

УДК 621.391.01

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИОНОСФЕРНЫХ И ТРОПОСФЕРНЫХ ЛИНИЙ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ

Л. Е. Назаров, В. В. Батанов, З. Т. Назарова

Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН,

Фрязинский филиал

Статья получена 8 сентября 2015 г.

Аннотация. В статье рассмотрен ряд моделей линий передачи, включающих влияние ионосферы и тропосферы на распространение сигналов. Тропосфера и ионосфера определяют временную задержку прохождения сигналов вследствие отличия скорости распространения радиоволн от скорости света в свободном пространстве и явления рефракции, дополнительное доплеровское смещение частоты.

Ключевые слова: ионосфера, тропосфера, рефракция, временная задержка.

Abstract. This paper presents description for models of tropospheric and ionospheric satellite communication channels. These models deals with radio wave signal propagation effects in atmosphere including refraction, Doppler frequency shift and time delay.

Key words: ionosphere, troposphere, refraction, time delay.

Введение

Характеристики и свойства линий передачи, модели которых используются при проектировании систем связи, являются базовыми для разработки оптимальных (либо близких к оптимальным) сигнальных конструкций с использованием схем помехоустойчивого кодирования и алгоритмов их обработки в приемных устройствах [1-5]. При распространении по рассматриваемым в настоящей статье линиям спутниковых систем связи (системы фиксированной, мобильной, персональной связи) сигналы подвергаются действию искажающих факторов, основными из которых

являются следующие [6-8]:

- влияние атмосферы (ионосфера, тропосфера);
- многолучевость за счет рассеяния, дифракции и отражения сигналов;
- доплеровское смещение и уширение спектра сигналов;
- нестационарность линий передачи;
- нелинейность передающего устройства;
- наличие аддитивного шума.

Созданию и развитию класса моделей относительно действия приведенных факторов посвящен ряд работ [1,2,8]. Использование этих моделей дает возможность определить значения энергетических потерь при распространении сигналов и оценить эффективность проектируемых спутниковых систем связи (оценивание вероятностных характеристик, целостности связи) [2,9,10].

В статье рассмотрен ряд моделей линий передачи, включающих влияние ионосферы и тропосферы на распространение сигналов. Тропосфера и ионосфера определяют задержку прохождения сигналов вследствие отличия скорости распространения радиоволн от скорости света в свободном пространстве и явления рефракции [8]. Кроме того, из-за рефракции происходит изменение доплеровского смещения несущей частоты и тактовой частоты сигналов с цифровой манипуляцией. Случайные изменения физических свойств тропосферы и ионосферы обуславливают вариации фаз (частот) и амплитуд радиосигналов, что определяет важный параметр линий передачи - их временную стационарность. С использованием рассмотренных моделей произведены численные оценки этих характеристик линий передачи для различных частотных диапазонов.

1. Постановка задачи

В соответствии с Регламентом радиосвязи для каналов спутниковых систем связи выделены P-, L-, S-, Ka- частотные диапазоны (длины волн 1...100 см), интенсивно осваиваются другие частотные диапазоны [11]. При распространении радиоволн этих диапазонов, использовании ориентированных

высокоточных антенн пренебрегают влиянием поверхности Земли и учитывают влияние тропосферы и ионосферы на распространение радиоволн, которое выражается в следующих явлениях:

- лучевые линии отклоняются на угол рефракции;
- увеличивается время распространения сигналов между передатчиком и приемником по отношению к времени распространения в вакууме;
- происходят временные изменения амплитуды, фазы, частоты колебаний, определяющие стационарность линий передачи;
- происходит поворот плоскости поляризации радиоволн.

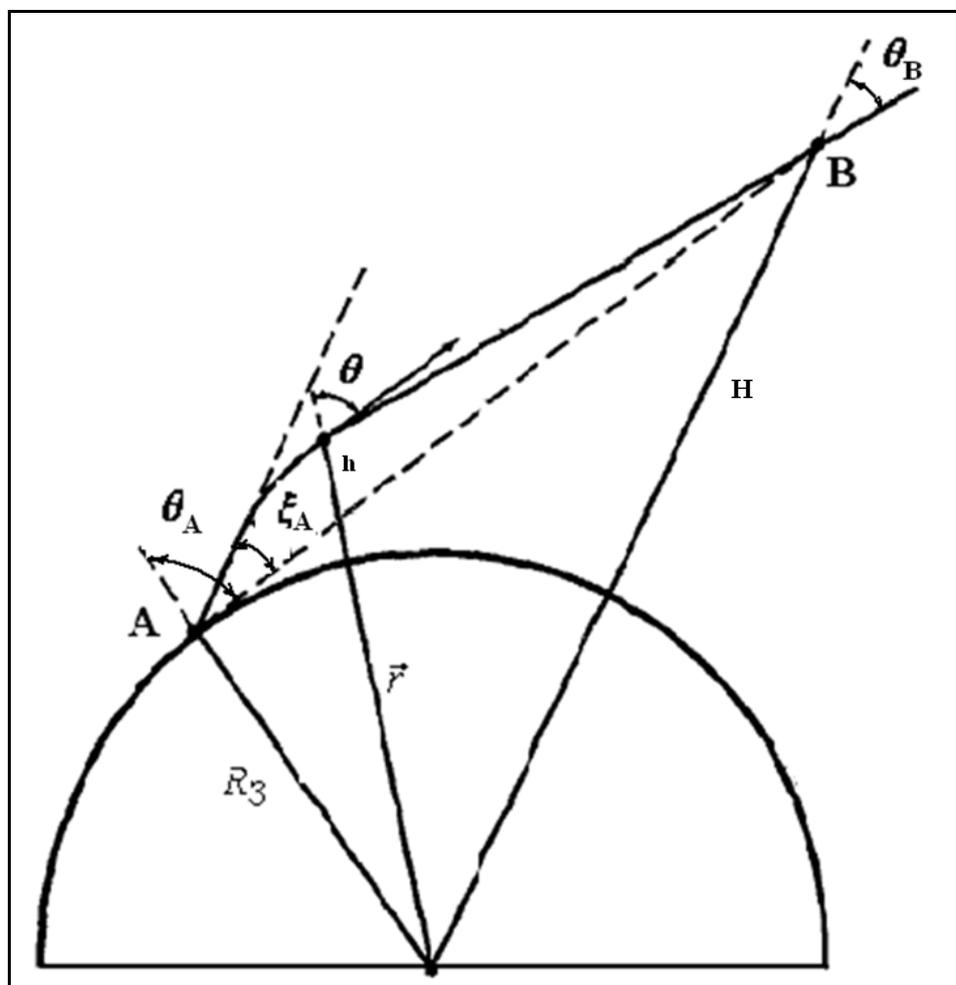


Рис.1. Схема распространения радиоволн при передаче сигналов земной станцией (точка А) и приеме сигналов спутником (точка В).

Отмеченные факты влияния тропосферы и ионосферы определяются пространственным распределением и временными вариациями коэффициента преломления сред $n(\vec{r}, t) = 1 + N(\vec{r}, t)$ ($N(\vec{r}, t)$ - приведенный коэффициент преломления). Для анализа распространения сигналов рассматриваемых частотных диапазонов применяется теория лучевого представления, которая дает достаточно точные решения волнового уравнения [8]. В этом случае для модели плавно-неоднородной сферически симметричной среды закон преломления представляется соотношением [7,8]

$$n(h)(R_3 + h) \sin \theta = const . \quad (1)$$

Здесь R_3 - радиус Земли, h - высота над земной поверхностью, θ - угол между направлением лучевой линии и радиусом вектором \vec{r} . На рис.1 приведена схема распространения радиоволн при передаче сигналов земной станцией (точка А) и приеме сигналов спутником (точка В).

На основе соотношения (1) оцениваются параметры моделей линии передачи «земная станция - спутник»:

- углы рефракции ξ , определяющие энергетические потери при передаче и приеме сигналов за счет отклонения диаграммы направленности антенн земной станции и спутника;

- дополнительное доплеровское смещение несущей частоты и тактовой частоты сигналов с цифровой манипуляцией;

- различие расстояния от передатчика до приемника вдоль луча распространения от истинного расстояния прямой видимости, обусловленное рефракцией лучевой линии;

- различие времени распространения вдоль луча и времени распространения вдоль линии прямой видимости со скоростью света в вакууме c_0 , определяемое тем, что существует различие этих путей распространения и отличие групповой скорости распространения в среде от c_0 .

Учет этих факторов требуется при разработке спутниковых систем связи с временным, кодовым, частотным разделением сигналов, а также при оценке

энергетических потерь за счет искажающего влияния рассматриваемых сред распространения [1].

Цель работы - рассмотреть методы оценивания приведенных факторов влияния ионосферы и тропосферы при распространении сигналов по спутниковым линиям передачи сигналов с использованием модельных описаний сред, привести примеры расчетов с использованием данных методов.

2. Методы вычисления параметров спутниковых линий за счет влияния ионосферы и тропосферы

Ниже приведены методы расчета рассмотренных выше параметров моделей линии передачи «земная станция - спутник».

Для оценивания угла рефракции ξ_A в точке А известен ряд аналитических выражений. В работе [7] даны выражения для оценивания ξ_A

$$\chi = \arccos\left(\frac{-L_{AB}^2 + R_3^2 + (R_3 + H)^2}{2R_3(R_3 + H)}\right), \quad (2)$$

$$\chi = \int_0^H \frac{n_0 R_3 \sin(\theta_A - \xi_A) dh}{(R_3 + h) \sqrt{(n(h)(R_3 + h))^2 - (n_0 R_3 \sin(\theta_A - \xi_A))^2}}. \quad (3)$$

Здесь n_0 - коэффициент преломления на высоте $h = 0$; θ_A - истинный зенитный угол направления на антенну спутника; H - высота спутника.

Более сложное выражение для оценки ξ_A , использующее градиент коэффициента преломления $n(h)$, приведено в [8]

$$\xi_A = - \int_0^H \frac{n_0 R_3 \sin(\theta_A - \xi_A)}{n(h) \left(n^2(h)(R_3 + h)^2 - (n_0 R_3 \sin(\theta_A - \xi_A))^2 \right)^{1/2}} \frac{dn(h)}{dh} dh. \quad (4)$$

Значение угла рефракции ξ_B для спутника в точке В определяется на основе соотношения (1)

$$\sin(\theta_B - \xi_B) = \frac{n_0 R_3 \sin(\theta_A - \xi_A)}{n(H)(R_3 + H)}. \quad (5)$$

Здесь θ_B - истинный зенитный угол линии ОВ.

Следует отметить, что с достаточной степенью точности результирующий угол рефракции ξ_A вычисляется как сумма углов рефракции за счет влияния тропосферы и ионосферы [7].

Угол рефракции ξ_A определяет энергетические потери $\Delta E_A = F_A^2(\xi_A)$ при передаче сигналов за счет отклонения диаграммы направленности антенны земной станции F_A от линии АВ. Подобная оценка энергетических потерь $\Delta E_B = F_B^2(\xi_B)$ вычисляется при приеме сигналов за счет отклонения диаграммы направленности антенны спутника F_B от линии ВА.

Угол рефракции ξ_B определяет дополнительное доплеровское смещение Δf_d несущей частоты f_0 (тактовой частоты сигналов с цифровой манипуляцией) относительно доплеровского смещения в вакууме

$$\Delta f_d = \left(\frac{(\vec{v} \cdot \vec{l}(AB))}{\lambda_0} - \frac{(\vec{v} \cdot \vec{l}(\xi_B))}{\lambda_B} \right). \quad (6)$$

Здесь λ_0 - длина волны в вакууме; λ_B - длина волны в точке В; \vec{v} - скорость спутника; $\vec{l}(AB)$ - единичный вектор, касательный к АВ; $\vec{l}(\xi_B)$ - единичный вектор, касательный к лучу распространения в точке В; $(\vec{x} \cdot \vec{y})$ - скалярное произведение \vec{x} и \vec{y} .

При решении кинематических задач радиотехническими методами (например, при определении расстояния до спутника либо при решении задач навигации), а также при вычислении характеристик ионосферных и тропосферных линий спутниковых систем связи (например, вычисление временных задержек) возникают ошибки оценивания метрических расстояний либо времени задержки. Эти ошибки обусловлены отличием групповой скорости распространения радиоволн $c_{гр}$ от скорости распространения в вакууме c_0 , а также искривлением луча относительно прямолинейного распространения в соответствии с (1). В приложениях влияние эффекта искривления полагается малым, в этом случае рассматривается различие

эффективного пути распространения $\Delta L_{\text{эфф}}$ вдоль луча АВ и вдоль прямой АВ определяется соотношением [7,8,9]

$$\Delta L_{\text{эфф}} = \int_0^H \left(\frac{c_0}{c_{\text{гр}}(h)} - 1 \right) dl. \quad (7)$$

Здесь $dl = \frac{n(h)(R_3 + h)dh}{\sqrt{n^2(h)(R_3 + h)^2 - (n_0 R_3 \sin(\theta_A - \xi_A))^2}}$.

Соответствующее различие времени распространения $\Delta \tau_{\text{эфф}}$ имеет вид

$$\Delta \tau_{\text{эфф}} = \frac{\Delta L_{\text{эфф}}}{c_0}. \quad (8)$$

Приближенное оценивание значений $\Delta \tau_{\text{эфф}}$ можно осуществить на основе значений $\Delta \tau(\theta_A = 0^0)$, вычисленных с использованием соотношения (8) в сочетании с корректирующими коэффициентами $k(\theta_A)$ [8]

$$\Delta \tau_{\text{эфф}}(\theta_A) = k(\theta_A) \Delta \tau_{\text{эфф}}(\theta_A = 0^0). \quad (9).$$

Корректирующие коэффициенты для тропосферы $k_{\text{тр}}(\theta_A)$ и ионосферы $k_{\text{ион}}(\theta_A)$ задаются соотношениями [8,12]

$$k_{\text{тр}}(\theta_A) = \cos^{-1}(\theta_A), \quad (10)$$

$$k_{\text{ион}}(\theta_A) = \left(1 - \left(\frac{R_3 \sin(\theta_A)}{R_3 + H} \right)^2 \right)^{-1/2}. \quad (11)$$

Выражение для ΔL с учетом искривления луча из-за рефракции радиоволн имеет вид

$$\Delta L = \int_0^H dl - L_{\text{AB}}. \quad (12)$$

Здесь L_{AB} - расстояние АВ, вычисляемое с использованием тригонометрических соотношений для треугольника ОАВ и угла θ_A .

Результирующее выражение для ΔL имеет вид

$$\Delta L = \int_0^H \frac{n(h)(R_3 + h)dh}{\left(n^2(h)(R_3 + h)^2 - (n_0 R_3 \sin(\theta_A - \xi_A))^2\right)^{1/2}} - L_{AB}. \quad (13)$$

Различие времени распространения задается соотношением

$$\Delta \tau = \int_0^H \frac{n(h)(R_3 + h)dh}{c_{\text{Гр}} \left(n^2(h)(R_3 + h)^2 - (n_0 R_3 \sin(\theta_A - \xi_A))^2\right)^{1/2}} - \frac{L_{AB}}{c_0}. \quad (14)$$

Здесь ξ_A - угол рефракции, вычисляемый с использованием (2)-(5).

3. Модели тропосферы

Значение N для модельного описания коэффициента преломления тропосферы $n(\vec{r})$ определяется ее параметрами: давлением P (миллибары), температурой T и влажностью W [6,7]

$$N = \frac{77.6}{T} \left(P + \frac{4810W}{T} \right) \cdot 10^{-6}. \quad (15)$$

Следует отметить отсутствие в (15) зависимости от частоты.

Модельное описание высотного профиля $N(h)$ задается выражением

$$N(h) = N_0 \exp(-bh). \quad (16)$$

Здесь h - высота над земной поверхностью. Вблизи земной поверхности параметр $N_0 = N(0)$ зависит от климатических и метеорологических условий и принимает значения в пределах $2.6 \cdot 10^{-4} \dots 4.6 \cdot 10^{-4}$. В нормальной тропосфере для средних широт градиент изменения $N(h)$ составляет $-4.0 \cdot 10^{-5} \text{ км}^{-1}$, то есть значения параметра $b = 0.087 \dots 0.154 \text{ км}^{-1}$ [7]. В практических приложениях значения параметров N_0 и b оцениваются по приземным значениям P, T, W .

Ряд более сложных моделей тропосферы приведен в работах [13,14].

4. Модели ионосферы

Ионосферой называют ионизированную область атмосферы на высоте более 60 км над земной поверхностью [6,7]. В качестве верхней границы ионосферы принимают область высот 15...20 тыс.км.

В результате экспериментальных исследований получены достаточно полные сведения о строении ионосферы и ее характеристиках [6,7,8]. На высоте 250...400 км имеется основной максимум ионизации, выше и ниже которого электронная плотность N_3 убывает. Область ниже основного максимума называется внутренней, а выше - внешней ионосферой. Пример типичного профиля электронной плотности ионосферы дан на рис.2 [7].

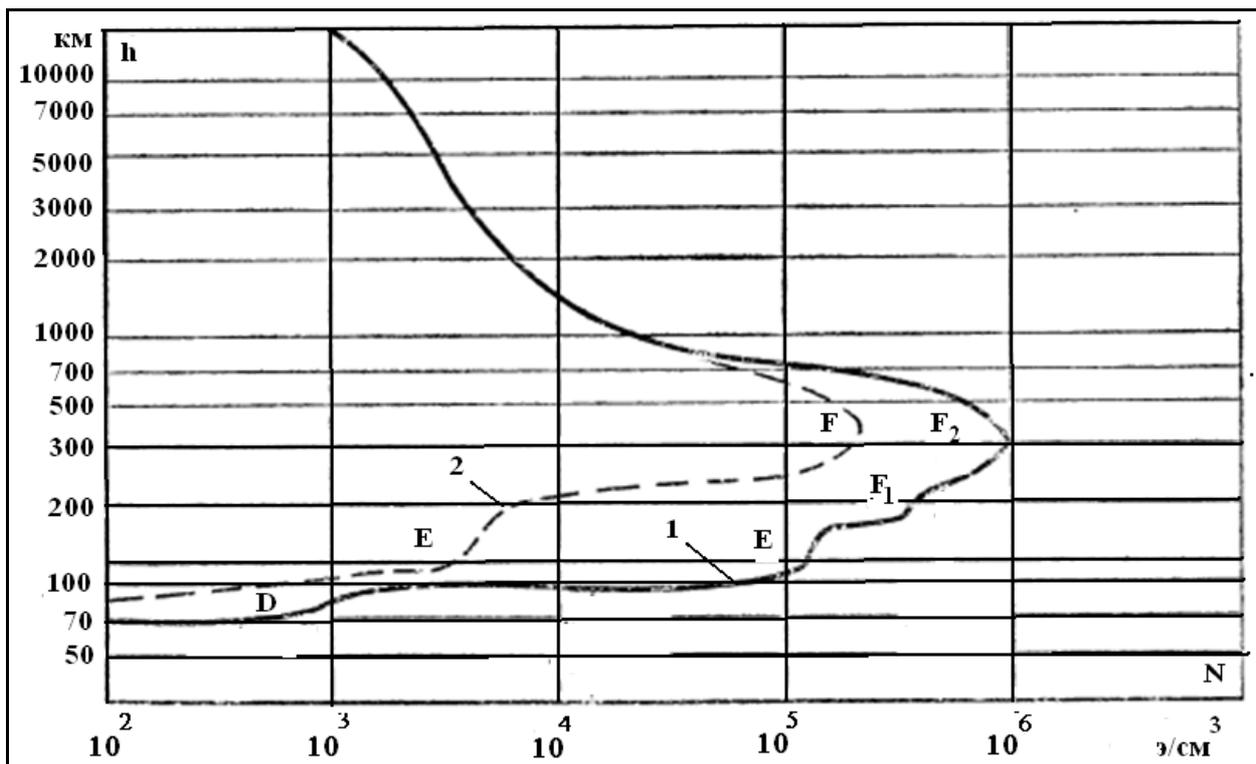


Рис.2. Профиль электронной плотности ионосферы (1 - днем, 2 – ночью).

Во внутренней ионосфере обычно существует ряд локальных максимумов электронной плотности, называемых слоями - D, E, F [6,7]. Эти слои характеризуются параметрами - максимумом электронной плотности $N_{\text{макс,э}}$; высотой нижней границы слоя h_0 ; полутолщиной слоя; коэффициентом рекомбинаций α ($\text{м}^3/\text{сек}$). Ниже дается общая характеристика этих параметров для слоев.

Слой D расположен на высоте 60...80 км, ночью слой исчезает. Электронная плотность не превышает $10^2...10^4$ эл/см³, число столкновений

достигает $\nu = 10^7$, коэффициент рекомбинации $\alpha = 10^{-5} \dots 10^{-7} \text{ м}^3 / \text{сек}$.

Слой E расположен на высоте 95...100 км, полутолщина составляет 15...20 км, электронная плотность $N_{\text{макс,э}} = 1.5 \cdot 10^5 \dots 4.0 \cdot 10^5 \text{ эл/см}^3$ днем и $N_{\text{макс,э}} = 5.0 \cdot 10^3 \dots 10^4 \text{ эл/см}^3$ ночью; число столкновений $\nu = 10^5$; коэффициент рекомбинации $\alpha = 10^{-7} \text{ м}^3 / \text{сек}$ днем и $\alpha = 10^{-8} \text{ м}^3 / \text{сек}$ ночью.

Слой F расположен на высоте 250...400 км. В зимнее время электронная плотность достигает $N_{\text{макс,э}} = 6.0 \cdot 10^5 \dots 2 \cdot 10^6 \text{ эл/см}^3$ днем и $N_{\text{макс,э}} < 2.5 \cdot 10^5 \text{ эл/см}^3$ ночью. Полутолщина слоя достигает 100...200 км.

Летом в дневное время слой F расщепляется на два слоя F_1, F_2 . Слой F_2 расположен на высоте 300...400 км, слой F_1 на высоте 200...230 км. Электронная плотность слоя F_2 достигает $N_{\text{макс,э}} = 4.0 \cdot 10^5 \dots 9 \cdot 10^5 \text{ эл/см}^3$, для слоя F_1 $N_{\text{макс,э}} = 2.0 \cdot 10^5 \dots 4 \cdot 10^5 \text{ эл/см}^3$. В ночное время существует лишь один слой на высоте 300 км с параметрами $N_{\text{макс,э}} < 2.5 \cdot 10^5 \text{ эл/см}^3$, $\nu = 10^3 \dots 10^4$, $\alpha = 3 \cdot 10^{-11} \dots 8 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 / \text{сек}$, полутолщина 100...200 км.

Выше основного максимума электронной плотности (слой F) электронная плотность падает, изменяясь в диапазоне высот 500...1000 км от $N_{\text{э}} = 10^6 \text{ эл/см}^3$ до $N_{\text{э}} = 10^4 \text{ эл/см}^3$. В диапазоне высот 1700...10000 км электронная плотность остается в пределах $(2 \dots 5) \cdot 10^3 \text{ эл/см}^3$, на высоте более 15000 км электронная плотность монотонно спадает и на высоте 20000 км достигает 10^3 эл/см^3 .

Разработке и развитию моделей профиля электронной плотности посвящены работы [6,7,15,16]]. Наиболее разработанными являются глобальные трехмерные физические модели, их принципы построения и входные параметры даны в работах [16,17,18].

Наиболее простая модель профиль электронной плотности ионосферы $N(h)$, используемая ниже для оценки характеристик линий передачи спутниковых систем связи, задается аналитическим соотношением [6]

$$N_{\text{э}}(h) = \sqrt{\frac{\gamma}{\alpha} \exp[-(\exp(b(h - h_{\text{макс,э}})) + bh)]}. \quad (17)$$

Здесь γ, b - параметры модели; α - коэффициент рекомбинации; $h_{\text{макс,э}}$ - высота над земной поверхностью, для которой достигается максимальное значение электронной плотности ионосферы.

При выполнении условия $2\pi f \gg \nu$ известно соотношение относительно диэлектрической проницаемости ионосферы ε [7]

$$\varepsilon = 1 - 80.8N_{\text{э}} / f^2. \quad (18)$$

В этом случае проводимостью ионосферы в исследованиях пренебрегают, то есть ионосфера полагается идеальным диэлектриком и для высоких частот справедливо соотношение $n(h) = 1 - 40.4N_{\text{э}}(h) / f^2$ [6,7].

5. Результаты оценивания характеристик линий передачи спутниковых систем связи

Для оценивания характеристик линий передачи спутниковых систем связи использовалась модель тропосферы с приведенным коэффициентом преломления $N(h)$ в виде (16), параметры модели N_0, b соответствовали приведенным в п.3 параметрам нормальной тропосферы для средних широт. Для ионосферы использовалась модель профиля электронной плотности $N(h)$ в виде (17), параметры модели γ, b соответствовали аппроксимации профиля $N(h)$ на рис.2 для дневного времени, $h_{\text{макс,э}} = 300$ км. Вычисление интегральных соотношений произведено с использованием численного метода Симпсона с повышенной точностью [19].

В таблице 1 приведены оценки углов рефракции $\xi_A^{(1)}$, $\xi_A^{(2)}$, вычисленные с использованием соотношений (3) и (4) соответственно, в зависимости от зенитного угла θ_A . Высота спутника $H = 400$ км, центральная частота $f_0 = 400$

МГц и $f_0 = 1.5$ ГГц. При увеличении зенитного угла θ_A значения углов рефракции ξ_A увеличиваются и при $\theta_A = 85^0$ достигают значений $\xi_A = 0.26^0 \dots 0.3^0$. Видно также, что основной вклад в рефракцию вносит тропосфера - влияние ионосферы существенно менее эффективно (примерно в 5-8 раз для $f_0 = 400$ МГц и в 70-120 раз для $f_0 = 1.5$ ГГц). Для значений центральной частоты $f_0 > 1.0 - 1.5$ ГГц влияние ионосферы на рефракцию можно считать относительно малым.

Таблица 1. Значения оценок углов рефракции $\xi_A^{(1)}$, $\xi_A^{(2)}$ в зависимости от зенитного угла θ_A (вычисление $\xi_A^{(1)}$, $\xi_A^{(2)}$ произведено с использованием (3) и (4) соответственно).

θ^0 , град	$H = 400$ км, $f_0 = 400$ МГц				$H = 400$ км, $f_0 = 1.5$ ГГц	
	Тропосфера		Ионосфера		Ионосфера	
	$\xi^{(1)}$, град	$\xi^{(2)}$, град	$\xi^{(1)}$, град	$\xi^{(2)}$, град	$\xi^{(1)}$, град	$\xi^{(2)}$, град
0	0	0	0	0	0	0
10	0.00460	0.00458	0.00166	0.0013	0.00012	0.00010
20	0.0096	0.0093	0.00343	0.0028	0.00024	0.00020
30	0.0151	0.0146	0.00541	0.0045	0.00039	0.00029
40	0.0220	0.0214	0.00781	0.0062	0.00056	0.00044
50	0.0312	0.0304	0.01093	0.0087	0.00078	0.00061
60	0.0450	0.0436	0.01541	0.0120	0.00109	0.00086
70	0.0710	0.0688	0.02261	0.0170	0.00161	0.00121
80	0.1410	0.1350	0.03513	0.0240	0.00249	0.00171
85	0.25303	0.2372	0.04318	0.0265	0.00306	0.00189

На рис.3 приведены зависимости угла рефракции $\xi_A^{(1)}$ за счет влияния ионосферы от высоты H спутника для центральной частоты $f_0 = 400$ МГц. Кривая 1 соответствует зенитному углу $\theta_A = 50^0$, кривая 2 зенитному углу

$\theta_A = 80^0$. Видно, что при $H = 800$ км наблюдается максимум рассматриваемой зависимости. Видно также, что при $H > 2000$ км угол рефракции практически не зависит от параметра H .

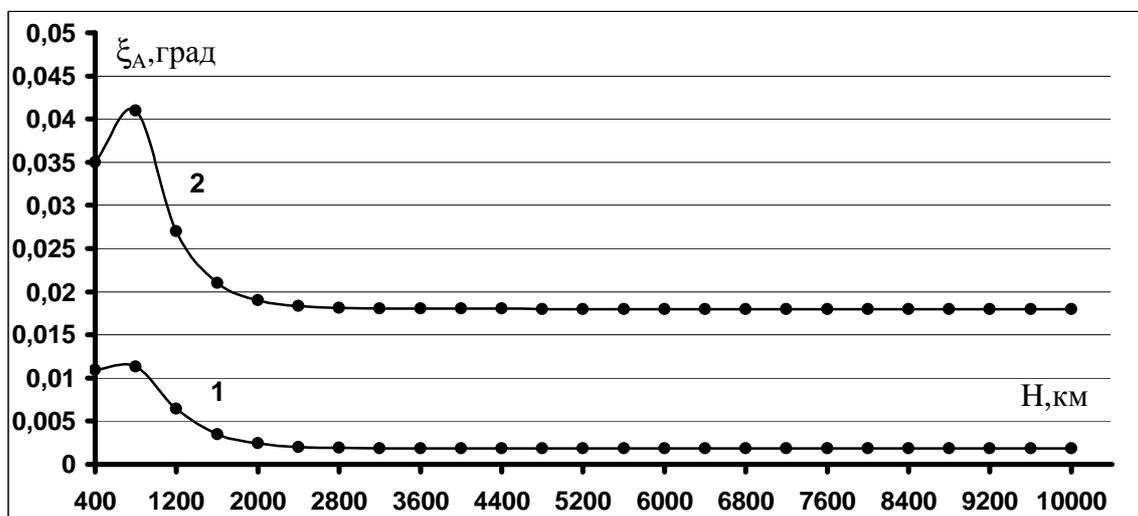


Рис.3. Зависимости угла рефракции $\xi_A^{(1)}$ за счет влияния ионосферы от высоты H спутника (центральная частота $f_0 = 400$ МГц): кривая 1 – зенитный угол $\theta = 50^0$; кривая 2 – зенитный угол $\theta = 80^0$.

В таблице 2 приведены оценки энергетических потерь ΔE_A для максимального угла рефракции $\xi_A = 0.3^0$ в зависимости от размера D прямоугольной апертуры антенны (центральная частота $f_0 = 400$ МГц, длина волны $\lambda = 0.75$ м). Здесь $\Delta E_A = \left(\frac{\sin(u)}{u}\right)^2$, $u = \pi D \sin(\xi_A) / \lambda$ [13]. Видно, что для апертуры $D \leq 10$ м энергетические потери не превышают 0.07 дБ.

Таблица 2. Оценки энергетических потерь ΔE_A в зависимости от размера D прямоугольной апертуры антенны (угол рефракции $\xi_A = 0.3^0$ $f_0 = 400$ МГц).

D , м	2	4	6	8	10
ΔE_A , дБ	-0.003	-0.011	-0.025	-0.044	-0.070

На рис.4 приведены оценки дополнительного доплеровского смещения Δf_d несущей частоты f_0 относительно доплеровского смещения в вакууме в зависимости от зенитного угла θ_A , вычисленные с использованием соотношения (6). Кривая 1 соответствует высоте спутника $H = 400$ км и $f_0 = 400$ МГц, кривая 2 соответствует высоте $H = 400$ км и $f_0 = 1.5$ ГГц. Видно, что максимальное значение Δf_d для $\theta_A \leq 80^\circ$ и $f_0 = 400$ МГц не превышает 3.1 Гц, для $f_0 = 1.5$ ГГц не превышает 1.6 Гц.

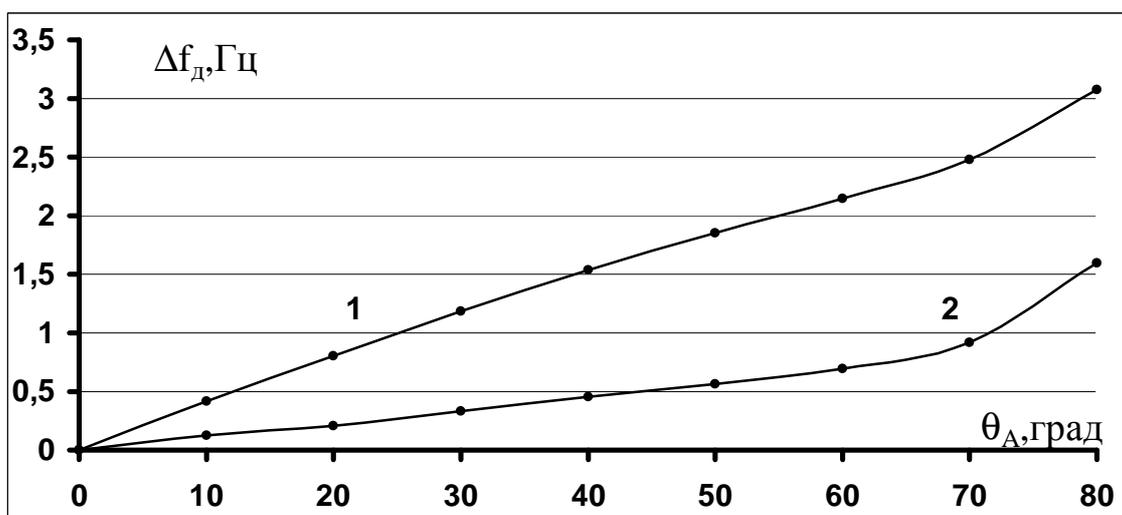


Рис.4. Зависимости дополнительного доплеровского смещения Δf_d несущей частоты f_0 от зенитного угла θ : кривая 1 - высота спутника $H = 400$ км, $f_0 = 400$ МГц; кривая 2 - высота спутника $H = 400$ км, $f_0 = 1.5$ ГГц.

В таблице 3 приведены оценочные значения различий времени распространения $\Delta \tau_{эфф}$ в зависимости от зенитного угла θ_A за счет влияния тропосферы и ионосферы, вычисленные с использованием соотношения (8) (в скобках приведены значения $\Delta \tau_{эфф}$, вычисленные на основе приближения (9) в сочетании с корректирующими коэффициентами $k(\theta_A)$ для тропосферы (10) и для ионосферы (11)). Видно, что для $\theta_A \leq 80^\circ$ и высоты спутника $H \geq 400$ км максимальное значение $\Delta \tau_{эфф}$ за счет тропосферы не превосходит 0.175 мкс.

Таблица 3. Оценочные значения различий времени распространения $\Delta\tau_{эфф}$ в зависимости от зенитного угла θ за счет влияния тропосферы и ионосферы (в скобках даны значения $\Delta\tau_{эфф}$, вычисленные на основе приближения (8) в сочетании с корректирующими коэффициентами).

θ , град	Тропосфера	Ионосфера		
	$H = 400$ км, $\Delta\tau_{эфф}$, мкс	$H = 400$ км, $f_0 = 400$ МГц $\Delta\tau_{эфф}$, мкс	$H = 400$ км, $f_0 = 1.5$ ГГц $\Delta\tau_{эфф}$, мкс	$H = 1500$ км, $f_0 = 400$ МГц $\Delta\tau_{эфф}$, мкс
0	0.0176	0.181	0.0128	0.332
10	0.180(0.0179)	0.184(0.183)	0.0130(0.0129)	0.337
20	0.0187(0.0187)	0.192(0.191)	0.0137(0.0135)	0.351
30	0.0203(0.0203)	0.206(0.205)	0.0147(0.0145)	0.376
40	0.0230(0.0229)	0.230(0.228)	0.0164(0.0160)	0.417
50	0.0273(0.0273)	0.267(0.261)	0.0190(0.0185)	0.479
60	0.0350(0.0352)	0.326(0.312)	0.0231(0.223)	0.574
70	0.0510(0.0514)	0.419(0.387)	0.0298(0.0274)	0.716
80	0.175(0.101)	0.560(0.481)	0.0397(0.340)	0.910

Для $\theta_A \leq 80^0$, $H = 400$ км и центральной частоты $f_0 = 400$ МГц значение $\Delta\tau_{эфф}$ за счет влияния ионосферы не превышает 0.56 мкс, при увеличении центральной частоты f_0 различие времени распространения уменьшается и для $f_0 = 1.5$ ГГц не превышает 0.04 мкс. Видно также, что для $\theta_A \leq 80^0$, $H = 1500$ км, $f_0 = 400$ МГц значение $\Delta\tau_{эфф}$ достигает 0.91 мкс. Вычисления показывают, что дальнейшее увеличение высоты спутника H практически не приводит к увеличению различий времени распространения $\Delta\tau_{эфф}$.

Из таблицы 3 видно, что приближение (9) в сочетании с корректирующими коэффициентами является достаточно точным для зенитных углов $\theta_A \leq 50^0$.

Приведем результаты анализа оценивания различия путей распространения сигналов в атмосфере и в вакууме ΔL и соответствующего различия времени распространения $\Delta \tau$ с учетом искривления лучей из-за рефракции на основе соотношений (12), (13). Для корректного применения этих соотношений требуется достаточно точные значения угла рефракции ξ_A . Вместе с тем соотношения (3), (4), используемые для оценивания ξ_A , являются точными лишь при $\theta_A = 0^0$. Это является ограничивающим фактором применения методики оценки ΔL и $\Delta \tau$ на основе (12), (13) для произвольных значений θ_A . Задача аналитического построения пути распространения луча в атмосфере и точного вычисления углов рефракции рассмотрена в работах [15,20].

Результаты вычислений оценок $\xi_A^{(1)}$ на основе соотношения (3) показали их недостаточную точность - при их использовании соответствующие производимые оценки ΔL имели отрицательные значения, что не согласуется с моделью распространения луча.

Оценки $\xi_A^{(2)}$, вычисляемые на основе соотношения (4), производили значения $\Delta L > 0$, что согласуется с моделью распространения луча в атмосфере. В этом случае значение ΔL можно рассматривать в качестве оценки различия путей распространения сигналов в атмосфере и в вакууме. Вместе с тем, вычисленные значения оценок различий времени распространения $\Delta \tau$ на основе соотношения (14) и оценок $\xi_A^{(2)}$ при распространении сигналов через тропосферу и ионосферу для зенитных углов $\theta_A \leq 80^0$ практически совпали с соответствующими значениями $\Delta \tau$, приведенными в таблице 3.

Заключение

Рассмотрено влияние атмосферы (тропосферы и ионосферы) на распространение сигналов «земная станция - спутник», которое заключается в рефракции лучей; в увеличении времени и пути распространения сигналов по

отношению к распространению в вакууме; в дополнительном доплеровском смещении центральной и тактовой частот; в энергетических потерях при передаче и приеме сигналов за счет рефракции луча. Учет этих факторов требуется при разработке спутниковых систем связи и навигации.

Даны методики оценивания эффективностей приведенных факторов влияния атмосферы, рассмотрены модели тропосферы и ионосферы.

Приведены результаты оценивания характеристик рассматриваемых линий передачи с использованием описанных методик и моделей. В частности, показано, что основной вклад в рефракцию вносит тропосфера - углы рефракции достигают $0.26^{\circ} \dots 0.30^{\circ}$ для зенитных углов $\theta_A \leq 80^{\circ}$.

При вычислении характеристик ионосферных и тропосферных линий спутниковых систем связи возникают ошибки оценивания метрических расстояний и времени задержки. Это обусловлено отличием групповой скорости распространения радиоволн от скорости распространения в вакууме, а также искривлением луча относительно прямолинейного распространения. Аналитическое построение пути распространения луча в атмосфере и точное вычисление углов рефракции, ошибок оценивания метрических расстояний и времени задержки является темой перспективных исследований.

Литература

1. Спилкер Дж. Цифровая спутниковая связь. Пер. с англ. М.: Связь. 1979.
2. Спутниковая связь и вещание: справочник. Под ред. Кантора Л.Я. М.: Радио и связь. 1997.
3. Ли У.К. Техника подвижной связи. Пер. с англ. М.: Радио и связь. 1985.
4. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Перевод с англ. М.: Издательский дом "Вильямс". 2003.
5. Назаров Л.Е., Головкин И.В. Последовательные турбо-коды с пониженной сложностью алгоритмов приема.// Радиотехника и электроника. 2010. том 55. №10. Стр. 1193-1199.

6. Долуханов М.П. Распространение радиоволн. М.: Гос. Издательство по вопросам связи и радио. 1960.
7. Грудинская Г.П. Распространение радиоволн. М.: Высшая школа. 1975.
8. Яковлев О.И., Якубов В.П., Урядов В.П., Павельев А.Г. Распространение радиоволн. М.: ЛЕНАНД. 2009.
9. Назаров Л.Е., Игошин Е.В., Зудилин А.С. Разработка и реализация сигнально-кодовой конструкции для высокоскоростного канала БПЛА-Земля.// Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2013. №7. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jul13/1/text.pdf>.
10. Назаров Л.Е., Игошин Е.В., Зудилин А.С., Щеглов М.А. Разработка, реализация и испытания сигнально-кодовых конструкций для высокоскоростной радиопередачи связи с БПЛА. // Успехи современной радиоэлектроники. 2014. №8. Стр. 68-74.
11. Камнев В.Е., Черкасов В.В., Чагин Г.В., Спутниковые сети связи. М.: Военный Парад. 2010. 608 с.
12. ГЛОНАСС: принципы построения и функционирования. Изд.4-е. Под ред. А.И.Перова, В.Н.Харисова. М.:Радиотехника. 2010.
13. Справочник по радиолокации. Том 1. Основы радиолокации. / Под ред. М.Сколник. М.: Советское радио. 1974.
14. Бин Б.Р., Даттон Е.Дж. Радиометеорология. Л.: Гидрометиздат. 1971.
15. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. М.:Мир. 1973.
16. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. Global Positioning System. Theory and Practice. // Springer-Verlag. New York. 1994.
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. V. 85. P. 909-920.
18. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988.
19. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. М.: Наука. 1987.

20. Детков А.Н., Жеребцов С.И., Кобузов А.Н., Макаров И.А. Наведение радиолуча на цель с учетом рефракции в атмосфере Земли. // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2013. №10. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jul13/1/text.pdf>.