы Земли, например, информации модели NeQuick [12].

В-третьих, характеристики земной ионосферы представляют случайный и в общем случае нестационарный процесс. Время стационарности трансионосферных радиолиний не превышает 1...2 с [7]. Вместе с тем исследования показали, что модель Клобушара позволяет даже при этом условии

скомпенсировать искажающее влияние ионосферы, улучшить качество трансionoсферных радиолиний и повысить точность навигационных измерений [20,21].

## **Заключение**

Приведено описание искажений фазо-частотных характеристик комплексных огибающих цифровых сигналов при их распространении по трансionoсферным радиолиниям, действие которых эквивалентно линейной фильтрации. Искажения сигналов за счет дисперсионных свойств земной ионосферы обуславливают возникновение интерференционных помех, снижающих надежность передачи информации и при определенных характеристиках радиолинии и при использовании класса цифровых сигналов с увеличением частотной эффективности разрушающих работу спутниковых информационных систем. Суть методов обработки цифровых сигналов при приеме, снижающих искажающее влияние интерференционных помех, заключается в формировании обратного линейного фильтра с инверсным коэффициентом передачи относительно трансionoсферной радиолинии. При формировании обратного фильтра используются пилот-сигналы, а также применяются методы «слепой» адаптивной обработки на основе информационных сигналов без использования пилот-сигналов.

В статье развивается альтернативное направление, представляющее метод формирования обратного фильтра с использованием глобальной модели земной ионосферы Клобушара, разработанной и интенсивно используемой в спутниковой навигационной системе GPS для повышения точности навигационных измерений. Дано детальное описание этого метода, основанного на оценивании полного электронного содержания трансionoсферной радиолинии с использованием рассматриваемой модели Клобушара.

Определены ограничения при применении рассматриваемой модели Клобушара, обусловленные ограниченностью пространственной орбитальной

группировки системы GPS, а также временной нестационарностью трансионосферных радиолиний.

**Финансирование:** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (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. Гинзбург В.Л. *Распространение электромагнитных волн в плазме*. Москва, Наука. 1960. 552 с.
3. Dvorak S.L., Dudley D.G. Propagation of Ultrawideband Electromagnetic Pulses Through Dispersive Media. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 1995. V.37. №2. P.192-200.
4. 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.
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. Вероятностные характеристики обнаружения радиоимпульсов при распространении по ионосферным линиям передачи спутниковых систем связи. *Радиотехника и электроника*. 2017. Т.62. №9. С.866-874.
7. Батанов В.В., Назаров Л.Е. Алгоритм компенсации искажений широкополосных сигналов при распространении по спутниковым ионосферным радиолиниям. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2022. Т.62. №4. С.528-536. <https://doi.org/10.31857/S0016794022040058>
8. Скляр Б. *Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение*. Москва, Издательский дом “Вильямс”. 2003. 1104 с.

9. Батанов В.В., Назаров Л.Е. Алгоритм приема широкополосных сигналов при распространении по трансионосферным линиям. *Физические основы приборостроения*. 2020. Т.9. №4(38). С.24-29. <https://doi.org/10.25210/jfop-2004-024029>
10. Яковлев О.И., Якубов В.П., Урядов В.П., др. *Распространение радиоволн*. Москва, ЛЕНАНД. 2009. 496 с.
11. Дэвис К. *Радиоволны в ионосфере*. Москва, Мир. 1973. 502 с.
12. Electron density models and data for transionospheric radio propagation. *Series of ITU-R Reports: Series P - Radiowave propagation*. 2019. Rep. ITU-R P.2297-1. P.1-30.
13. Klobuchar J.A. Ionospheric Time-Delay Algorithm for Single Frequency GPS Users. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 1987. V.23. №3. P.325-331.
14. Долуханов М.П. *Распространение радиоволн*. Москва, Гос. Издательство по вопросам связи и радио. 1960. 392 с.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. Bilitza D., McKinnell L.-A., Reinisch B., Fuller-Rowell T. The International Reference Ionosphere (IRI) today and in the future. *Journal of Geodesy*. 2011. V.85. P.909-920.

19. 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.
20. ГЛОНАСС. *Принципы построения и функционирования*. Под ред. Перова А.И., Харисова В.Н. Москва, Радиотехника. 2005. 688 с.
21. *Understanding GPS: Principles and Applications*. Editor by Kaplan E.D., Hegarty E. Norwood, Artech House Inc. 2006. 703 p.

**Для цитирования:**

Назаров Л.Е. Компенсация искажений сигналов при распространении по трансionoсферным радиолиниям с использованием глобальной модели земной ионосферы. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2022. №10. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.10.2>