

Е. С. Кувалкин, А. И. Захаров, А. В. Пец

ОЦЕНКА ЗАТУХАНИЯ РАДИОСИГНАЛА ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ТРАССЫ СВЯЗИ «ЗЕМЛЯ – КОСМОС»

Статья посвящена программной реализации методик оценки затухания радиосигнала в облаках и амплитудных замираний, возникающих при его распространении в атмосфере. Приведены созданные в программном продукте MATLAB алгоритмы, а также результаты расчета для Калининградской области. Дополнительно освещена тема оценки суммарного затухания сигнала в атмосфере.

99

The authors study the application of calculation method of radio signal attenuation in clouds and amplitude scintillations that take place during its propagation in the atmosphere. The paper describes the algorithm of attenuation calculation, created in MATLAB program and calculated resulting attenuation for Kaliningrad region of the Russian Federation. Additionally, the topic of estimation of total atmospheric attenuation is highlighted.

Ключевые слова: затухание в облаках, амплитудные мерцания, суммарное затухание, спутниковая связь, радиосвязь.

Keywords: attenuation in clouds, amplitude scintillations, total atmospheric attenuation, satellite communication, radio communication.

Введение

При проектировании трассы радиосвязи для связи земной станции и спутника необходимо учитывать затухание радиосигнала, складывающееся из нескольких составляющих: затухание в атмосферных газах, дожде и облаках, амплитудные замирания радиосигнала. В данной статье рассматриваются методики оценки затухания радиосигнала в облаках и замираний, предложенные Международным союзом электросвязи (МСЭ) в соответствующих рекомендациях [1; 2]. На их основе созданы программные алгоритмы, реализуемые в программной среде MATLAB, получены результаты расчетов. Также приводятся данные об общем затухании радиосигнала в диапазоне частот от 1 до 1000 ГГц, основанные на данных, полученных в ходе работы программных алгоритмов [3; 4].

Цель работы: создание программных алгоритмов на основе методов расчета затухания, вызванного влиянием облаков и замираний, получение данных об общем затухании и анализ полученных результатов.

В статье будут рассмотрены затухание в атмосферных газах и дожде (раздел 1); методика расчета затухания в облаках, созданный на ее основе алгоритм и полученные с его помощью результаты (раздел 2); методика оценки глубины замираний, созданный программный алгоритм и его результаты (раздел 3), а также оценка суммарного влияния нескольких факторов на ослабление сигнала при его распространении в атмосфере (раздел 4).

1. Затухание в атмосферных газах и в дожде

В более ранних публикациях [3; 4] были созданы алгоритмы расчета затухания радиосигнала в атмосферных газах и дожде, а также получены результаты данных расчетов.

Метод суммирования спектральных линий, описанный в рекомендации МСЭ [5] позволяет рассчитать величину ослабления, испытываемого радиоволной при распространении через газы атмосферы на основе таких параметров, как абсолютная температура T (К), давление сухого воздуха p (гПа), парциальное давление водяного пара $p_{\text{водяной пар}}$ (гПа) и индекс рефракции n . Основным принципом методики является разделение атмосферы на слои, вычисление влияния каждого отдельного слоя на сигнал и последующее суммирование найденных воздействий с целью получения итогового значения. Данный метод позволяет оценить затухание для частот от 1 до 1000 ГГц и для углов места от 0 до 90°. Методика была реализована в программной среде *MATLAB*, получены данные о затухании радиосигнала в диапазоне от 1 до 1000 ГГц для различных углов места. Результаты представлены на рисунке 1.

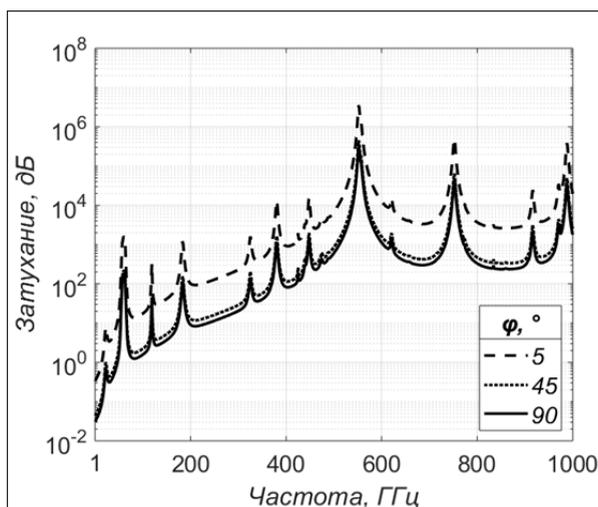


Рис. 1. Затухание радиосигнала в атмосферных газах в зависимости от частоты, летний сезон

Метод расчета затухания в дожде, принятый в рекомендации МСЭ [1], основывается на применении эффективной длины трассы и двух поправочных коэффициентов. Из-за неоднородной структуры дождя вводятся коэффициент ослабления по горизонтали и коэффициент подстройки по вертикали, с помощью которых далее непосредственно вычисляется эффективная длина трассы и перемножается с погонным затуханием с целью получения итогового значения. Методика позволяет оценить ослабление сигнала для частот от 1 до 55 ГГц и углов места от 5 до 90°. На ее основе был создан алгоритм в программной среде *MATLAB* и получены результаты, приведенные на рисунке 2.

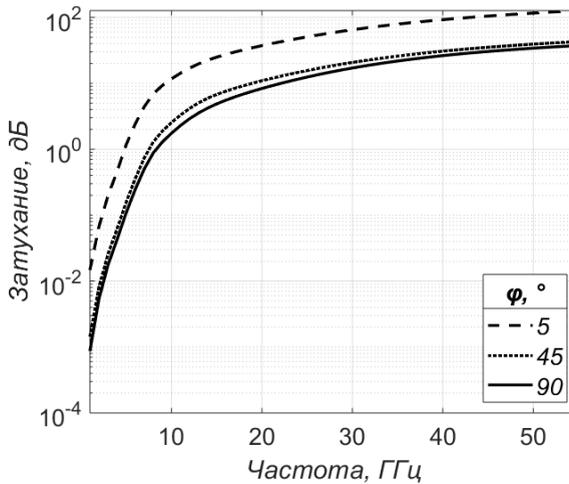


Рис. 2. Затухание радиосигнала в дожде в зависимости от частоты

2. Затухание радиосигнала в облаках

Затухание при распространении радиоволн в атмосфере также связано с облаками, представляющими собой скопление капель воды, размер которых не превышает 0,01 см. Для сигналов с частотой не более 200 ГГц погонное ослабление в облачности может быть выражено с использованием релейской аппроксимации. Методика, описанная в рекомендации МСЭ [2], позволяет оценить ослабление из-за облачности для частот до 200 ГГц и углов места φ от 5 до 90°.

Для осуществления оценки затухания необходимо иметь местные статистические данные об общем столбчатом объеме воды в жидкой фазе, содержащейся в облаках. Если такие данные недоступны, предлагается использовать методику, созданную на основе данных ERA-40 [2], в которых в качестве вышеописанного параметра используется столбчатый объем воды при фиксированном сниженном значении температуры воды, равном $T = 273,15$ К. Приводимое далее описание будет исходить из предположения, что такие данные недоступны, — его можно считать более общим случаем.

Затухание радиоволны на наклонной трассе для заданной вероятности превышения p определяется по формуле

$$A = \frac{L_{red} K_l(f, T)}{\sin \varphi}, \text{ дБ}, \quad (1)$$

где L_{red} (кг/м²) — столбчатый объем жидкой воды, находящейся в облаках; φ — угол места; $K_l(f, T) \frac{\text{дБ/км}}{\text{г/м}^3}$ — коэффициент погонного ослабления, рассчитанный для $T = 273,15$ К.



Столбчатый объем жидкой воды $L_{\text{ред}}$ определяется для заданного уровня вероятности p в соответствии с картами, включенными в рекомендацию. В зависимости от постановки задачи могут использоваться как месячные, так и годовые значения данного параметра.

Формулы для определения коэффициента погонного ослабления $K_1(f, T)$ основаны на релейском рассеянии и модели Дебая для комплексной диэлектрической проницаемости жидкой воды $\varepsilon(f)$ и имеют следующий вид:

$$K_1(f, T) = \frac{0,819f}{\varepsilon'' \left(1 + \left(\frac{2 + \varepsilon'}{\varepsilon''} \right)^2 \right)}, \frac{\text{дБ/км}}{\text{г/м}^3}, \quad (2)$$

где f – частота радиосигнала (ГГц); ε' и ε'' – действительная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости воды соответственно, которые могут быть вычислены с помощью температуры жидкой воды через формулы, представленные в [2].

На основе представленного метода в программной среде *MATLAB* был создан алгоритм, позволяющий оценить затухание радиосигнала в облаках на примере Калининградской области. Алгоритм представлен на рисунке 3.

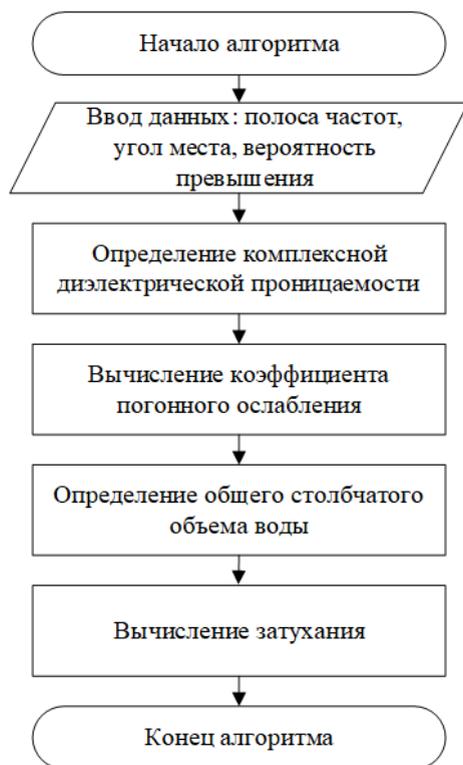


Рис. 3. Алгоритм для оценки затухания в облаках



Во входных данных алгоритма задаются полоса частот сигнала f в диапазоне от 1 до 200 ГГц, необходимый диапазон углов места φ , а также необходимое значение вероятности p . Следующим шагом является определение значения комплексной диэлектрической проницаемости воды, содержащейся в облаках, далее – вычисление коэффициента погонного ослабления $K_1(f, T)$ на основании данных о диэлектрической проницаемости воды и заданных частот радиосигнала. Определение общего столбчатого объема жидкой воды, содержащейся в облаках, происходит следующим образом: в алгоритме содержатся среднегодовые значения данной величины для Калининградской области, полученные из цифровых карт МСЭ [2]. В них приведены значения L_{red} для ограниченного набора значений p (0,1; 0,2; 0,3; 0,5; 1 и т.д.). Если заданное при старте алгоритма значение p совпадает с каким-либо из приведенных выше, то значение L_{red} для данной вероятности p берется неизменным. Если же значение вероятности p не содержится в приведенном наборе, то выбираются две ближайшие вероятности p_{above} и p_{below} больше и меньше заданной. Для них определяются величины $L_{red\ above}$ и $L_{red\ below}$, которые затем линейно интерполируются в зависимости от $\log p$ [2]. Полученные в итоге значения L_{red} и $K_1(f, T)$ используются для получения конечного затухания радиосигнала в облаках по формуле (1). Пример получаемых результатов расчетов приведен на рисунке 4.

103

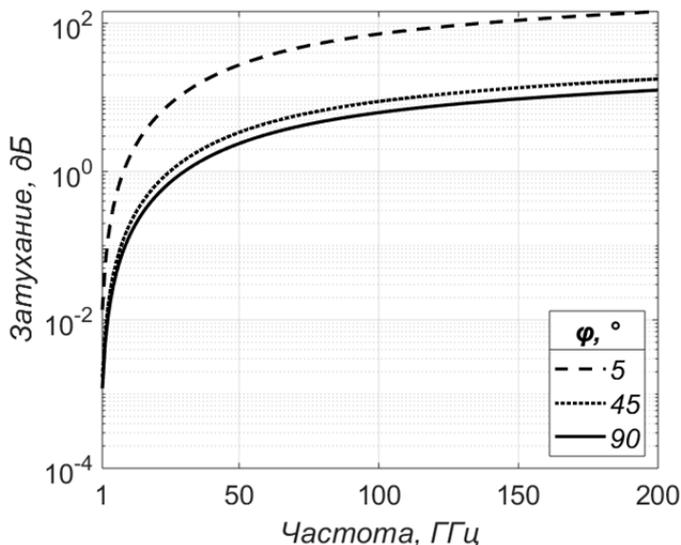


Рис. 4. Затухание радиосигнала в облаках в зависимости от частоты

Как можно видеть, при увеличении частоты и уменьшении угла места значение ослабления увеличивается.



3. Замирание радиосигнала

Амплитудные мерцания, являющиеся изменением амплитуды радиоволны вследствие неоднородности индекса рефракции вдоль пути ее распространения, вызывают замирания сигнала. Эффект многолучевости, выраженный в приходе на приемную антенну не только самого сигнала, но и его переотраженных и преломленных копий, также может играть роль в замирании, а следственно, и ослаблении радиоволны. Тем не менее при углах места, больших или равных 5° , вклад многолучевости по сравнению с мерцанием незначительный. В данной работе приводится и реализуется метод расчета, позволяющий оценить глубину замираний для углов места, больших или равных 5° .

Методика расчета, приводящаяся в рекомендации МСЭ [1], основана на большом количестве работ по измерению тропосферного мерцания [6–9].

Одним из основных параметров, влияющих на значения мерцания, является влажностная составляющая индекса рефракции N_{wet} , учитывающая содержание водяных паров в атмосфере. Данная величина может быть определена из местных данных о наблюдении за температурой и относительной влажностью у поверхности [1]. Если такая информация недоступна, то значение N_{wet} возможно получить из карт, представленных в соответствующей рекомендации МСЭ [10].

Эмпирическая формула для вычисления стандартного отклонения, описывающего мерцание радиосигнала, выглядит следующим образом [1]:

$$\sigma_{ref} = 3,6 \cdot 10^{-3} + 10^{-4} \cdot N_{wet} \text{ дБ.} \quad (3)$$

Из-за турбулентных потоков в атмосфере индекс рефракции может изменяться [11]. Чтобы учесть это явление, вводится понятие эффективной длины трассы L [1]:

$$L = \frac{2h_L}{\sqrt{\sin^2 \varphi + 2,35 \cdot 10^{-4} + \sin \varphi}}, \text{ м,} \quad (4)$$

где φ – угол места; h_L – высота турбулентного слоя. Настоящая величина изменяется в зависимости как от климатической зоны, так и от времени года [11]. Поскольку для выявления данной зависимости не хватает информации, в приводимой методике значение h_L берется равным 1000 м [1].

Также для оценки замираний необходимо знать значение эффективного диаметра антенны:

$$D_{eff} = \sqrt{\eta} D, \text{ м,} \quad (5)$$

где D – геометрический диаметр антенны; η – эффективность (КПД) антенны. Если данное значение неизвестно, оно принимается равным 0,5.



Выражение для определения коэффициента усреднения мерцаний амплитуды за счет антенны $g(x)$ было получено в работе [12] и имеет следующий вид:

$$g(x) = \sqrt{3,86(x^2 + 1)^{11/12} \cdot \sin\left(\frac{11}{6} \operatorname{tg} \frac{1}{x}\right) - 7,08x^{5/6}}, \quad (6)$$

где $x = 1,22 D_{\text{eff}}^2 (f / L)$, в которой f – частота радиосигнала; L – эффективная длина трассы связи. Если выражение под квадратным корнем принимает отрицательное значение, что происходит при $x \geq 7$, то значение замирования радиоволны равно нулю и, соответственно, дальнейшие вычисления не требуются.

Следующий этап – пересчет значения стандартного отклонения с учетом коэффициента усреднения, частоты и угла места:

$$\sigma = \sigma_{\text{ref}} f^{7/12} \frac{g(x)}{(\sin \varphi)^{1,2}}. \quad (7)$$

Исходя из долгосрочных данных, замирание сигнала не может быть описано нормальным законом распределения [11]. Вследствие чего уровень вызванного мерцанием замирования, превышаемый для $p\%$ времени, может быть выражен как

$$A(p) = a(p) \cdot \sigma, \text{ дБ}, \quad (8)$$

где коэффициент процента времени $a(p)$ для процента времени p , принимающего значения в диапазоне $0,01 \leq p \leq 50$ [11], аппроксимируется следующим выражением:

$$a(p) = -0,061(\lg p)^3 + 0,072(\lg p)^2 - 1,71 \cdot \lg p + 3,0. \quad (9)$$

Приведенная методика была реализована в программном продукте MATLAB. Созданный алгоритм представлен на рисунке 5.

При старте работы алгоритма в него вводятся такие данные, как полоса частот радиосигнала f , которая может принимать значения от 4 до 20 ГГц, угол места φ , геометрический диаметр антенны D , ее эффективность η и процент времени превышения p . Далее алгоритм проходит по всем вышеописанным этапам вычисления. Он определяет влажностную составляющую индекса рефракции N_{wet} для Калининградской области на основании карт МСЭ [10] и заданного процента времени превышения p аналогично тому, как происходит определение L_{red} в приведенном в предыдущем разделе алгоритме оценки затухания в облаках. Далее определяет стандартное отклонение σ_{ref} , вычисляет эффективную длину трассы L , вычисляет коэффициент усреднения $g(x)$. На основании данных о частоте, угле места и коэффициенте усреднения происходит вычисление стандартного отклонения σ и итоговое вычисление глубины замирования по формуле (8). Пример результатов, получаемых после работы алгоритма, приведен на рисунке 6.

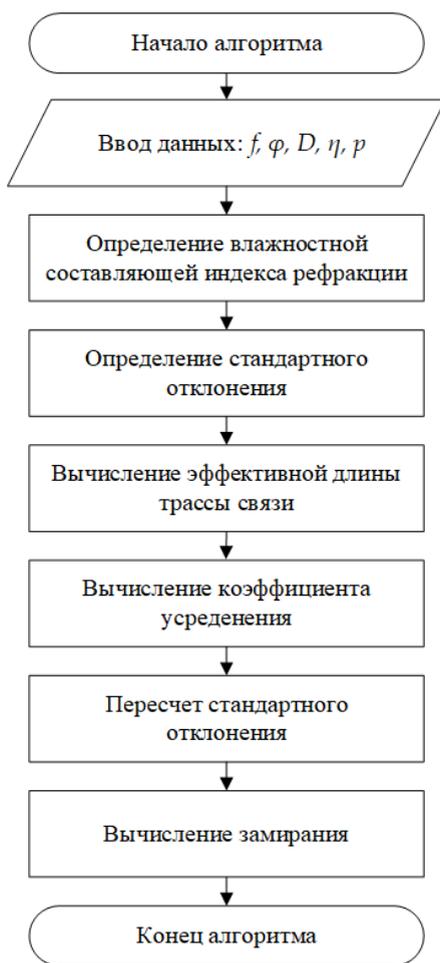


Рис. 5. Алгоритм для оценки амплитудных замираний

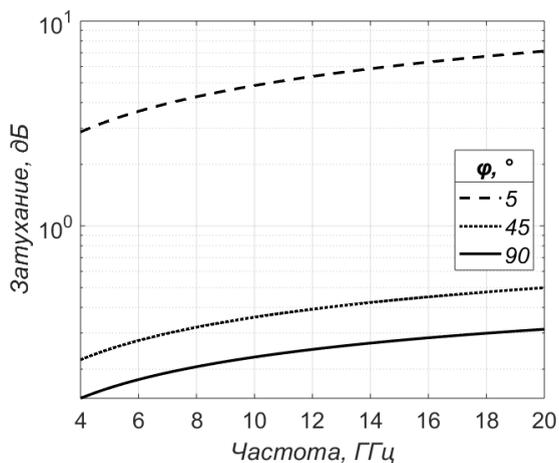


Рис. 6. Ослабление сигнала вследствие мерцаний в зависимости от частоты



Как видно из графика, глубина замираний сильно зависит от угла места: чем он меньше, тем больше значение ослабления. Важную роль играет и частота сигнала, с ее увеличением затухание также возрастает.

4. Суммарное затухание радиосигнала, обусловленное несколькими факторами

Как уже было сказано ранее, суммарное затухание радиосигнала при его распространении на трассе связи «Земля – космос» определяется несколькими факторами: затухание в атмосферных газах, дожде и облаках и замирания, обусловленные мерцанием.

Суммарное затухание сигнала при распространении в атмосфере для заданной вероятности p может оценено по формуле [1]

$$A_T(p) = A_G(p) + \sqrt{(A_R(p) + A_C(p))^2 + A_S^2(p)}, \quad (10)$$

где $A_G(p)$ – затухание в атмосферных газах; $A_R(p)$ – затухание в дожде; $A_C(p)$ – затухание в облаках; $A_S(p)$ – ослабление из-за замираний.

Расчет суммарного затухания был реализован в программном продукте *MATLAB* на основе программных алгоритмов, описанных в предыдущих пунктах данной работы, а также в более ранних публикациях [3; 4]. Пример результатов расчета суммарного затухания для частот от 1 до 60 ГГц и нескольких углов места представлен на рисунке 7.

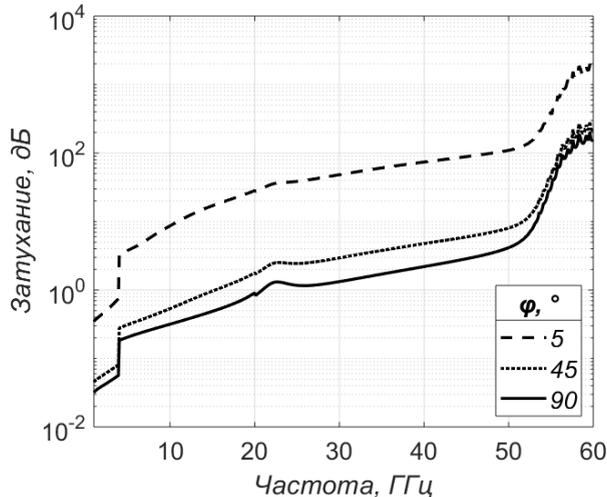


Рис. 7. Суммарное затухание

Как можно видеть, с увеличением частоты сигнала его ослабление увеличивается. Также с уменьшением угла места (равно при движении спутника к уровню горизонта) затухание увеличивается. Резкое увеличение затухания при 4 ГГц обусловлено мерцанием, которое на более низких частотах отбрасывается из-за сравнительно малого влияния на конечное ослабление.



Заключение

В рамках данной работы рассмотрены предложенные Международным союзом электросвязи методики оценки затухания радиосигнала в облаках и замирания, обусловленного амплитудным мерцанием. Данные методы были реализованы в программном продукте *MATLAB* путем создания соответствующих алгоритмов расчета. Представлены примеры результатов их работы. Дополнительно рассмотрено вычисление суммарного влияния нескольких факторов на ослабление радиоволны при ее распространении в атмосфере и приведены примеры результатов расчета, получаемых в ходе вычислений.

108

Список литературы

1. Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования, необходимые для проектирования систем связи Земля – космос : рекомендация МСЭ-R P.618-13 (12/2017).
2. Ослабление из-за облачности и тумана : рекомендация МСЭ-R P.840-7 (12/2017).
3. Захаров А.И., Кувалкин Е.С. Программная реализация методики расчета затухания радиосигнала в атмосферных газах для спутниковой связи // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Физико-математические и технические науки. 2019. № 1. С. 18 – 27.
4. Кувалкин Е.С., Захаров А.И. Программная реализация методики расчета затухания радиосигнала в дожде для спутниковой связи // Матер. XXV Всерос. науч. конф. студентов-физиков и молодых ученых. Севастополь, 2019. С. 388 – 389.
5. Затухание в атмосферных газах : рекомендация МСЭ-R P.676-11 (09/2016).
6. Lo P.S.L., Banjo O.P., Vilar E. Observations of Amplitude Scintillations on a Low-Elevation Earth-Space Path // Elec. Letters. 1984. Vol. 20, iss. 7. P. 307 – 308.
7. Rucker F., Ortgies G. Diurnal and Seasonal Variations of OTS Amplitude Scintillations // Elec. Letters. 1985. Vol. 21, iss. 4. P. 143 – 145.
8. Karasawa Y., Yamada M., Allnutt J.E. A New Prediction Method for Tropospheric Scintillation in Satellite Communication // IEEE Trans. Antennas Propagat. 1988. Vol. AP-36, iss. 11. P. 1608 – 1614.
9. Banjo O.P., Vilar E. Measurement and Modelling of Amplitude Scintillations on Low-Elevation Earth-Space Paths and Impact on Communication Systems // IEEE Trans. Commun. 1986. Vol. COM-34, iss. 8. P. 774 – 780.
10. Индекс рефракции радиоволн: его формула и данные о рефракции : рекомендация МСЭ-R P.453-13 (12/2017).
11. Справочник по радиометеорологии. Женева, 2013.
12. Hadden J., Vilar E. Scattering-Induced Scintillations from Clear Air and Rain on Earth-Space Paths and the Influence of Antenna Aperture // IEEE Trans. Antenna Propagat. 1986. Vol. AP-34, iss. 8. P. 646 – 657.

Об авторах

Евгений Сергеевич Кувалкин – студент, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: EKuvalkin@stud.kantiana.ru



Артем Игоревич Захаров – ассист., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: AIZakharov@kantiana.ru

Александр Васильевич Пец – канд. техн. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: APets@kantiana.ru

The authors

Evgenii S. Kuvalkin, Undergraduate Student, I. Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: EKuvalkin@stud.kantiana.ru

Artyom I. Zhaharov, Assistant, I. Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: AIZakharov@kantiana.ru

Dr Alexander V. Pets, Associate Professor, I. Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: APets@kantiana.ru