

УДК 537.877

ВЛИЯНИЕ ПЫЛИ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН СВЧ ДИАПАЗОНА

© 2024 г. М. В. Прудникова¹, Е. С. Гончаров^{2, 3, *}¹Московский физико-технический институт (национальный исследовательский институт), Москва, Россия²Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия³ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова», Москва, Россия

*E-mail: eggoncharov@vniia.ru

В статье представлены результаты численного моделирования влияния пыли в тропосфере Земли на распространение радиоволн СВЧ диапазона. Задача решалась с использованием метода параболического уравнения в параксиальном приближении. В расчетах использована модель эффективной диэлектрической проницаемости запыленной атмосферы, использующая в качестве входных параметров: задаваемая дальность видимости в запыленной среде и влажность воздуха. Представлены результаты расчета затухания радиосигнала для частот 3 и 10 ГГц. Расчетные величины затухания показывают, что геофизические процессы в приземном слое атмосферы, сопровождающиеся увеличением содержания пыли, могут существенно ухудшить работу СВЧ радиосредств.

Ключевые слова: СВЧ, пыль, параболическое уравнение, распространение радиоволн, численное моделирование, диэлектрическая проницаемость гетерогенной смеси.

Для цитирования: Прудникова М.В., Гончаров Е.С. Влияние пыли на распространение радиоволн СВЧ диапазона // Динамические процессы в геосферах. 2024. Т. 16. № 2. С. 45–54. http://doi.org/10.26006/29490995_2024_16_2_45

Введение

Значительная часть современных средств связи и радиолокации использует радиоволны ДМВ-ММВ диапазона (1–30 ГГц), распространение которых частично или полностью происходит в тропосфере Земли [Testolina et al., 2024; Lin et al., 2019; Taya et al., 2019]. На характеристики распространения радиоволн данного диапазона влияет множество факторов: пространственно-неоднородные электрофизические характеристики (проводимость и диэлектрическая проницаемость) тропосферы, зависящие от температуры, плотности, содержания водяного пара [Mikhailov et al., 2018]; рельеф и электрофизические свойства земной поверхности [ITU-R, 2021]; характеристики приземного слоя (растительный покров, городская застройка и др.); гидрометеорологические факторы (облачность, осадки и др.). Типовые метеорологические аномалии (инверсия температуры) и быстрые внутрисуточные вариации электрофизических свойств земной поверхности (выпадение ледяного дождя) могут искажать расчетные карты покрытия радиотехнических средств достаточно сложным образом, снижая вероятностно-временные характеристики радиоаппаратуры. В последние годы возникла необходимость учета негативного влияния пыли в атмосфере на распространение волн СВЧ диапазона [Abuhdima et al., 2021].

Ранее вопросы влияния пыли в тропосфере на распространение радиоволн уже исследовались экспериментально [см. Thomson, 1978 и ссылки в ней]. Но в этих работах в качестве источника пыли рассматривалось облако низкого ядерного взрыва, что является весьма специфическим образованием. Так как облако содержит радиоактивные продукты ядерных реакций, то разделить вклад в диэлектрическую проницаемость среды от пыли и от дополнительной ионизации продуктами радиоактивного распада не представляется возможным.

В настоящей работе мы исследуем влияние пылевого слоя естественного происхождения, сосредоточенного в приземном слое атмосферы, как, например, при пылевых бурях. Необходимо подчеркнуть, что в последние годы в результате глобальных изменений климата пылевые бури стали наблюдаться в умеренных широтах [Modarres, 2021].

Дальнейшее изложение строится следующим образом. Вначале кратко описан используемый численный метод для расчета распространения радиоволн СВЧ диапазона и разработанный исследовательский программный код. Следующий раздел посвящен описанию выбранной и использованной в расчетах модели эффективной диэлектрической проницаемости среды. В заключительном разделе представлены результаты расчета затухания радиосигналов на частотах 3 и 10 ГГц на трассах земля-земля и земля-космос.

Численный метод расчета распространения радиоволн

В настоящее время фундаментальные основы методов расчета распространения СВЧ радиоволн разработаны в достаточно полном объеме [Levi, 2000; Apaydin, Sevgi, 2017]. Мы используем представление для медленно меняющейся в пространстве амплитуды электромагнитной волны:

$$E(z, x) = \exp(ik_0 z) u(z, x), \quad (1)$$

где выбрана декартова система координат с осью z , направленной вдоль поверхности земли, осью x , направленной вверх, и $k_0 = 2\pi/\lambda$ – волновое число волны в свободном пространстве. В параксиальном приближении, когда рассматриваются углы меньше 15° по отношению к направлению распространения волны, динамика амплитуды описывается следующим параболическим уравнением:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + 2ik_0 \frac{\partial u}{\partial z} + k_0^2 (n^2 - 1)u = 0, \quad (2)$$

здесь введена величина $n(z, x)$ – показатель преломления среды. Уравнение (2) необходимо дополнить граничными условиями. В общем случае выражение для граничных условий имеет вид:

$$\left(\alpha_1 \frac{\partial}{\partial x} + \alpha_2 \right) u(z, x) = 0. \quad (3)$$

Формально импедансное граничное условие для волны с горизонтальной поляризацией задается величинами $\alpha_1 = 1$, $\alpha_2 = ik_0 \sqrt{\varepsilon - 1}$, где $\varepsilon = \varepsilon_r + i60\sigma_g \lambda$ – комплексная диэлектрическая проницаемость границы с проводимостью σ_g и диэлектрической проницаемостью ε_r для волны длиной λ . Случай вертикальной поляризации соответствует $\alpha_2 = ik_0 \sqrt{\varepsilon - 1} / \varepsilon$. Идеально проводящая граница соответствует $u(z, 0) = 0$.

Для численных расчетов нами был выбран вариант конечно-разностного подхода, основанный на использовании схемы Кранка – Николсон. Вторая производная по x аппроксимируется центральной разностью второго порядка и разностный аналог уравнения (2) запишется для внутренних узлов регулярной сетки следующим образом:

$$2ik_0 \frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta z} + \frac{u_{i+1}^{n+1} - 2u_i^{n+1} + u_{i-1}^{n+1}}{2\Delta x^2} + \frac{u_{i+1}^n - 2u_i^n + u_{i-1}^n}{2\Delta x^2} + k_0^2 (n^2 - 1) \frac{u_i^{n+1} + u_i^n}{2} = 0. \quad (4)$$

Трехдиагональная структура матрицы позволяет использовать для решения эффективный метод прогонки.

Источник электромагнитного поля (начальные условия) задается в виде гауссовой антенны. Она представляет хорошее приближение для различных видов антенн (например, для параболической антенны) и описывается в вертикальной плоскости следующим выражением:

$$u(0, x) = u_s(0, x) + \Gamma u_s(0, -x), \quad (5)$$

где $u_s(0, x) = \exp\left(ik_0 x \sin \theta - (x - x_s)^2 / w^2\right)$.

Угол θ задает величину наклона антенны к горизонту, параметр $w = \sqrt{2 \ln 2} / \left(k_0 \sin \frac{\Theta_b}{2}\right)$, где Θ_b – ширина диаграммы направленности относительно уровня –3 дБ. Параметр Γ равен 1 или 0 для вертикальной и горизонтальной поляризации соответственно.

Представленная выше математическая модель была реализована в виде программного кода на языке C, размещенного в открытом доступе по адресу: <https://github.com/Margo-10/peradiowaves>. Программный код был подвергнут интенсивной верификации на сходимость решения по сетке, на расчеты с разными типами граничных условий и разными стандартными профилями показателя преломления, на сравнение с методом FSSM (Fourier-Split-Step-Method), использованном в пакете программ PETOOL2.0 [Ozgun et al., 2011]. Результаты верификации показали адекватность как модели, так и программного кода. Наличие собственного исходного кода программы придает нашим исследованиям необходимую гибкость в задании параметров среды, что невозможно при использовании коммерческих или сторонних кодов.

Эффективная диэлектрическая проницаемость запыленной атмосферы

Пылевое облако представляет собой гетерогенную среду, состоящую из твердых пылинок, равномерно распределенных в окружающем воздушном пространстве. В общем случае частицы пыли одновременно поглощают и рассеивают электромагнитное излучение, что требует расчета коэффициента ослабления с использованием теории Ми [Thomson, 1978]. Однако для широкого спектра приложений справедливо длинноволновое приближение, когда длина электромагнитной волны значительно больше размера пылинки и поглощение доминирует над процессами рассеяния. Такой подход соответствует введению понятия эффективной диэлектрической проницаемости среды и позволяет непосредственное использование уравнения (2) для расчета затухания электромагнитных волн. В интересующем нас диапазоне СВЧ длина волны меняется от 3 до 10 см, при характерных размерах пылинок в единицы и десятки микрометров. Это дает основание для использования вышеописанного приближения для оценки затухания радиоволн.

Диэлектрическая проницаемость гетерогенной среды ϵ (в нашем случае пылевого облака) зависит от множества факторов, таких как, электрофизические свойства, концентрация и ориентация частиц твердой фракции смеси, а также метеорологических параметров и частоты радиоволны. Для расчета диэлектрической проницаемости однородной гетерогенной среды было разработано несколько аналитических моделей. В данной работе были проанализированы аналитические модели [Bottcher et al., 1974; Wagner, 1914; Kharadly et al., 1953; Looyenga, 1965; Hanai, 1962], устанавливающие зависимость диэлектрической проницаемости смеси от диэлектрической проницаемости ее фракций (ϵ_1 и ϵ_0), а также объемной доли твердой фракции ϕ_1 . При этом индексом 1 обозначены параметры твердой фракции, индексом 0 – фонового вещества. Твердые частицы считаются сферическими. Сравнение моделей диэлектрической проницаемости в интересующем диапазоне значений объемной доли пылинок $\phi_1 \in (0; 2 \cdot 10^{-5})$ [м³] (на практике видимость в пылевом облаке оказывается не менее нескольких метров; как показано далее $\phi_1 = (2 \cdot 10^{-5})$ соответствует параметру видимости в пылевом облаке ≈ 0.5 м) показало, что все модели демонстрируют одинаковые значения диэлектрической проницаемости смеси, кроме модели Луйенга [Looyenga, 1965], которая дает отличную от остальных моделей мнимую часть ϵ . Модель Луйенга задает эффективную диэлектрическую проницаемость среды следующим выражением:

$$\varepsilon^{1/3} - \varepsilon_0^{1/3} = \left(\varepsilon_1^{1/3} - \varepsilon_0^{1/3} \right) \varphi_1, \quad (6)$$

где ε_1 и φ_1 – диэлектрические проницаемости и объемные доли составляющих гетерогенной смеси соответственно. Имеющиеся данные валидации моделей диэлектрической проницаемости гетерогенной смеси на основе экспериментальных измерений [Looyenga, 1965] показывают предпочтительность модели Луйенга. В то же время небольшой объем экспериментальных измерений не позволяет однозначно утверждать о преимуществе модели Луйенга и требует дополнительной валидации. В настоящей работе для всех дальнейших расчетов будет использована модель Луйенга.

Для расчета диэлектрической проницаемости пылевого облака необходимо знать диэлектрическую проницаемость материала пылинок ε_1 с учетом абсорбированной влаги. Измерение диэлектрической проницаемости материала пылевых образцов ε_1 является сложной задачей, а используемые экспериментальные методы дают значительную погрешность. В результате представленные в литературе данные диэлектрической проницаемости пылевых образцов оказываются существенно отличающимися и разрозненными. В работе [Sharif, 2011] была предпринята попытка отбора наиболее точных измерений. По данным [Sharif, 2011] в СВЧ диапазоне диэлектрическая проницаемость сухой пыли составляет: в S -диапазоне (2–4 ГГц) $\varepsilon_1 = 4.56 + 0.251i$; в X -диапазоне (8–12 ГГц) $\varepsilon_1 = 5.73 + 0.411i$. Учет абсорбции водяного пара согласно [Ghobrial, 1980] приводит к следующим поправкам, в зависимости от влажности атмосферы:

$$\begin{aligned} \Delta \operatorname{Re}(\varepsilon_1) &= 0.04H - 7.78 \cdot 10^{-4} H^2 + 5.56 \cdot 10^{-6} H^3, \\ \Delta \operatorname{Im}(\varepsilon_1) &= 0.02H - 3.71 \cdot 10^{-4} H^2 + 2.76 \cdot 10^{-6} H^3, \end{aligned}$$

где H – относительная атмосферная влажность, выраженная в процентах. При этом влажность собственно атмосферы рассчитывается по модели [ITU-R, 2019].

Для расчёта характеристик пылевой среды также необходимо задать количество частиц, взвешенных в единице объёма воздуха (относительный объём). На практике основным показателем запыленности служит параметр видимости (V), а не относительный объём частиц. Видимость позволяет удобно оценивать климатические условия, метеорологические факторы и распределение частиц по размерам. В метеорологии обычно используют параметр дальности видимости. При этом видимость соотносится с массой пыли на кубический метр воздуха [Patterson, Gillett, 1977]:

$$M = C/V^\gamma, \quad (7)$$

где M – массовая доля пыли [$\text{кг}/\text{м}^3$], V – видимость [км], параметры C [$\text{кг} \cdot \text{км}/\text{м}^3$] и γ – константы, которые зависят от расстояния от точки наблюдения до пылевого облака, типа почвы, климатических условий. Следующие значения были получены для Ливии и Судана: $C = 2.3 \cdot 10^{-5}$ и $\gamma = 1.07$ [Agha et al., 2019]. Из (7) можно получить:

$$\varphi = C/\rho V^\gamma, \quad (8)$$

где φ – относительный объём, занятый частицами (м^3 частиц на м^3 воздуха), ρ – плотность вещества пылинок [$\text{кг}/\text{м}^3$]. В наших расчетах использовано значение $\rho = 2440 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Результаты расчетов

Распределение реального пылевого облака по высоте существенно зависит от химического состава пыли, влажности, метеорологических факторов и др. Поэтому в рамках настоящей работы выполнены

оценки в приближении пылевого облака, распределенного равномерно по всей расчетной области до высоты 1.3 км. Расчетная область представляет собой область высотой 2 км и протяженностью 30 км. Параметры расчетной сетки: для 3 ГГц — $dx = 0.4$ м, $dz = 5$ м; для 10 ГГц — $dx = 0.1$ м, $dz = 2.5$ м. Для связи земля-космос источник направлен под углом 5° к горизонту, для наземной связи источник направлен горизонтально, в обоих случаях источник располагается на высоте 30 м над поверхностью Земли. Рассматривается горизонтальная поляризация электромагнитной волны. Нижняя граница расчетной области представляет собой идеальную проводящую поверхность. Для исследования затухания сигнала при связи со спутником в пылевой среде с различной относительной влажностью и дальностью видимости были построены графики зависимости $10 \lg(U_{\max}/U_{\max 0})$ от дальности видимости, где $U_{\max}$ — максимальное значение поля на высоте около 1.3 км от уровня моря в запыленной среде с различными значениями дальности видимости и влажности, $U_{\max 0}$ — максимальное значение поля на высоте 1.3 км в тропосфере без пыли с нулевой влажностью.

Результаты расчетов для космического канала с частотами 3 и 10 ГГц представлены на рисунках 1 и 2.

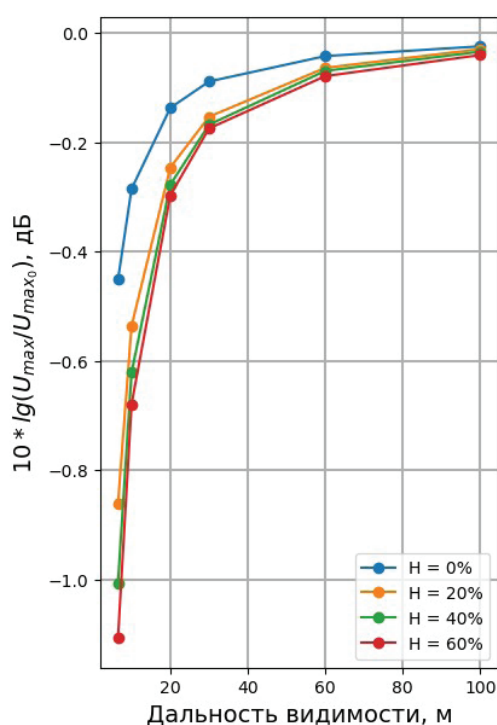


Рис. 1. Затухание сигнала частоты 3 ГГц при распространении в запыленной атмосфере с разными значениями влажности

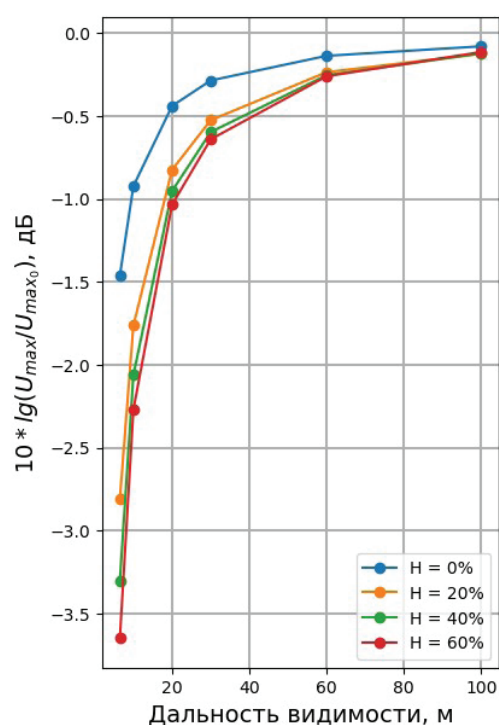


Рис. 2. Затухание сигнала частоты 10 ГГц при распространении в запыленной атмосфере с разными значениями влажности

Полученные результаты показывают, что для космической связи возможное ослабление радиосигнала за счет пылевого облака в ГГц диапазоне частот становится существенным только для довольно сильной запыленности с параметром видимости менее 50 м. При этом существенную роль играет влажность. Отдельно необходимо указать на то, что для случая техногенной генерации пылевого облака концентрация пыли может иметь совершенно другую зависимость, высотный профиль содержания пыли будет нестационарным (первичный заброс сухой пыли на большие высоты сменяется оседанием влажной пыли на низкие высоты) и пыль может оказывать максимально негативное влияние в конкретных диапазонах азимута и угла места, что может оказаться неожиданным для оператора.

Аналогичные расчеты для распространения электромагнитной волны вдоль поверхности земли представлены на рисунках 3 и 4 для разных значений параметра видимости и влажности пыли. Видно, что ослабление радиосигнала в СВЧ диапазоне, вызванное пылевым облаком, оказывается существенным

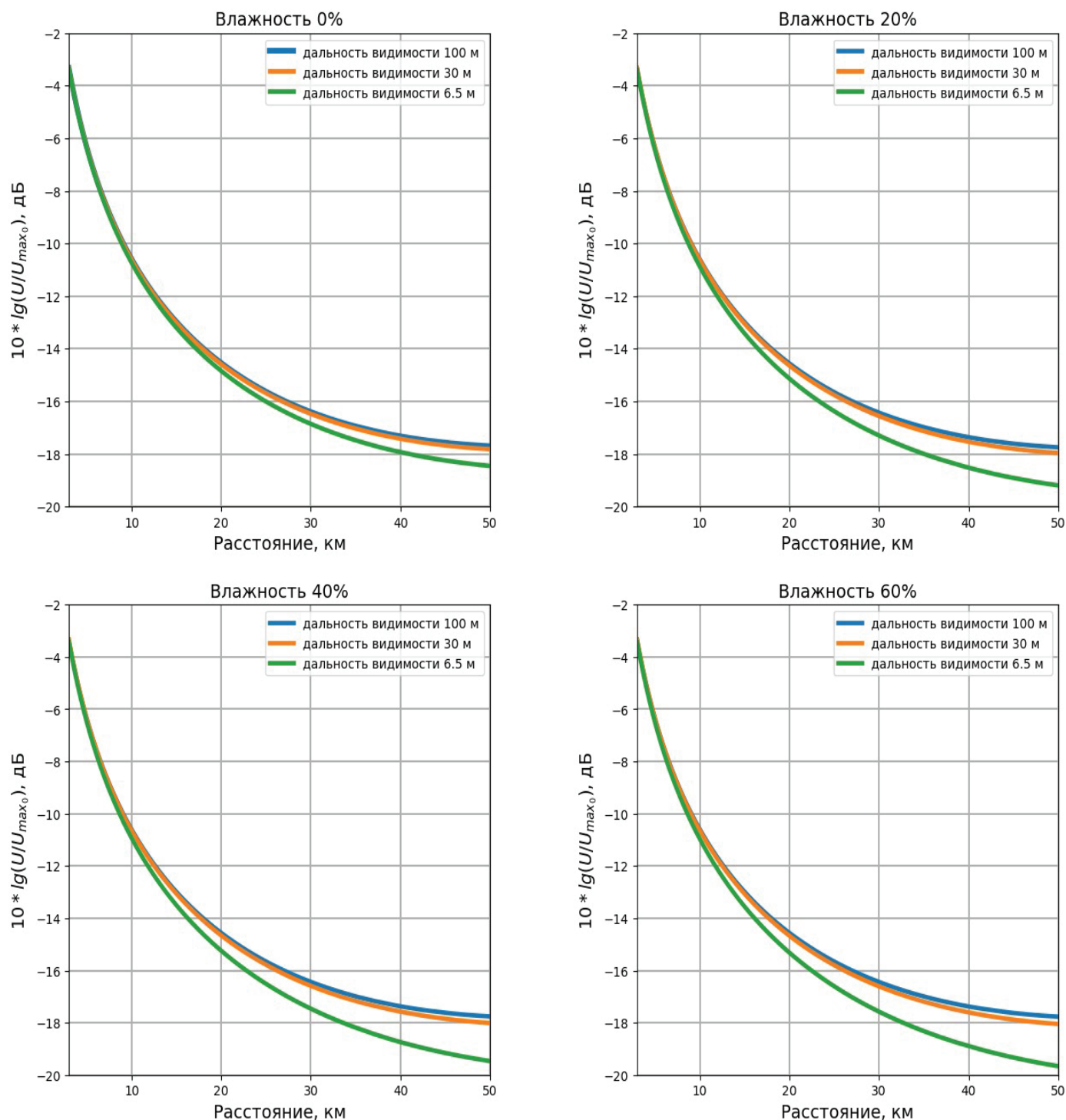


Рис. 3. Затухание сигнала для наземной связи при различных параметрах среды для частоты 3 ГГц

даже при умеренной и слабой запыленности на расстояниях менее 50 км. Для оценки практической значимости полученных результатов достаточно указать на тот факт, что современные цифровые системы СВЧ диапазона в значительной степени полагаются на помехоустойчивое кодирование и многократное дублирование при передаче информации. При этом энергетический запас современных систем редко превышает 5 дБ. То есть энергетические параметры позволяют компенсировать затухание не более чем на 5 дБ. В этом состоит принципиальное отличие современных систем от аппаратуры 60-х годов прошлого века, когда главной угрозой считалось именно сильное затухание в поглощающей среде.

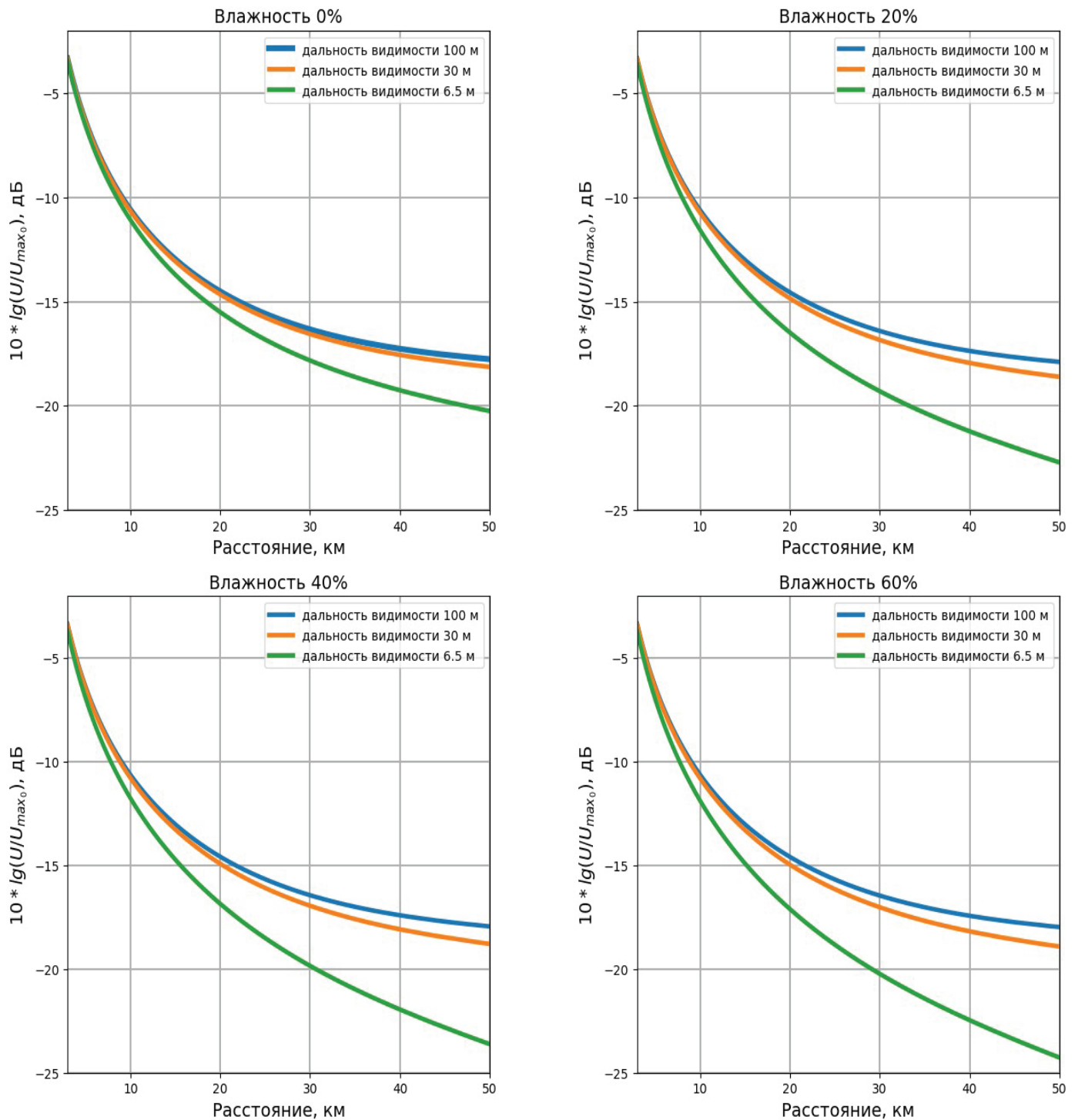


Рис. 4. Затухание сигнала для наземной связи при различных параметрах среды для частоты 10 ГГц

Заключение

На основе метода параболического уравнения, модели гетерогенной смеси Луйенга, электрофизических данных материала пыли и стандартной атмосферы выполнено моделирование распространения электромагнитного сигнала в запыленной атмосфере. Модель эффективной диэлектрической проницаемости учитывает атмосферную и поглощенную пылью влажность. Результаты расчетов показали, что ослабление сигнала в запыленной среде для дальности видимости в

диапазоне 6.5–100 м и влажности 0% – 60% оказывается в пределах $[-0.05; -1.2]$ дБ для частоты 3 ГГц и в пределах $[-0.05; -3.8]$ дБ для частоты 10 ГГц. Следовательно, для космической связи критичными окажутся только мощные пылевые бури с параметром видимости менее 50 м. Для распространения радиоволны вдоль поверхности земли пыль оказывает значительное влияние даже при распространении на 10–20 км. Требования современных систем к скорости передачи информации вызывают переход на все более высокие частоты. Это справедливо для свободного пространства и чистого сухого воздуха. Но при смещении в высокие частоты мы сталкиваемся с тем, что начинают играть роль плохо изученные геофизические факторы, такие как запыленность атмосферы, исследование которых необходимо продолжать.

Финансирование

Данная работа частично финансировалась в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ.

Благодарности

Авторы выражают признательность к.т.н. А. Н. Ляхову за обсуждение полученных результатов.

Список литературы

- Abuhdima E.M.M., Comert G., Pisu P., Huang Chin-Tser, El Qaouaq A., Zhao Ch., Alston Sh., Ambrose K., Liu J. The effect of dust and sand on the 5G terrestrial links // arXiv:2108.09226v1. 2021. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2108.09226>
- Agha M.S., Eshahiry A.M., Aldabbar S.A., Alshahri Z.M. Effect of wind and humidity on microwave links in north west Libya // International journal of electronics and communication engineering. 2019. Vol. 13. № 2. P. 83–87. <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.2576944>
- Apaydin G., Sevgi L. Radio wave propagation and parabolic equation modeling. IEEE press. 2017. – 152 p.
- Bottcher C.J.F., Van Belle O.C., Bordewijk P., Rip A., Yue D.D. Theory of electric polarization // Journal of the electrochemical society. 1974. Vol. 121. P. 211Ca. <https://dx.doi.org/10.1149/1.2402382>
- Ghobrial S.I. The effect of sand storms on microwave propagation: Proceedings of national telecommunication conference. 1980. Vol. 2. P. 43.5–54.5.4
- Hanai T. Dielectric theory on the interfacial polarization for two-phase mixtures // Bulletin of the institute for chemical research, Kyoto University. 1962. Vol. 39. <https://core.ac.uk/download/pdf/39208426.pdf>
- ITU-R. Recommendation P.527: Electrical characteristics of the surface of the Earth. 2021. <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.527/en>
- ITU-R. Recommendation P.453.14: The radio refractive index: its formula and refractivity data. 2019. <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.453-14-201908-I/en>
- Kharadly M.M.Z., Jackson W. The properties of artificial dielectrics comprising arrays of conducting elements // Journal of the institution of electrical engineers. 1953. Vol. 100. P. 199–212. <https://dx.doi.org/10.1049/pi-3.1953.0042>
- Levi M. Parabolic equation methods for electromagnetic wave propagation. The institution of electrical engineers. 2000. – 336 p. <https://dx.doi.org/10.1049/PBEW045E>
- Lin X., Hofstrom B., Wang Y.E., Masini G., Maattanen H., Ryden H., Sedin J., Stattin M., Liberg O., Euler S., Muruganathan S., Eriksson S., Khan T. 5G new radio evolution meets satellite communications: opportunities, challenges, and solutions // arXiv1903.11219. 2019. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1903.11219>
- Looyenga H. Dielectric constants of heterogeneous mixtures // Physica D: Nonlinear Phenomena. 1965. Vol. 31. P. 401–406. [https://doi.org/10.1016/0031-8914\(65\)90045-5](https://doi.org/10.1016/0031-8914(65)90045-5)
- Mikhailov M., Permyakov V., Isakov M. Influence of tropospheric ducts on radio propagation over sea surface. In: Progress in electromagnetics research symposium, Toyama, Japan. 2018. P. 432–436. <https://doi.org/10.23919/PIERS.2018.8597783>
- Modarres R. Dust storm frequency change in relation to climate drivers // International journal of climatology. 2021. Vol. 41 (Suppl. 1). P. E187–E199. <https://doi.org/10.1002/joc.6675>
- Ozgun O., Apaydin G., Kuzuoglu M., Sevgi L. PETOOL: MATLAB-based one-way and two-way split-step parabolic equation tool for radiowave propagation over variable terrain // Computer physics communications. 2011. Vol. 182. P. 2638–2654. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2011.07.017>

Patterson E.M., Gillett D.A. Measurements of visibility vs mass concentration for airborne soil particles // *Atmospheric Environment*. 1977. Vol. 11. P. 193–196. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(77\)90226-8](https://doi.org/10.1016/0004-6981(77)90226-8)

Sharif S.M. Dust storms properties related to microwave signal propagation // *University of Khartoum engineering journal*. 2011. Vol. 1. P. 15–28.

Taya A., Nishio T., Morikura M., Yamamoto K. Concurrent transmission scheduling for perceptual data sharing in mm-wave vehicular networks // *IEICE transactions on information and systems*. 2019. Vol. E102.D. № 5. P. 952–962. <http://dx.doi.org/10.1587/transinf.2018NTP0008>

Testolina P., Polese M., Melodia T. Sharing spectrum and services in the 7-24 GHz upper midband // *arXiv:2402.08649*. 2024. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.08649>

Thomson J.H. Dust cloud modelling and propagation effects for radar and communication codes. Report DNA 4697T. 1978. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:118024562>

Wagner K.W. Erklärung der dielektrischen nachwirkungsvorg ange auf grund Maxwellscher vorstellungen // *Archiv fur elektrotechnik*. 1914. Vol. 2. P. 371–387. <http://dx.doi.org/10.1007/BF01657322>

DUST IMPACT ON SHF-UHF RADIOWAVES PROPAGATION

© 2024 M. V. Prudnikova¹, E. S. Goncharov^{2,3,*}

¹*Moscow Institute of Physics and Technology (national research institute), Moscow, Russia*

²*Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

³*Dukhov research institute of automatics, Moscow, Russia*

**E-mail: eggoncharov@vniia.ru*

We present our results on the numerical modelling for the SHF-UHF radiowave propagation in dusty environment. The problem is solved by means of the parabolic equation technique in paraxial mode within the effective dielectric permittivity framework. Air humidity and visible range are used as free model parameters. The results for the attenuation at 3 and 10 GHz are presented. These results prove that geophysical processes in the atmospheric boundary layer involving dust of various origin can significantly impact on the UHF-SHF electromagnetic wave propagation.

Keywords: UHF, dust, parabolic equation, radiowave propagation, numerical modeling, dielectric permittivity of heterogeneous mixture.