

УДК 621.371.34

PACS: 41.20.Jb

## Влияние дождя на искажение радиоимпульса

Н. Д. Наумов, В. А. Никольский

*Рассматривается задача о распространении радиоимпульса в дожде с заданным распределением интенсивности вдоль трассы. Сформулирована процедура расчетной оценки трансформации радиоимпульса с учетом дифракции и ослабляющего влияния дождя. Рассмотрена антенна с прямоугольным излучающим раскрытием, параболическая антенна и рупорная антенна. Показано, что на оси однородно возбужденной прямоугольной антенны и на оси параболической антенны зависимость поля от времени определяется производной начальной временной формы импульса. Предлагаемый метод оценки влияния дифракции на искажение импульса применим в случае любой слабопоглощающей среды.*

*Ключевые слова:* атмосферное ослабление, антенна, дифракция, искажение радиосигнала.

### Введение

Изменение характеристик направленных пучков радиоволн и электромагнитных импульсов в процессе их распространения обусловлено дифракцией, а также ослабляющими и дисперсионными свойствами среды. Оценка ослабления интенсивности излучения по закону Бугера справедлива для монохроматической электромагнитной волны. Этот простой способ можно применить для оценки ослабления узкополосного импульса, используя значение коэффициента ослабления для несущей частоты. В случае широкополосного или сверхширокополосного импульса такой способ не применим, т. к. гармоники будут затухать по-разному в связи с зависимостью коэффициента ослабления от частоты. Поэтому влияние дисперсионных и ослабляющих свойств среды на искажение таких импульсов в процессе распространения имеет более сложный характер.

Ослабление радиоволн в атмосфере обусловлено поглощением электромагнитной энергии молекулами кислорода и водяным паром, а также аэрозолями, туманом, моросью, дождем при их наличии в атмосфере [1]. Свой вклад вносит и рас-

сеяние излучения на указанных метеорологических образованиях. Учет этих эффектов играет важную роль для задач радиосвязи и радиолокации на сантиметровых и миллиметровых волнах, поэтому по этой проблематике накоплен значительный экспериментальный и теоретический материал [2].

Известные методы оценки влияния ослабляющей среды на искажение импульса [3, 4] не позволяют учесть наличие антенны. Целью данной работы является разработка метода учета влияния дождя на трансформацию радиоимпульса, для формирования которого используется антенна с плоским излучающим раскрытием.

### Постановка задачи

На рис. 1 приведена частотная характеристика ослабления излучения атмосферными газами [5]. Как следует из решения задачи о дифракции плоской электромагнитной волны на сфере радиуса  $a$ , степень ослабления волны определяется значением произведения  $ka$ , где  $k = \omega/c$  – волновое число,  $\omega = 2\pi\nu$ ,  $\nu$  – частота волны,  $c$  – скорость света. Размер частиц облаков, туманов, мороси не превышает долей миллиметра, тогда как в дождях существуют капли с размерами 0,1–3,6 мм. Поэтому из указанных гидрометеоров и аэрозолей наибольшее ослабление радиоволн наблюдается в дождях.

Удельное ослабление электромагнитной волны в дожде  $\eta_2$  зависит от частоты волны, интенсивности дождя, температуры и распределения

---

Наумов Николай Дмитриевич, ведущий научный сотрудник.  
Никольский Василий Александрович, начальник отдела.  
ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России.  
Россия, 141307, Московская обл., г. Сергиев Посад-7.  
E-mail: ndnaumov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 15 декабря 2016 г.

© Наумов Н. Д., Никольский В. А., 2017

капель по размерам. Для иллюстрации на рис. 2 представлены частотные характеристики ослабления излучения в случае распределения капель по размерам согласно модели Лоуса-Парсонса [6]. Эти данные показывают, что удельное ослабление максимально для частоты  $\sim 100$  ГГц, а для более высоких частот оно слегка понижается, асимптотически приближаясь к величине, характерной для оптического диапазона.

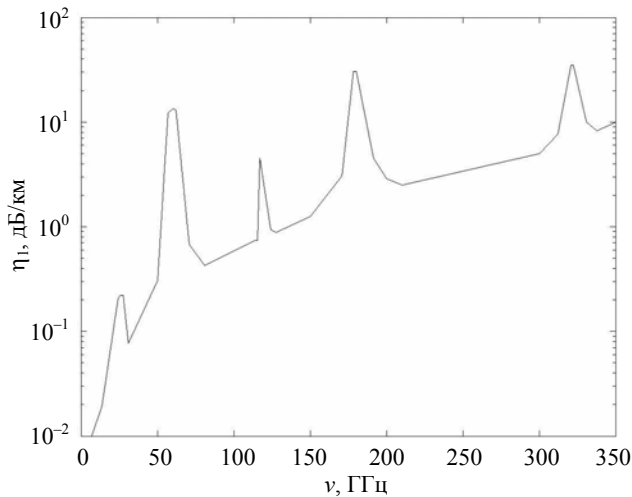


Рис. 1. Частотная характеристика ослабления излучения в атмосфере.

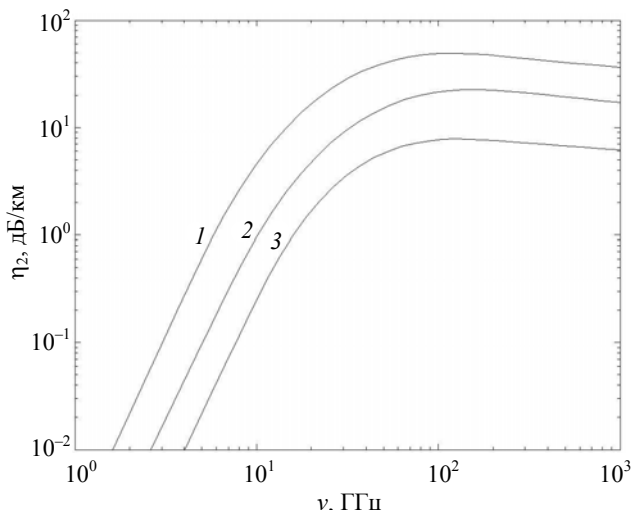


Рис. 2. Частотные характеристики ослабления излучения в дождях различной интенсивности: 1 – 150 мм/ч, 2 – 50 мм/ч, 3 – 12,5 мм/ч.

Дождь будем рассматривать как плоский слой с заданным неоднородным распределением интенсивности по глубине, а также будем использовать две декартовы системы координат. Первая система координат имеет начало в центре антенны передатчика, ее ось  $Ox$  направлена по нормали к дождевому слою, а ось  $Oz$  направлена вертикально вверх. Вторая система координат имеет то же на-

чало, но ее ось  $Oz$  направлена вдоль оси антенны, а ось  $Oy$  расположена в плоскости  $OXY$ .

В случае формирования радиоимпульса с помощью антенны с плоским излучающим раскрытием поле радиоимпульса при  $z = 0$  можно записать в следующем виде:

$$E(t, x, y, 0) = E_0 f(t) w(x, y),$$

где  $f(t)$  – начальная временная форма радиоимпульса,  $w(x, y)$  – распределение поля на апертуре. Задача заключается в нахождении поля радиоимпульса при его распространении в дожде.

### Поле радиоимпульса

Исходим из известного выражения для амплитуды поля монохроматической волны, создаваемой в дальней зоне антенной с плоским излучающим раскрытием при отсутствии ослабляющей среды [7]:

$$A(\omega, r, \theta, \varphi) = \frac{A_0}{2i\lambda r} (1 + \cos \theta) V(\omega, \theta, \varphi),$$

$$V(\omega, \theta, \varphi) =$$

$$= \int w(x, y) \exp \left[ -i \frac{\omega}{c} \sin \theta (x \cos \varphi + y \sin \varphi) \right] dx dy.$$

Ослабление амплитуды монохроматической электромагнитной волны на расстоянии  $r$  от передатчика определяется фактором  $e^{-\mu}$ , где

$$\mu = r \kappa_1(\omega) + \mu_2(r, \omega),$$

$$\mu_2(r, \omega) = \int_0^r \kappa_2(\omega, I(x \cos \psi)) dx. \quad (1)$$

Здесь  $\kappa_1(\omega)$  – коэффициент ослабления излучения в атмосфере,  $\kappa_2(\omega, I)$  – коэффициент ослабления излучения в дожде,  $I = I(X)$  – распределение интенсивности дождя,  $\psi$  – угол между направлением наблюдения и осью  $Ox$ . Обозначим через  $\Phi$  угол между осью  $Ox$  и проекцией оси  $Oz$  на плоскость  $OXY$ , а через  $\Lambda$  – угол между этой проекцией и осью  $Oz$ . Тогда выражение для косинуса угла между направлением наблюдения и осью  $Ox$  запишется в следующем виде:

$$\begin{aligned} \cos \psi &= \cos \theta \cos \Lambda \cos \Phi + \\ &+ \sin \theta (\cos \varphi \sin \Lambda \cos \Phi - \sin \varphi \sin \Phi), \end{aligned}$$

где  $\theta, \varphi$  – углы в сферической системе координат, связанной с осью  $Oz$ , которые характеризуют направление наблюдения.

Импульсное излучение можно представить в виде совокупности монохроматических волн, разлагая функцию  $E(t, r, \theta, \varphi)$  во временной области в интеграл Фурье:

$$E(\omega, r, \theta, \varphi) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} E(t, r, \theta, \varphi) \exp(i\omega t) dt.$$

Тогда для рассматриваемой задачи  $A_0 = E_0 g(\omega)$ , где справедливо выражение:

$$g(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \exp(i\omega t) dt.$$

В итоге для поля радиоимпульса в дальней зоне найдем следующую формулу:

$$E(t, r, \theta, \varphi) = \frac{E_0}{4\pi cr} (1 + \cos \theta) \times \int_{-\infty}^{+\infty} \omega g(\omega) \exp\left(i\frac{\omega}{c}r - i\omega t - \mu\right) V(\omega, \theta, \varphi) d\omega. \quad (2)$$

### Примеры антенны

Рассмотрим некоторые типы антенн. Наиболее простой моделью является антенна с прямоугольным однородно возбужденным раскрывом. В этом случае справедливо соотношение:

$$V = \frac{ab}{uv} \sin u \sin v,$$

где  $a, b$  – размеры апертуры,  $u = (ka \sin \theta \cos \varphi)/2$ ,  $v = (kb \sin \theta \sin \varphi)/2$ . Если же для формирования импульса используется круглая параболическая антенна радиуса  $a$ , то распределение амплитуды поля на апертуре может быть задано в виде «параболы на пьедестале» [7], выражаемое формулой:

$$w = 1 - \frac{1-\tau}{a^2} (x^2 + y^2).$$

Здесь  $\tau = E_1/E_0$ ,  $E_1$  – напряженность поля на краю раскрыва. Для этой антенны применимы соотношения:

$$V = 2\pi a^2 W (ka \sin \theta),$$

$$W(x) = \frac{\tau}{x} J_1(x) + (1-\tau) \frac{2}{x^2} J_2(x),$$

где  $J_1(x), J_2(x)$  – функции Бесселя.

Для обоих типов антенн поле на оси  $Oz$  можно представить в следующем виде:

$$E(t, z, 0, 0) = \frac{E_0 V_0}{2\pi cz} \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(\omega) \exp\left(i\frac{\omega}{c}z - i\omega t - \mu\right) d\omega. \quad (3)$$

Здесь  $V_0 = ab$  – значение функции  $V$  на оси прямоугольной антенны, для параболического зеркала  $V_0 = \pi a^2(1 + \tau)/2$ , а также введено обозначение:

$$\psi(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(t) \exp(i\omega t) dt, \quad \varphi(t) = \frac{df}{dt}.$$

Следует отметить, что при отсутствии дождя выражение (3) существенно упрощается:

$$E(t, z, 0, 0) = \frac{E_0 V_0}{2\pi cz} \varphi(s),$$

где  $s = t - z/c$ . Это согласуется с известным результатом, что во временной области сигнал в дальней зоне соответствует производной исходного импульса [8].

Такая зависимость формы радиоимпульса от времени обусловлена тем, что для этих моделей антенн функция  $V$  на оси  $Oz$  не зависит от  $\omega$ . Для других антенн это условие может не выполняться. Например, в случае секториального  $E$ -плоскостного рупора, т. е. когда выполняется известное соотношение [9]:

$$w = \cos\left(\frac{\pi}{a}x\right) \exp\left(\frac{i\pi}{\lambda L_E}y^2\right),$$

(где  $a, b$  – размеры рупора,  $L_E$  – его длина), для функции  $V$  на оси  $Oz$  получается следующее выражение:

$$V_0 = \frac{2a}{\pi q} [C(qb) + iS(qb)], \quad q = \frac{1}{\sqrt{2\lambda L_E}}.$$

Здесь  $C(x), S(x)$  – интегралы Френеля [10].

### Заключение

Практическая значимость полученных результатов состоит в том, что они позволяют оценить искажение радиоимпульса при его распространении в дожде с учетом дифракции. Расчетный алгоритм заключается в численном вычислении интеграла (2), причем на каждом шаге нужно вычислять интеграл (1), интерполируя для соответствующей частоты приведенные в работе [6] частотные характеристики ослабления излучения от интенсивности дождя.

Предложенный метод оценки влияния дифракции на искажение импульса можно применить в случае любой слабо поглощающей среды, выбирая соответствующий коэффициент ослабления.

*Авторы выражают благодарность А. А. Рухадзе за замечание о необходимости учета ослабления атмосферными газами, которое по величине сравнимо с ослаблением в дождях, а также за ряд других замечаний, способствующих улучшению работы.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Розенберг В. И. Рассеяние и ослабление электромагнитного излучения атмосферными частицами. – М.: Гидрометеиздат, 1972.

2. Справочник по радиолокации, т. 1 / Под ред. М. Скольникова. – М.: Советское радио, 1976 [*Radar Handbook*, ed. by M. I. Skolnik (Mcgraw-Hill Book Company, 1970)].
3. Кузевлев М. В., Рухадзе А. А. // *Радиофизика*. 1979. Т. 22. № 10. С. 1223.
4. Стадник А. М., Ермаков Г. В. // *Радиотехника и электроника*. 1995. Т. 40. С. 1009.
5. Бецкий О. В. // *Радиотехника и электроника*. 1993. Т. 38. С. 1760.
6. Oguchi T. // *Proc. IEEE*. 1983. Vol. 71. P. 1029.
7. Кочержевский Г. Н. Антенно-фидерные устройства. – М.: Радио и связь, 1981.
8. Астанин Л. Ю., Костылев А. А. Основы сверхширокополосных радиолокационных измерений. – М.: Радио и связь, 1989.
9. Корбанский И. Н. Антенны. – М., Энергия, 1973.
10. Справочник по специальным функциям, под ред. М. Абрамовица и И. Стюгана. – М.: Наука, 1979 [*Handbook of Mathematical Functions*, ed. by M. Abramovitz and I. A. Stegun. (National Bureau of Standards, USA, 1964)].

PACS: 41.20.Jb

## The effect of a rain on the radio-wave pulse distortion

*N. D. Naumov and V. A. Nikolsky*

12-th Central Research Institute  
Sergiev Posad-7, Moscow region, 141307, Russia  
E-mail: ndnaumov@mail.ru

*Received December 15, 2016*

***The problem of the radio-wave pulse propagation across the rain is considered. The radio-wave pulse field estimation technique for far region is developed. The approach proposed takes into account the diffraction and the radio signal attenuation. Uniformly excited rectangular antenna, parabolic antenna and the horn-type antenna are considered. It is shown that the temp dependence of the field on the axis of uniformly excited rectangular antenna and on the axis of parabolic antenna is determined by the derivative of initial temporal pulse form. The technique proposed is applicable to the pulse distortion estimation for any feeble absorbent medium.***

***Keywords:*** atmospheric attenuation, antenna, diffraction, radio signal distortion.

#### REFERENCES

1. V. I. Rozenberg, *Scattering and Attenuation of Electromagnetic Radiation by Atmospheric Particles* (Gidrometeoizdat, Moscow, 1972) [in Russian].
2. *Radar Handbook*. Ed. by M. I. Skolnik (Mcgraw-Hill Book Company, 1970; Sov. Radio, Moscow, 1976).
3. M. V. Kuzelev and A. A. Rukhadze, *Radiofizika* **22**, 1223 (1979).
4. A. M. Stadnik and G.V. Ermakov, *Radiotekhnika i Elektronika*, **40**, 1009 (1995).
5. O. V. Betsky, *Radiotekhnika i Elektronika*, **38**, 1760 (1993).

6. T. Oguchi, *Proc. IEEE* **71**, 1029 (1983).
7. G. N. Kocherjevsky, *Antenna and Feeder Devices* (Radio i Svyaz, Moscow, 1981) [in Russian].
8. L. Yu. Astanin and A. A. Kostylev, *Foundations of Superwide-Band Radar Measurements* (Radio i Svyaz, Moscow, 1989) [in Russian].
9. I. N. Korbansky, *Antennas* (Energiya, Moscow, 1973) [in Russian].
10. *Handbook of Mathematical Functions*. Ed. by M. Abramovitz and I. A. Stegun (National Bureau of Standards, USA, 1964; Nauka, Moscow, 1979).