

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН В КАНАЛЕ «ЗЕМЛЯ-АТМОСФЕРА»

В. А. Ненашев^а, ассистент

Н. Ш. Блаунштейн^б, доктор физ.-мат. наук, профессор

^аСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

^бНегевский университет им. Бен-Гуриона, г. Беэр-Шева, Израиль

Постановка проблемы: моделирование и анализ процесса распространения радиоволн в канале «земля-атмосфера» с учетом вариаций коэффициентов рассеивания являются актуальными задачами. Интерес в данной области связан с изучением особенностей распространения радиоволн в канале «земля-атмосфера» при загоризонтной локации в сложных метеорологических и климатических условиях, где нижняя стенка представлена шероховатой земной поверхностью, а верхняя — атмосферой, турбулентной структурой. **Методы:** использованы методы анализа рассеяния электромагнитных волн от шероховатых поверхностей, от атмосферных турбулентных структур; методы моделирования процесса распространения радиоволн между двумя шероховатыми поверхностями; методы теории вероятности и математической статистики применительно к флуктуациям электромагнитных параметров канала «земля-атмосфера». **Результаты:** получены характеристики отражающих свойств шероховатой земной поверхности и атмосферы, содержащей турбулентные образования, с учетом влияния гидрометеоров на затухание сигнала при распространении в канале «земля-атмосфера». Для разработанной модели были взяты за основу следующие условия: строение атмосферы, строение гидрометеоров, турбулентность атмосферы, отражающие свойства от турбулентных неоднородностей атмосферы, учет влияния гидрометеоров на затухание и фединг сигнала. Разработан метод численного расчета характеристик электромагнитного поля при его распространении в канале «земля-атмосфера». **Практическая значимость:** представленная модель распространения радиоволн, адекватная реальному радиоканалу «земля-атмосфера», позволяет проводить компьютерные эксперименты для разработки алгоритмов передачи данных на большие расстояния, а также полунатурные эксперименты для отработки аппаратуры загоризонтной локационной техники.

Ключевые слова — математическая модель канала, загоризонтное распространение радиоволн, шероховатая поверхность, земная поверхность, атмосфера, турбулентные неоднородности.

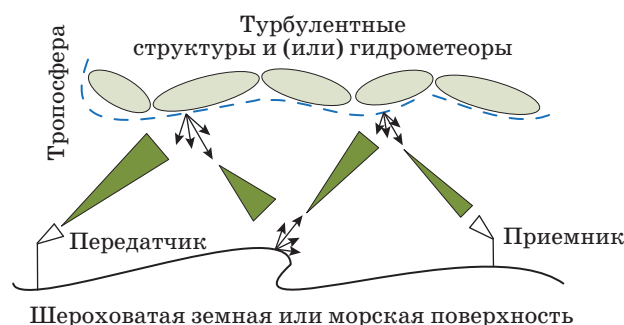
Введение

Характер рассеяния радиоволн между поверхностями «земля-атмосфера-земля» определяется многими факторами. Основными являются соотношения между размерами неровностей поверхностей волноводной структуры и длиной волны падающего излучения, кроме них существенное влияние на характеристики электромагнитного (ЭМ) поля оказывают размеры рассеивающих площадок, способы их облучения, поляризация первичной волны, отражающие и преломляющие свойства вещества и т. д. В зависимости от соотношения между указанными факторами применяют те или иные приближенные методы расчета характеристик рассеянного ЭМ-поля.

Используя теоретические модели, представленные в работах [1–4], задачу распространения радиоволн в канале «земля-атмосфера-земля» можно рассматривать как задачу распространения ЭМ-волн между двумя шероховатыми поверхностями. Верхней поверхностью является атмосфера с «шероховатостями», обусловленными гидрометеорами и турбулентными структурами. Нижняя поверхность — шероховатая земная или морская поверхность (рис. 1). Эти поверхности оказывают существенное влияние на переотра-

жения в волноводной структуре, которую в дальнейшем будем называть волноводом, состоящим из двух поверхностей, но без боковых стенок.

Отметим основные моменты, которые будут рассмотрены в данной работе. Тропосфера содержит различные виды газообразных, жидких и кристаллических структур, а также гидрометеоры (гидрометеообразования) [5], такие как аэрозоли, дождь, снег, облака и т. д. Более того, за счет нерегулярных в пространстве и спорадических во времени потоков воздуха, т. е. ветра, возникают хаотические структуры, известные



■ **Рис. 1.** Распространение радиоволн в канале «земля-атмосфера-земля»

как «атмосферные турбулентности» [6]. В дальнейшем изложении рассмотрены характеристики гидрометеоров, их влияние на распространение радиоволн, приведена стохастическая модель волновода «земля-атмосфера-земля», разработан метод численного расчета характеристик ЭМ-поля при распространении радиоволн в канале «земля-атмосфера-земля», приведены результаты численного анализа.

Отражения от гидрометеоров и турбулентных неоднородностей атмосферы

Гидрометеоры представляют собой водяные или ледяные частицы, формирующиеся в атмосфере над земной поверхностью как результат конденсации и сублимации атмосферных атомов и молекул. Наиболее распространенные гидрометеоры — это дождь, туман, снег и облака. Рассеяние и затухание гидрометеоров существенно влияет на распространение сигналов через атмосферу [1–4].

Гидрометеоры относятся к объемно-распределенным структурам. Отраженный сигнал представляет собой суперпозицию отражений от частиц, заполняющих элемент разрешения антенны РЛС, представляющий собой импульсный объем [5].

Отражения от частиц, заполняющих импульсный объем, обусловлены когерентным и некогерентным рассеянием падающей ЭМ-волны. В сантиметровом и миллиметровом диапазонах когерентным рассеянием можно пренебречь.

При прохождении сигналов через облака, дождь, снег, град, туман необходимо учитывать ослабление этих сигналов. Ослабление сигналов вызывается рассеянием энергии сигнала газами, образующими атмосферу, а также поглощением и рассеянием этой энергии частицами облаков и осадков и становится ощутимым, в частности, когда несущая частота сигнала превышает 1,3 ГГц [5].

Уменьшение мощности отраженного сигнала учитывается в расчетах путем введения в соответствующие формулы множителя ослабления $k_{осл}$. На величину $k_{осл}$ влияют расстояние от источника до приемника и свойства вещества, заполняющего ту или иную среду, в которой распространяются радиоволны. Из газов, входящих в состав земной атмосферы, наибольшее ослабление ЭМ-волн вызывают кислород и водяные пары [6].

Для турбулентных неоднородностей характерен брэгговский механизм рассеяния, при котором отражение в обратном направлении происходит на неоднородностях показателя преломления с пространственным масштабом, равным

половине длины волны излучения. Если половина длины волны излучения меньше внутреннего масштаба турбулентности, то обратное рассеяние на данной длине волны практически не наблюдается.

Отражения от турбулентных неоднородностей показателя преломления весьма слабы и могут быть обнаружены лишь высокочувствительным радиолокатором.

Модели рассеяния радиоволн от верхней «шероховатой» стенки волновода «земля-атмосфера-земля»

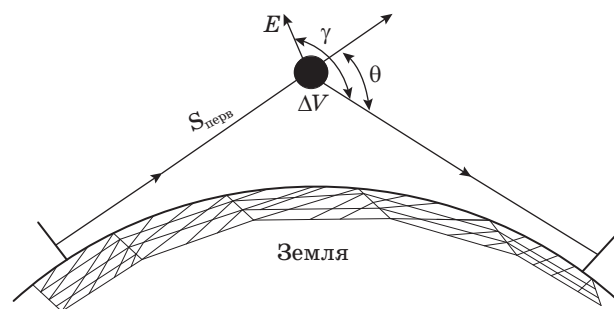
Перейдем к рассмотрению эффектов рассеяния при облучении зондирующими сигналами объемных неоднородностей в тропосфере земли (рис. 2).

Турбулентные неоднородности имеют средний размер l порядка десятка метров [2, 6, 7], поэтому можно считать, что в сантиметровом и миллиметровом диапазонах радиоволн, которые главным образом и применяются при радиозондировании атмосферы, соблюдается условие $l \gg \lambda$ [8–10].

Для расчета рассеяния радиоволн на турбулентных неоднородностях тропосферы используются известные модели рассеяния радиоволн, описывающие флуктуации диэлектрической проницаемости $\Delta\epsilon$: Колмогорова — Обухова [11]; Букера — Гордона [12]; Вилларса — Вайскопфа [11, 12] и др.

Как показывают расчеты, проведенные с помощью математических моделей, полученные результаты часто расходятся с экспериментальными данными, особенно при использовании модели Букера — Гордона. Однако для ориентировочных оценок часто применяют именно эту модель [10].

Более адекватным способом вычисления коэффициентов отражения R от тропосферы явля-



■ Рис. 2. Геометрия рассеяния от объемных неоднородностей в атмосфере: $S_{перв}$ — плотность потока энергии волны, падающей на каждый элемент рассеивающего объема ΔV ; γ, θ — углы рассеяния; E — напряженность электрического поля

ется использование точных решений одномерного волнового уравнения, которые существуют в случае представления потенциала в виде набора дельта-функций $q(x) = \sum_n q_n \delta(x - x_n)$ или набора

прямоугольников. Тогда задача расчета коэффициента отражения R сводится к вычислениям по обратной рекуррентной формуле с граничным условием $R_{n+1} = 0$. Расчет коэффициента отражения методом прямоугольников проводится по следующей обратной рекуррентной формуле:

$$R_n = \frac{(p_n - p_{n+1}) + R_{n+1} e^{2ip_{n+1} \Delta x_n} (p_n + p_{n+1})}{(p_n + p_{n+1}) + R_{n+1} e^{2ip_{n+1} \Delta x_n} (p_n - p_{n+1})},$$

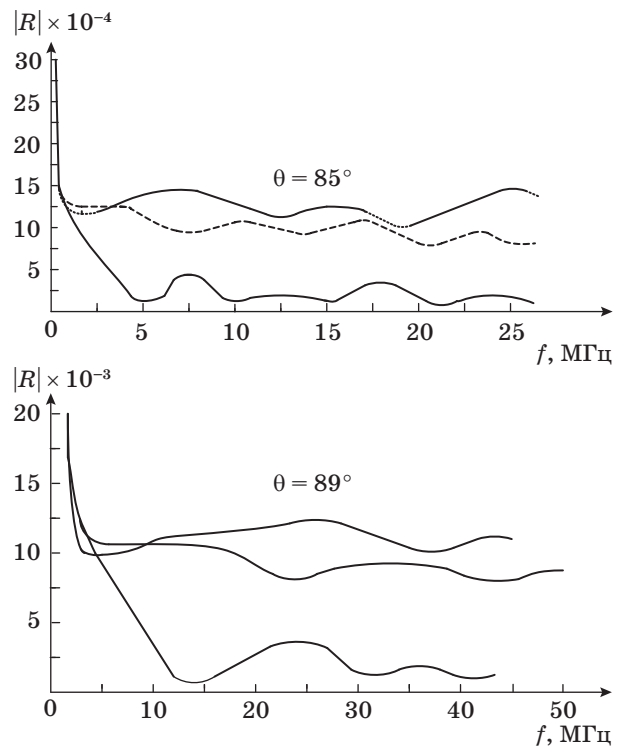
где $\Delta x_n = x_{n+1} - x_n$; $p_n = \sqrt{k^2 - q_n}$.

Однако при вычислении коэффициента отражения в области малых значений p_n возникают трудности. В этом случае коэффициент отражения следует рассматривать как $R_n = -1 + \varepsilon_n$, где n — показатель преломления тропосферы; ε_n — малая добавка (относительная диэлектрическая проницаемость):

$$\varepsilon_n = \frac{2p_n(1 + R_{n+1} e^{2ip_{n+1} \Delta x_n})}{(p_n + p_{n+1}) + R_{n+1} e^{2ip_{n+1} \Delta x_n} (p_n - p_{n+1})}.$$

Ниже приведены результаты численного анализа изменения модуля коэффициента отражения радиоволн при отражении от неоднородных структур тропосферы в зависимости от частоты ЭМ-волны и угла ее падения. Основной вклад в изменение коэффициента отражения вносят профили, содержащие большие градиенты показателя преломления на нижней и верхней границах тропосферы в слоистой атмосфере. Модуль коэффициента отражения $|R|$ для неоднородной тропосферы по эмпирическим оценкам составлял величину порядка 10^{-5} [13–15].

По реальным профилям показателя преломления тропосферы приведены вычисления модуля коэффициента отражения радиоволн для наклонного зондирования. Результаты расчета модуля коэффициента отражения $|R|$ при падении радиоволны на слой тропосферы под углом $\theta = 85^\circ$ и $\theta = 89^\circ$ представлены на рис. 3. Увеличение угла падения радиоволны θ приводит к возрастанию частотного масштаба осцилляций и амплитуды колебаний. Величина модуля коэффициента отражения для $\theta = 85^\circ$ имеет порядок 10^{-3} , а для $\theta = 89^\circ$ — на порядок выше, 10^{-2} . Чем более изрезана форма профиля показателя преломления, тем сложнее частотная зависимость коэффициента отражения. Таким образом, рассчитанные значения модуля коэффициента отражения на два-три порядка превышают его значения, оцененные в работах [13–15].



■ Рис. 3. Модуль коэффициента отражения $|R|$ при падении радиоволны на слой тропосферы под углом $\theta = 85^\circ$ и $\theta = 89^\circ$

Модели рассеяния радиоволн от нижней «шероховатой» стенки волновода «земля-атмосфера»

Когда ЭМ-волны отражаются от земной поверхности, их амплитуда затухает, а набег фазы изменяется случайным образом. Обычно рассматривают три коэффициента ослабления ЭМ-поля, которые способствуют этим эффектам и формируют итоговый коэффициент отражения от земли Γ_t : 1) коэффициент отражения от плоской поверхности $\Gamma_{V,H}$; 2) коэффициент отражения от шероховатой поверхности R_r ; 3) коэффициент дивергенции кривизны земли D . Рассмотрим подробнее эти три параметра.

Коэффициент отражения от гладкой поверхности

Коэффициент отражения от гладкой поверхности зависит от коэффициента диэлектрической проницаемости, а также от угла падения. Коэффициенты отражения для вертикальной (V) и горизонтальной (H) поляризации вычисляются по формулам [2–7]

$$\Gamma_V = |\Gamma_V| \exp(-j\phi_V) = \frac{\varepsilon \sin \psi_g - \sqrt{\varepsilon - (\cos \psi_g)^2}}{\varepsilon \sin \psi_g + \sqrt{\varepsilon - (\cos \psi_g)^2}};$$

$$\Gamma_H = |\Gamma_H| \exp(-j\varphi_H) = \frac{\sin \psi_g - \sqrt{\varepsilon - (\cos \psi_g)^2}}{\sin \psi_g + \sqrt{\varepsilon - (\cos \psi_g)^2}},$$

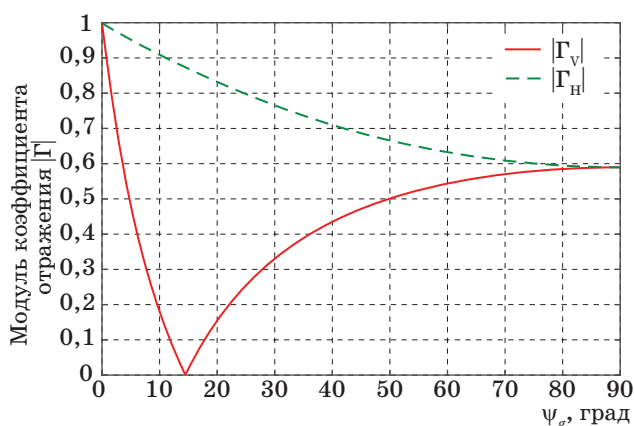
где ψ_g — угол скольжения; ε — комплексная относительная диэлектрическая проницаемость поверхности: $\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$. Здесь ε' и ε'' — действительная и мнимая части относительной диэлектрической проницаемости поверхности. Так, например, для обычной земли действительная часть $\varepsilon' \approx 15$, а мнимая часть

$$\varepsilon'' = \frac{\sigma}{f},$$

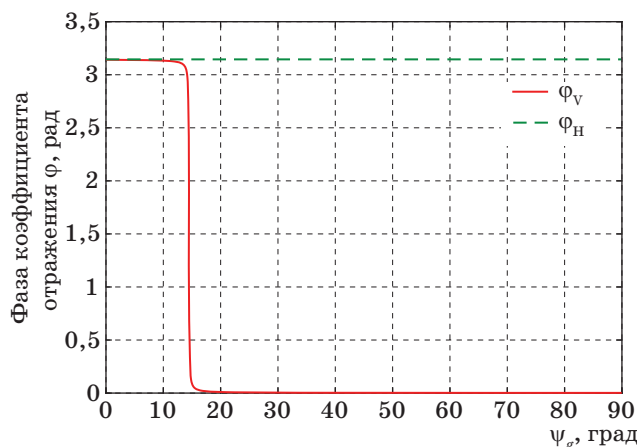
где f — несущая частота; σ — проводимость ($5 \cdot 10^{-3}$) [16].

Анализируя графики на рис. 4 и 5, можно сделать следующие выводы:

1) величина модуля коэффициента отражения горизонтальной поляризации равна единице при очень малых углах скольжения и монотонно убывает, когда угол увеличивается;



■ Рис. 4. Зависимость модуля коэффициента отражения $|\Gamma_H|$ и $|\Gamma_V|$ для гладкой поверхности от угла скольжения



■ Рис. 5. Зависимость фазы коэффициента отражения φ_H и φ_V от угла скольжения

2) величина вертикальной поляризации имеет четко определенный минимум. По этой причине бортовые радары летательных аппаратов в режиме обзора земной поверхности используют в основном вертикальную поляризацию, чтобы значительно уменьшить количество помех от рельефа местности;

3) для горизонтальной поляризации фаза практически постоянна, однако для вертикальной поляризации фаза стремится к нулю вблизи угла 15° ;

4) для очень малых углов (меньше 2°) модули коэффициентов отражения практически равны единице, а фазы практически равны π при углах, меньших 15° .

Когерентное и некогерентное рассеяние от «шероховатой» поверхности

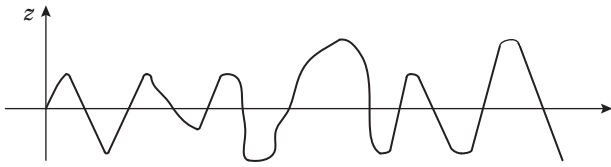
Шероховатость поверхности также влияет на общий коэффициент отражения от земной поверхности (рис. 6, а и б).

Прежде чем перейти к детальному математическому анализу, полезно рассмотреть некоторые общие характеристики рассеяния на шероховатой поверхности. Если поверхность слабошероховатая, то отраженная волна немного ослабляется из-за рассеяния, а мощность, соответствующая этому ослаблению, рассеивается в других направлениях. В случае сильношероховатой поверхности диаграмма рассеяния становится полностью изотропной, что показано на рис. 6, б штриховой линией.

Шероховатая поверхность может описываться случайными величинами ζ_z , распределенными по нормальному закону (рис. 7). Если шероховатость на произвольной высоте h распределяется в соответствии с законом Гаусса, со средним зна-



■ Рис. 6. Схема рассеяния волны от шероховатой поверхности (а) и общее представление о диаграмме рассеяния при различной степени шероховатости (б)



■ **Рис. 7.** Функция, описывающая шероховатость поверхности с помощью нормального закона распределения

чением $\langle z \rangle = z$ и дисперсией σ_z^2 , то можно записать это распределение как

$$p(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_z}} \exp\left\{-\frac{(z-\bar{z})^2}{2\sigma_z^2}\right\}.$$

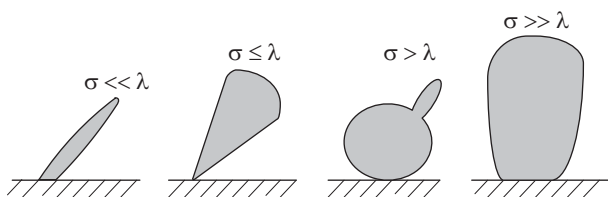
Есть несколько методов общей оценки поля в каналах распространения радиоволн над шероховатой местностью. В настоящее время существует три основных подхода к решению задачи рассеяния волн на шероховатой местности:

1) метод малых возмущений — применим к поверхности, слегка шероховатой, и когда поверхность склона много меньше длины волны ($\sigma_z \ll \lambda$); метод пригоден для описания поверхностей с малыми неровностями, причем наклоны поверхности должны быть меньше единицы [1–3];

2) приближение Кирхгофа — применим к поверхности, радиус кривизны которой гораздо больше, чем длина волны ($\sigma_z \gg \lambda$). Данное приближение применимо для поверхностей с радиусами кривизны, значительно превышающими длину волны. В этом приближении поле в каждой точке отражающей границы предполагается таким, каким оно было бы, если в данной точке заменить поверхность соответствующей касательной плоскостью [1–3];

3) приближение Релея — применим к поверхности, кривизна которой того же порядка, что и длина волны ($\sigma_z \geq \lambda$ и $\sigma_z \leq \lambda$) [3, 6].

Рассеянное поле на шероховатой поверхности визуально удобно представлять в виде диаграмм. Диаграммы рассеянного поля для различных случаев соотношения длины волны и стандартного отклонения от средней высоты приведены на рис. 8.



■ **Рис. 8.** Диаграммы рассеяния поля на поверхности раздела двух сред

Для диапазона волн от высоких до ультравысоких частот в основном применяется аппроксимация Релея. Остановимся на ней подробнее.

В случае шероховатости, когда $\sigma \geq \lambda$ и $\sigma \leq \lambda$, введем скалярный множитель Релея. При этом вместо зеркального отражения используем коэффициенты эффективного отражения для вертикальной и горизонтальной поляризации:

$$R_{V,H}^{ef} = R_{V,H} \exp\left[-2\left(2\pi\frac{\sigma}{\lambda}\sin\psi_g\right)^2\right], \quad (1)$$

где $\exp\left[-2\left(2\pi\frac{\sigma}{\lambda}\sin\psi_g\right)^2\right]$ именуется множителем

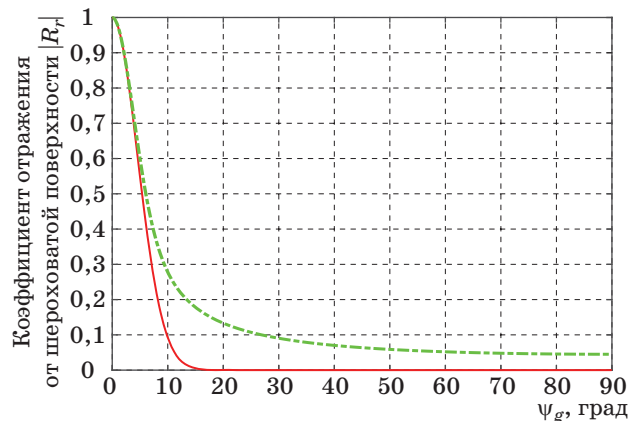
Релея [3, 6]. Другая форма для вычисления коэффициента отражения от шероховатой поверхности, которая в большей степени соответствует экспериментальным результатам, имеет вид

$$R_r = e^{-z} I_0(z), \quad z = 2\left(\frac{2\pi h_{rms} \sin\psi_g}{\lambda}\right)^2, \quad (2)$$

где I_0 — модифицированная функция Бесселя нулевого порядка; h_{rms} (или σ) — среднеквадратичное отклонение поверхности от среднего значения высоты неровностей $\langle \xi_z \rangle$.

График коэффициента отражения шероховатой поверхности в зависимости от ψ_g представлен на рис. 9. Пунктирная линия иллюстрирует значения коэффициента Релея из (1), тогда как сплошная линия иллюстрирует уравнение (2).

Наличие шероховатости перераспределяет энергию рассеиваемой волны и происходит «перекачка» энергии от когерентной составляющей энергии или мощности сигнала к ее некогерентной составляющей.



■ **Рис. 9.** Коэффициент отражения от шероховатой поверхности в зависимости от угла скольжения

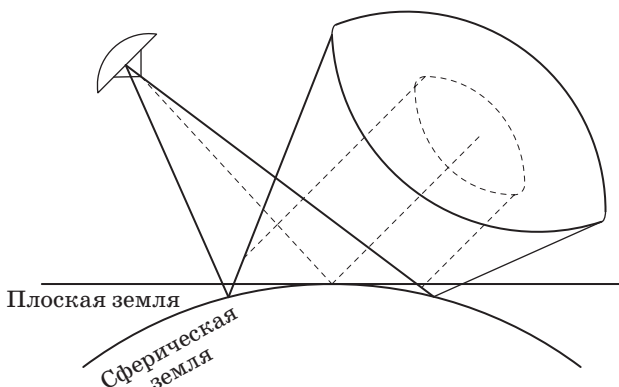
Коэффициент дивергенции

Общий коэффициент отражения также зависит от кривизны земли. Когда электромагнитная волна падает на круглую поверхность земли, отраженная волна расходится из-за кривизны земной поверхности (рис. 10). Из-за расхождения отраженная энергия становится расфокусированной, а плотность мощности излучаемого сигнала снижается, что учитывается коэффициентом дивергенции D . Коэффициент дивергенции может быть получен с помощью геометрических соотношений (рис. 11) и вычислен как

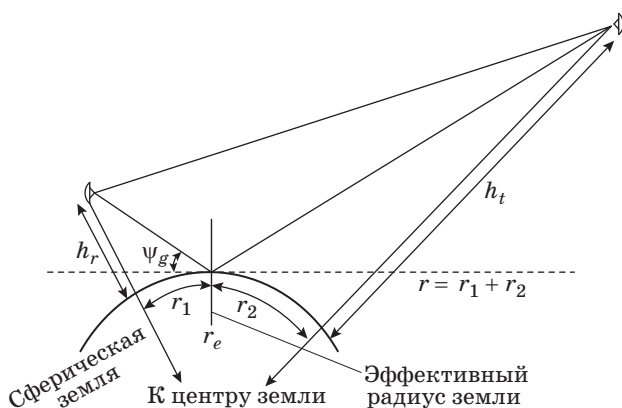
$$D = \frac{r_e r \sin \psi_g}{\sqrt{[(2r_1 r_2 / \cos \psi_g) + r_e r \sin \psi_g](1 + h_r / r_e)(1 + h_t / r_e)}} \quad (3)$$

Поскольку значение ψ_g всегда мало, когда расхождение D очень велико, то следующее приближение справедливо для большинства случаев использования радаров:

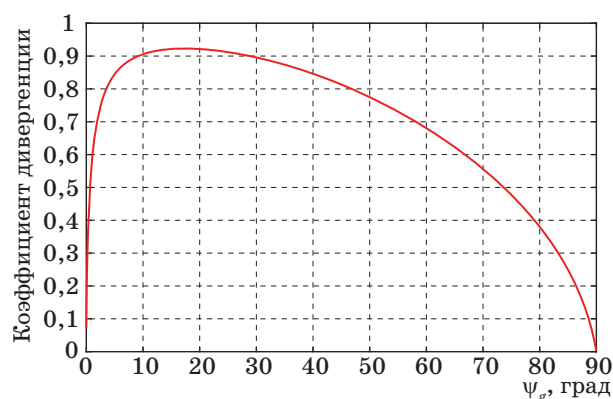
$$D \approx \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{4r_1 r_2}{r_e r \sin 2\psi_g}}}$$



■ Рис. 10. Эффект дивергенции



■ Рис. 11. Определение параметров выражения (3)



■ Рис. 12. Эффект дивергенции в зависимости от угла скольжения

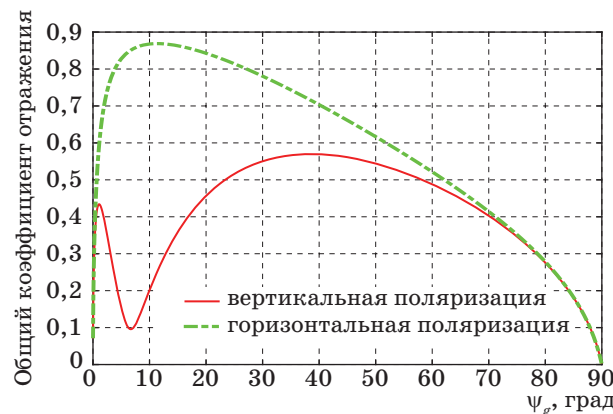
Зависимость дивергенции от угла скольжения показана на рис. 12 с параметрами r_1 и r_2 , представленными через высоты h_r и h_t и угол ψ_g .

Общий коэффициент отражения от земной и морской поверхности (нижняя стенка волновода «земля-атмосфера»)

В общем случае при отражениях от шероховатой поверхности электромагнитные волны претерпевают изменения в фазе и амплитуде, что приводит к диффузным (не когерентным) частям отраженного сигнала. Сочетание эффектов коэффициента отражения от гладкой поверхности, коэффициента дивергенции и коэффициента отражения от шероховатой поверхности можно выразить в виде общего коэффициента отражения Γ_t как

$$|\Gamma_t| = |\Gamma_{(H,V)}| D R_r,$$

где $\Gamma_{(H,V)}$ — это коэффициент отражения для горизонтальной или вертикальной поляризации от гладкой поверхности; D — дивергенция; R_r — коэффициент отражения от шероховатой поверхности.



■ Рис. 13. Абсолютная величина общего коэффициента отражения в зависимости от угла скольжения

Аналогично с поведением модуля коэффициента отражения (2), в зависимости от модуля общего коэффициента отражения с учетом кривизны и шероховатости, наблюдаем минимум в диапазоне углов $5 \div 7^\circ$ для вертикальной поляризации (рис. 13). В то же время при горизонтальной поляризации при тех же углах наблюдаем максимум зависимости Γ_t от углов скольжения.

Метод численного расчета поля для распространения радиоволн в канале «земля-атмосфера»

Выше были показаны модели отражения от двух плоскостей — нижней и верхней стенки — в отдельности. Определим итоговую модель рассеяния радиоволн в канале «земля-атмосфера» как следующую конволюцию коэффициентов рассеяния (рис. 14):

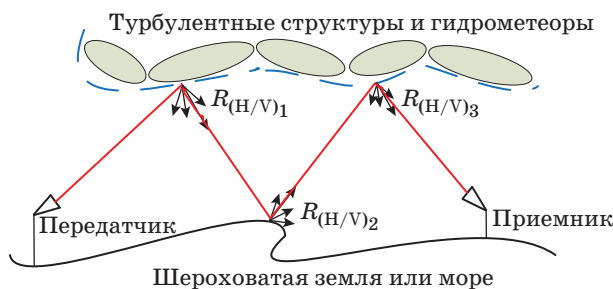
$$P_{total} = P_0 R_{(H/V)_1} R_{(H/V)_2} R_{(H/V)_3},$$

где $R_{(H/V)_1}, R_{(H/V)_3}$ — коэффициенты отражения от турбулентной структуры или гидрометеора, а $R_{(H/V)_2}$ — коэффициенты отражения от шероховатой поверхности земли или моря для горизонтальной и вертикальной поляризации волны.

Для определения вторичного излучения используем теорию Келлера [5, 6], в соответствии с которой поле n -кратно-отраженных лучей от элементов поверхности вычисляется как

$$E_d^{(n)} = D_1 D_2 \dots D_n \exp(ikp_0) / |p_0 \left(\frac{1+p^{(n)}}{p_0} \right)^{1/2} E_0. \quad (4)$$

Применяя формулу (4) в конкретном случае и рассматривая поперечное сечение в вертикальном направлении $y = y_0 = y_1 = 0$, возможно легко анализировать компоненты дифрагированного поля. Затем, используя формулы для однократных отражений, мы можем получить компоненты вторичного дифрагированного поля. Анализ компонент E_{dx}, E_{dy} и E_{dz} дифрагированного поля для разных расстояний от излучателя и разной высоты рассеивателей указывает, что затухание



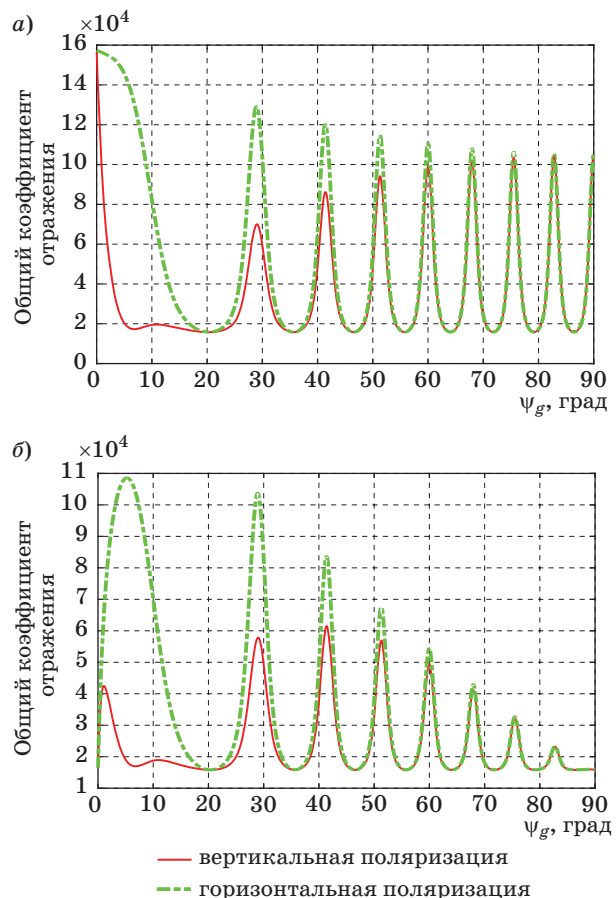
■ **Рис. 14.** Метод численного расчета поля для распространения радиоволн в канале «земля-атмосфера»

поля, вызванного вторичной дифракцией, меняется от 60 до 80 дБ по сравнению с падающим полем E_0 в свободном пространстве для длин волн от 10 до 30 см. Таким образом, мы можем пренебречь эффектами вторичного дифрагированного поля в общем распределении поля в волноводе в рассматриваемом частотном диапазоне.

Численный расчет канала «земля-атмосфера-земля»

Используя приведенные выше формулы сечения рассеивания от турбулентных структур и гидрометеоров и объединяя результаты, полученные в работах [2, 3, 6, 7] (переотражения от шероховатых поверхностей земли), выполним численный расчет распространения радиоволн в канале «земля-атмосфера-земля».

Зададим следующие параметры: ширина пучка $\theta_1 = 2^\circ$; длина волны $\lambda = 3$ см; ширина диаграммы направленности приемника $\theta_2 = 2^\circ$; расстояния до общего объема $R_1 = R_2 = 1000$ км; угол рассеяния $\theta_s = 20^\circ$; коэффициенты усиления



■ **Рис. 15.** Зависимость мощности поля от угла скольжения при распространении радиоволн в канале «земля-атмосфера» без учета (а) и с учетом (б) шероховатостей

антенны на прием и передачу $G_t = G_r = \pi^2/\theta_1^2 = 8100$; начальная мощность передатчика $P_0 = 10^6$ Вт.

Таким образом, мы получаем среднюю мощность сигнала при распространении электромагнитной волны в канале «шероховатая земля-атмосфера» (рис. 15). Из представленных графиков следует, что:

- 1) при углах скольжения ψ_g в диапазоне $5 \div 7^\circ$, максимум согласуется с общим коэффициентом Γ_i ;
- 2) когерентная составляющая мощности сигнала «расширяется» за счет многократного рассеивания на шероховатостях. В спектре сигнала появляются «некогерентные» гармоники со случайными набегом фазы и амплитудой радиосигнала.

Заключение

Основной задачей исследования являлась разработка имитационной модели для расчета средней мощности радиосигнала применительно к режиму загоризонтной локации. Предложен

новый метод расчета и математическая модель распространения радиоволн в канале «земля-атмосфера». Для разработанной модели были взяты за основу следующие эффекты: строение атмосферы; строение гидрометеоров; турбулентность атмосферы; отражающие свойства от турбулентных неоднородностей атмосферы; учет влияния гидрометеоров на затухание и фединг сигнала. Разработан метод численного расчета дифракционного поля для распространения радиоволн в канале «земля-атмосфера». Проведен анализ процесса влияния среды на радиосигнал, поглощаемый, рассеиваемый и дифрагированный на шероховатой поверхности волновода «земля-атмосфера». Получена самосогласованная модель, объединяющая всевозможные физические эффекты, отражение, рассеивание и дифракцию, а также проанализирован численно вклад каждого из эффектов в полное поле, излучаемое источником, находящимся в волноводе «земля-атмосфера». Полученные результаты позволяют проанализировать реальные радиоканалы загоризонтной локации.

Литература

1. Рытов С. М., Кравцов Ю. А., Татарский В. И. Введение в статистическую радиофизику. Ч. II: Случайные поля. — М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1978. — 484 с.
2. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Т. 2: Многократное рассеяние, турбулентность, шероховатые поверхности и дистанционное зондирование. — М.: Мир, 1981. — 319 с.
3. Басс Ф. Г., Фукс И. М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. — М.: Наука, 1972. — 424 с.
4. Andersen J. Bach. Array Gain and Capacity for Known Random Channels with Multiple Element Arrays at Both Ends// IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2000. Vol. 18. N 11. P. 2172–2178.
5. Andersen J. Bach. Antenna Arrays in Mobile Communications: Gain, Diversity, and Channel Capacity// IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2000. Vol. 42. N 2. P. 12–16.
6. Blaunstein N., Ch. Christodoulou. Radio Propagation and Adaptive Antennas for Wireless Communication Links: Terrestrial, Atmospheric and Ionospheric. 1st ed. — New York, Taylor and France, 2007. — 614 p.
7. Blaunstein N., Ch. Christodoulou. Radio Propagation and Adaptive Antennas for Wireless Communication Networks: Wiley Series in Microwave and Optical Engineering. Second ed. — Wiley, 2014. — 760 p.
8. Арманд Н. А., Палатов К. И. Проблемы радиотехники и радиофизики// Радиотехника и радиоэлектроника. 1993. Т. 38. № 10. С. 1734–1750.
9. Фейнберг Е. Л. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности. — М.: Изд-во АН СССР, 1961. — 546 с.
10. Бреховских Л. М. Дифракция электромагнитных волн на неровной поверхности// ДАН СССР. 1951. Т. 81. № 6. С. 1023–1026.
11. Исакович М. А. Рассеяние волн от статистически шероховатой поверхности// ЖЭТФ. 1952. Т. 23. № 3. С. 305–314.
12. Шмелев А. Б. Рассеивание волн статистически неровными поверхностями// УФН. 1972. Т. 106. № 3. С. 459–475.
13. Красюк Н. П., Коблов В. Л., Красюк В. Н. Влияние тропосферы и подстилающей поверхности на работу РЛС. — М.: Радио и связь, 1988. — 216 с.
14. Казаков Л. Я., Ломакин А. Н. Неоднородности коэффициента преломления воздуха в тропосфере/ АН СССР; Ин-т радиотехники и электроники. — М.: Наука, 1976. — 163 с.
15. Паршуков В. А., Зражевский А. Ю., Новичихин Е. П. Влияние нижней части пограничного слоя атмосферы на астрономическую радиорефракцию// Тез. докл. XXVI Радиоастрономической конф. — СПб.: ИПА РАН, 1995. С. 279–280.
16. Блаунштейн Н. Ш., Сергеев М. Б., Шепета А. П. Прикладные аспекты электродинамики. — СПб.: Аграф+, 2016. — 272 с.

UDC 621.371

doi:10.15217/issn1684-8853.2016.6.25

Modeling Radio Wave Propagation in an Earth-Atmosphere ChannelNenashev V. A.^a, Assistant Professor, nenashev.va@gmail.comBlaunstein N. S.^b, Dr. Sc., Phys.-Math., Professor, nathan.blaunstein@hotmail.com^aSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation^bBen-Gurion University of the Negev, POB 653, 1, Ben Gurion St., Beer Sheva, 74105, Israel

Purpose: The goal is to model and analyze radio wave propagation in an earth-atmosphere channel, taking into account the dispersion coefficient variations. It is especially interesting to study the propagation of radio waves in an earth-atmosphere channel at an over-the-horizon location with complicated weather and climatic conditions, when the bottom wall is a rough ground surface, and the upper wall is an atmospheric turbulence structure. **Methods:** We use the methods of analyzing the scattering of electromagnetic waves from rough surfaces and from atmospheric turbulent structures; methods of modeling radio wave propagation in a waveguide with rough walls; methods of the probability theory and mathematical statistics applied to the fluctuations of the electromagnetic parameters of an earth-atmosphere channel. **Results:** We have obtained the characteristics of reflecting features of a rough ground surface and atmosphere with turbulent formations, taking into account hydrometeors which can affect the signal attenuation when it propagates in an earth-atmosphere channel. For the model, we accepted the following conditions: atmosphere structure, hydrometeor structure, atmospheric turbulence, the reflective properties of the turbulent atmosphere inhomogeneities, and the way the hydrometeors affect the attenuation and fading of a signal. A method has been proposed for numerical calculation of an electromagnetic field when it propagates in an earth-atmosphere channel. **Practical relevance:** The proposed radio wave propagation model is adequate to a real earth-atmosphere radio channel. You can use it in computer experiments developing algorithms for data transmission over long distances, as well as in semimatural experiments testing OTH radar equipment.

Keywords — Mathematical Channel Model, OTH Propagation of Radio Waves, Rough Waveguide, Ground Surface, Atmosphere, Turbulent Heterogeneities.

References

- Rytov S. M., Kravtsov I. A., Tatarskii V. I. *Vvedenie v statisticheskuiu radiofiziku. Ch. II: Sluchainye polia* [Introduction into Statistical Radiophysics. Part II. Random Fields]. Moscow, Nauka Publ., 1978. 484 p. (In Russian).
- Akira Ishimaru. *Wave Propagation and Scattering in Random Media*. Vol. 2. *Multiple Scattering, Turbulence, Rough Surfaces, and Remote-Sensing*. Academic Press, 1978. 339 p.
- Bass F. G., Fuks I. M. *Wave Scattering from Statistically Rough Surface*. Oxford, Pergamon press, 1979.
- Andersen J. Bach. Array Gain and Capacity for Known Random Channels with Multiple Element Arrays at Both Ends. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2000, vol. 18, no. 11, pp. 2172–2178.
- Andersen J. Bach. Antenna Arrays in Mobile Communications: Gain, Diversity, and Channel Capacity. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2000, vol. 42, no. 2, pp. 12–16.
- Blaunstein N., Ch. Christodoulou. *Radio Propagation and Adaptive Antennas for Wireless Communication Links: Terrestrial, Atmospheric and Ionospheric*. 1st ed., New York, Taylor and France, 2007. 614 p.
- Blaunstein N., Ch. Christodoulou. *Radio Propagation and Adaptive Antennas for Wireless Communication Networks*: Wiley Series in Microwave and Optical Engineering. Second ed., Wiley, 2014. 760 p.
- Armand N. A., Palatov K. I. Problems of Radio Engineering and Radio Physics. *Radioelektronika i radioelektronika*, 1993, no. 10(38), pp. 1734–1750 (In Russian).
- Feinberg E. L. *Rasprostranenie radiovoln vdol' zemnoi poverkhnosti* [Propagation of Radio Waves along the Terrestrial Surface]. Moscow, Akademiia nauk SSSR Publ., 1961. 546 p. (In Russian).
- Brekhovskikh L. M. Diffraction of Electromagnetic Waves on a Rough Surface. *Doklady Akademii nauk SSSR*, 1951, no. 6(81), pp. 1023–1026 (In Russian).
- Isakovich M. A. Wave Scattering from Statistically Rough Surface. *ZhETF*, 1952, no. 3(23), pp. 305–314 (In Russian).
- Shmelev A. B. Wave Scattering by Statistically Uneven Surfaces. *Uspekhi fizicheskikh nauk* (Advances in Physical Sciences), 1972, no. 3(106), pp. 459–475 (In Russian).
- Krasiuk N. P., Koblov V. L., Krasiuk V. N. *Vliianie troposfery i podstilaiushchei poverkhnosti na rabotu RLS* [Effect of the Troposphere and the Underlying Surface to work the Radar]. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 1988. 216 p. (In Russian).
- Kazakov L. I., Lomakin A. N. *Neodnorodnosti koeffitsienta prelomleniia vozdukh v troposfere* [Discontinuity Coefficient of Refraction of Air in the Troposphere]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 163 p. (In Russian).
- Parshukov V. A., Zrazhevskii A. I., Novichikhin E. P. Impact the Bottom of the Atmospheric Boundary Layer on the Astronomical Radiorefraction. *Tezisy dokladov XXVI Radioastronomicheskoi konf.* [Proc. of XXII Radio Astronomy Conf.], Saint-Petersburg, IPA RAN, 1995, pp. 279–280 (In Russian).
- Blaunstein N. Sh., Sergeev M. B., Shepeta A. P. *Prikladnye aspekty elektrodinamiki* [Applied Aspects of Electrodynamics]. Saint-Petersburg, Agraf +, 2016. 272 p. (In Russian).