УДК 621.371.34.029(06)

А. В. КОБЗЕВ, д-р техн. наук, А. Н. БОВКУН

АНАЛИЗ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЫСТРЫХ ФЛУКТУАЦИЙ СИГНАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ДАЛЬНЕГО ТРОПОСФЕРНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН

Существует достаточно большое количество работ, описывающих механизм дальнего тропосферного распространения (ДТР) радиоволн. Теоретические аспекты, подтверждающие теорию слоевого переотражения в тропосфере, фундаментально освещены в литературе [1–8]. Соответствующие модели подтверждают тот факт, что сигнал при ДТР в основном создается рассеянным переизлучением первичной волны крупномасштабными неоднородностями, которые за время распространения сигнала остаются почти неизменными по форме и неподвижными.

В ряде работ [1; 2] показано, что, помимо рассеяния электромагнитной энергии объемными неоднородностями, имеет место и когерентное отражение радиоволн от всей толщи тропосферы, обусловленное плавной зависимостью ее диэлектрической проницаемости от высоты. Оно должно проявляться даже при отсутствии объемных и слоистых неоднородностей.

Исследование сигнала, прошедшего канал ДТР, в аналитическом виде вызывает значительные затруднения, поэтому создание имитационной модели, адекватной реальным условиям распространения радиоволн, является актуальной задачей.

В работах [1; 4] рассмотрено физическое строение тропосферы и предложена ее физическая модель. Данная модель строится исходя из «среднего» профиля, слоев и флуктуаций диэлектрической проницаемости.

На основе физической модели нами построена имитационная модель сигнала, прошедшего многолучевой канал распространения радиоволн.

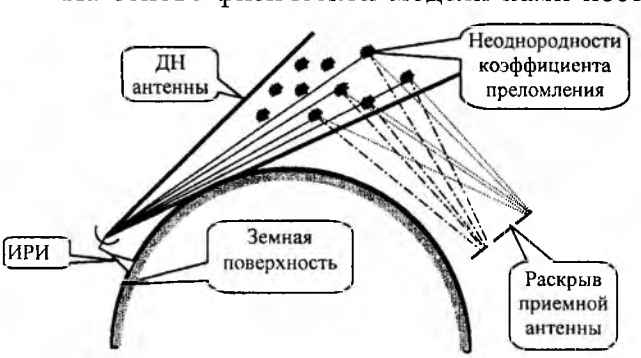

Рис. 1

Эта модель предназначена для исследования, в первую очередь, процессов, вызываемых мелкими неоднородностями диэлектрической проницаемости воздуха. Схематично модель переотражения на неоднородностях диэлектрической проницаемости представлена на рис. 1.

Излучение на выходе передающего пункта можно считать плоской волной, так как оно полностью определяется конструктивными особенностями антенны. Поэтому в имитационной модели ДТР антенна передающего пункта представлена точечным источником с заданной диаграммой направленности.

В тропосфере неоднородности диэлектрической проницаемости воздуха расположены случайным образом и имеют случайное значение коэффициента преломления. Сигнал, принимаемый антенной, является суперпозицией сигналов, переотраженных от неоднородностей ε, и обладает случайной амплитудой и фазой. В имитационной модели бесконечное число неоднородностей ε учесть затруднительно. Поэтому весь объем переизлучения V разбит на n равных частей, каждая из которых имеет размеры значительно больше размеров отдельных неоднородностей. Усреднив все интенсивности неоднородностей, находящихся в каждом объеме V_i, где $i = 1, \ldots, n$, получим точечный излучатель. Реализованный таким образом точечный переотражатель характеризуется своим приведенным коэффициентом

преломления, фазовым сдвигом, а также значением и направлением вектора скорости перемещения, т.е.

$$N_i = \overline{N_{V_i}} e^{j\chi}, \tag{1}$$

где $\overline{N_{V_i}}$ – усреднение всех неоднородностей диэлектрической проницаемости, находящихся в V_i-м объеме переотражения; χ_i – случайная фаза, приобретаемая при переотражении на неоднородностях, $\overline{\chi_i \cdot \chi_l} = 0$ при $i \neq l$.

Для того чтобы смоделировать работу антенны в приемном пункте, представим ее в виде решетки с прямоугольным раскрывом. Расстояние между элементами решетки выбрано равным $\lambda/2$. В каждом элементе антенной решетки производится суммирование сигналов, отраженных от всех неоднородностей диэлектрической проницаемости тропосферы, которые попали в диаграмму направленности источника радиоизлучения (ИРИ) и находятся в пределах прямой видимости соответствующего элемента приемной антенной решетки.

Как известно [7], сигнал на выходе приемной антенны определяется следующим выражением:

$$\dot{u}(\boldsymbol{\alpha}) = \int_S A(\mathbf{x}) \dot{y}(\mathbf{x}) e^{j(\boldsymbol{\alpha}\cdot\mathbf{x} - k\mathbf{1}\cdot\mathbf{x})} d^2\mathbf{x}, \tag{2}$$

где α – вектор, задающий фазовое распределение в раскрыве; $A(\mathbf{x})$ – амплитудное распределение в раскрыве; $\mathbf{x}$ – радиус-вектор, лежащий в плоскости раскрыва; S – площадь раскрыва; $\dot{y}(\mathbf{x})$ – амплитуда поля принимаемой волны; $\kappa = 2\pi/\lambda$ – волновое число; 1 – единичный вектор, направленный на ИРИ.

Тогда выражение (2) в дискретном виде можно записать так:

$$\dot{u}(t) = \sum_{l=1}^{M} \sum_{k=1}^{L} \dot{A}_{l,k} \cdot \sum_{i=1}^{n} \dot{B}_i S_0(t - \tau_{i,l,k}) e^{j(\psi_0(t-\tau_{i,l,k}) + \chi_i + \omega_0 \tau_{i,l,k})}, \tag{3}$$

где M, L – количество элементов в антенной решетке по вертикали и горизонтали; $\dot{A}_{l,k} = |\dot{A}_{l,k}| \cdot e^{j\varphi_{l,k}}$ – амплитудно-фазовое распределение в раскрыве антенны, создаваемое облучателями антенной решетки; $B_i = f(N_i)$ – случайный амплитудный множитель, являющийся функцией от N_i; $S_0(t-\tau_{i,l,k})$ – закон изменения огибающей сигнала ИРИ; $\tau_{i,l,k}$ – время задержки распространения сигналов от ИРИ до l,k-го элемента антенной решетки при переотражении на i-х неоднородностях диэлектрической проницаемости тропосферы, которые попали в диаграмму направленности передающей антенны и находятся в пределах прямой видимости приемной; $\psi_0(t-\tau_{i,l,k})$ – закон фазовой модуляции сигнала ИРИ; ω_0 – несущая частота.

На основании выражения (3) была построена имитационная модель канала ДТР радиоволн.

Входными параметрами для модели являются: 1) по источнику радиоизлучения: несущая частота сигнала, функции модуляции амплитуды и фазы сигнала, вид диаграммы направленности ИРИ, ширина и частота вращения диаграммы направленности; 2) по тропосферному каналу распространения радиоволн: дистанция связи, объем переотражения, количество неоднородностей в тропосферном объеме переотражения, значение и направление вектора скорости перемещения неоднородностей, высотное распределение интенсивностей неоднородностей диэлектрической проницаемости воздуха; 3) по приемному пункту: наличие одно- или двумерной антенны, амплитудное и фазовое распределение по раскрыву, размеры раскрыва, скорость вращения антенны.

Параметры тропосферы устанавливались следующим образом. Количество турбулентных неоднородностей тропосферы выбиралось исходя из противоречивых требований: учитывались время проведения вычислений персональным компьютером и необходимая точность имитации. В качестве компромисса количество неоднородностей n выбрано равным 500. Направление перемещения каждой неоднородности внутри объема переизлучения выбирается случайно. Скорости движения неоднородностей считались распределенными по равномерному закону в интервале $0 \ldots V_{макс}$, где $V_{макс}$ – максимальная скорость перемещения неоднородностей, которая при моделировании принимала значение 3, 5 или 10 м/с. Нормированный коэффициент преломления воздуха в неоднородностях задавался в комплексном виде. Модуль нормированного коэффициента преломления формировался по рэлеевскому закону, а фаза – по равномерному.

Адекватность модели оценивалась путем сравнения статистических характеристик сигналов на выходе модели с характеристиками, полученными экспериментальным путем и приведенными в литературе [1 – 3]. Ниже рассмотрены результаты моделирования.

На рис. 2, *а* показан модуль комплексной амплитуды монохроматического колебания с длиной волны 10 см на выходе модели канала ДТР длиной 300 км. Исходя из вида зависимости можно сделать вывод о том, что модуль комплексной амплитуды – это случайный процесс. Гистограмма распределения амплитуд представлена на рис. 2, *б*. По оси абсцисс отложены амплитуды сигналов, а по оси ординат – отсчеты амплитуды (общее количество отсчетов – 1024). Как видно из этого рисунка, амплитуда сигнала на выходе модели распределена по закону, близкому к рэлеевскому. Автокорреляционная функция данной реализации показана на рис. 2, *в*. Время корреляции измерялось по уровню e^{-1} и в рассматриваемой реализации примерно равно 0,2 с. Среднее время корреляции сигналов на длине волны 10 см, определенное экспериментальным путем и указанное в [1; 3], составляет 0,15…0,4 с.

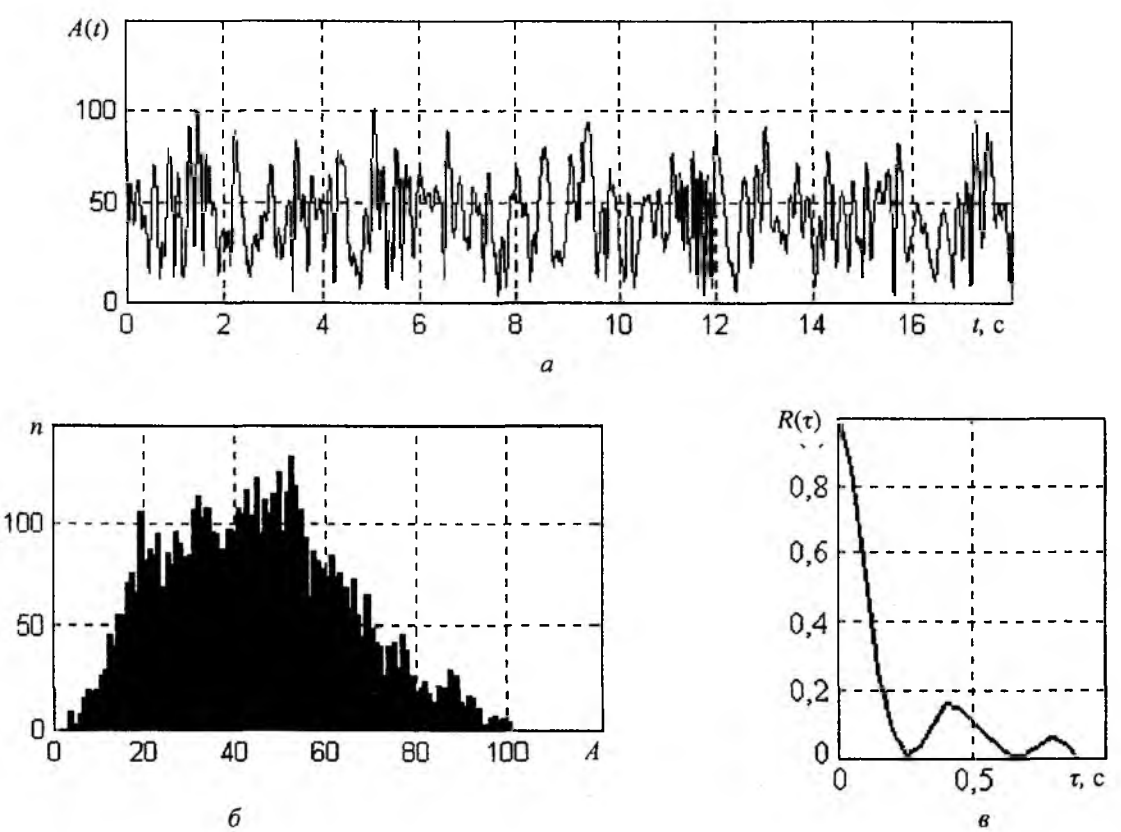

Рис. 2

В ходе моделирования на трассе длиной 300 км при скорости ветра 3 м/с были получены автокорреляционные функции комплексных амплитуд для различных длин волн. Некоторые соотношения приведены ниже:

λ, см	3	5	10	30	100
τ, с	0,05...0,13	0,15...0,2	0,2...0,35	0,7...1,3	2,2...3,0

Функции зависимости времени корреляции от длины волны для некоторых реализаций представлены на рис. 3.

Для конкретной реализации многолучевого канала зависимость амплитуд и фаз отдельных составляющих многолучевого сигнала от их запаздывания определяется комплексной импульсной реакцией $S(\tau)$ [2], т.е. откликом многолучевого канала, при подаче на его вход «радиоимпульса» с частотой ω_0 и огибающей в виде δ-функции. Для характеристики многолучевого канала в целом вводится энергетическая импульсная реакция [2], которая получается в результате усреднения по всем возможным реализациям квадрата модуля импульсной реакции, т.е.

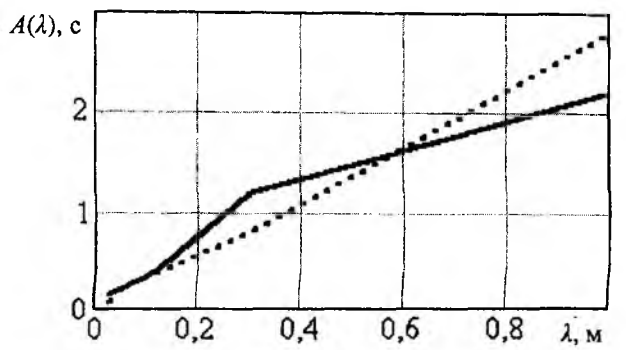

Рис. 3

$$G(\tau)=\overline{|S(\tau)|^2}. \qquad (4)$$

Энергетическая импульсная реакция предлагаемой модели оценивалась по методике, предложенной в [2]. Там же показана реальная энергетическая импульсная реакция канала ДТР на трассе длиной 300 км при длине волны 10 см (пунктир на рис. 4). Для сравнения с результатами из [2] оценка энергетической импульсной реакции имитационной модели проводилась на трассе той же длины и на той же частоте. Нормированная диаграмма энергетической импульсной реакции модели приведена также на рис. 4 (сплошная линия). Передний фронт данной кривой очень точно совпадает с экспериментальной энергетической импульсной реакцией. Задний фронт несколько затянут и искажен, но искажения весьма малы, и ими можно пренебречь.

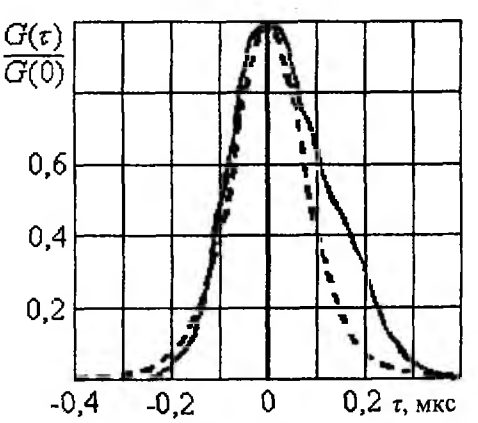

Рис. 4

Угловые размеры тропосферного объема переотражения модели измерялись в диапазоне 1000...11000 МГц с шагом 3000 МГц. Измерение заключалось в записи уровня сигнала на выходе модели при каждом фиксированном положении передающей антенны. Приемная антенна оставалась неподвижной и была направлена на передающую. Сканирование осуществлялось в пределах ± 10° относительно прямой, соединяющей передающий и приемный пункты модели. Расстояние между фиксированными уровнями составляло 0,1°. Измерения проводились для расстояний 150, 300 и 650 км. Угловой размер объема переотражения модели по азимуту на всех частотах и на всех трассах составлял в среднем 1° по половинной мощности. Результаты натурных экспериментов по измерению угловых размеров объема переотражения опубликованы в [2]. Результаты моделирования и экспериментальных исследований, представленные в [2], хорошо согласуются.

Частотная функция корреляции модели на трассе длиной 300 км на частоте 1000 МГц показана на рис. 5. Она практически точно повторяет функции частотной корреляции, полученные экспериментально на трассе такой же длины на частоте 1000 МГц [1; 2], и может быть аппроксимирована гауссовой кривой.

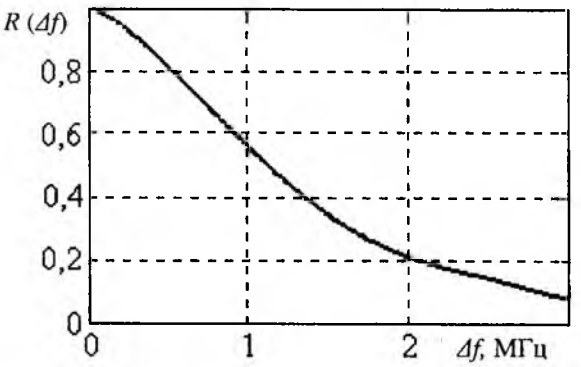

Рис. 5

При ДТР амплитуда и фаза поля в апертуре приемной антенны представляют собой случайные функции времени и пространственных координат. Параметры антенны, в частности диаграмма направленности и коэффициент усиления, также являются случайными функциями времени. На рис. 6 изображены мгновенные диаграммы направленности антенн, смоделированные для трассы длиной 300 км и длины волны 10 см. При этом искажения диаграммы направленности антенны можно разделить на три типа: слабые, когда диаграмма направленности антенны при ДТР мало искажена по сравнению с диаграммой в свободном пространстве (рис. 6, *б*); средние искажения (рис. 6, *а*); сильные искажения (рис. 6, *в*), когда диаграмма направленности распадается на два практически равнозначных луча. При оценке потерь усиления антенн в модели, в зависимости от реализации, были получены результаты в пределах 3...8 дБ. Результаты моделирования потерь усиления антенн также хорошо согласуются с данными, представленными в литературе.

На рис. 7 показана зависимость коэффициента корреляции от углового разноса антенн. Измерения проводились при условиях, аналогичных указанным в [3]: длина волны 10 см, длина трассы 200 км, ширина диаграммы направленности передающей антенны 5°, приемной – 2,5°. Результаты моделирования соответствуют кривой *1*. Кривые *2* и *3* показывают

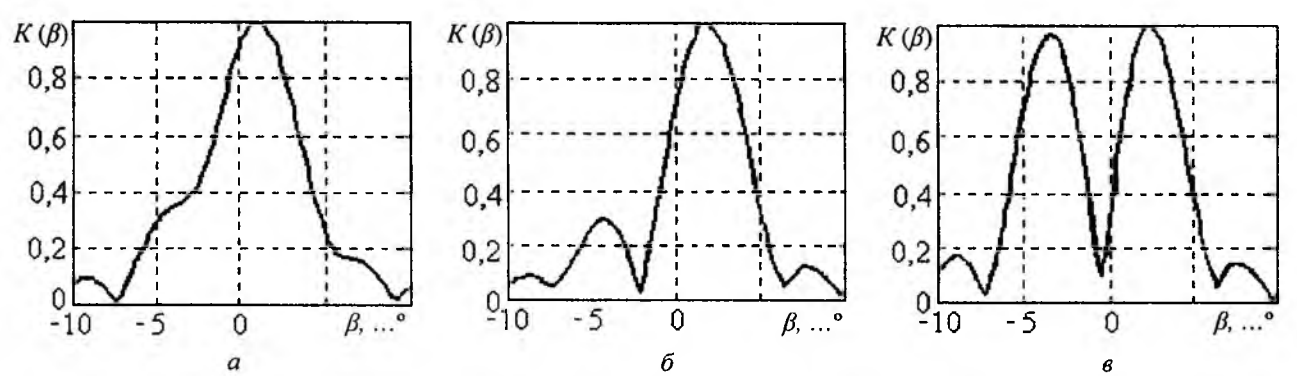

Рис. 6

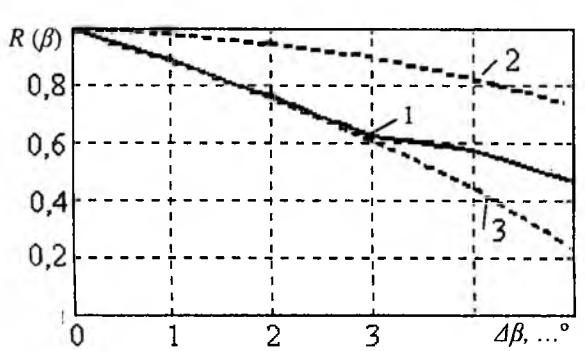

Рис. 7

области разброса значений коэффициента угловой корреляции, полученные экспериментально на реальных трассах и приведенные в [2; 3].

Сравнение результатов моделирования с результатами экспериментальных исследований эффекта ДТР ультракоротких волн показало хорошую адекватность модели процессам, протекающим в атмосфере и влияющим на распространение радиоволн. Это позволяет использовать предложенную имитационную

модель для анализа статистических характеристик сигналов, прошедших канал ДТР. Анализ сигнала может производиться для различных длин волн, дистанций связи и характеристик приемной и передающей антенн.

Список литературы: 1. *Дальнее* тропосферное распространение ультракоротких радиоволн / Под ред. Б. А. Введенского и др. М.: Совет. радио, 1965. 415 с. 2. *Дальняя* тропосферная радиосвязь / И. А. Гусятинский, А. С. Немировский, А. В. Соколов, В. Н. Троицкий. М.: Связь, 1968. 248 с. 3. *Экспериментальное* исследование дальнего тропосферного распространения ультракоротких радиоволн / Под ред. Я. С. Шифрина. Х.: АРТА, 1964. 103 с. 4. *Казаков Л. Я.* Неоднородности коэффициента преломления воздуха в тропосфере / Л. Я. Казаков, А. Н. Ломакин. М.: Наука, 1976. 162 с. 5. *Рудаков В. И.* Тропосферные системы связи с адаптивными антеннами. К.: ЦНИИ ВВТ ЗСУ, 1999. 292 с. 6. *Фейнберг Е. Л.* Распространение радиоволн вдоль земной поверхности. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 546 с. 7. *Кравцов Ю. А.* Прохождение радиоволн через атмосферу Земли / Ю. А. Кравцов, З. И. Фейзулин, А. Г. Виноградов. М.: Радио и связь, 1983. 223 с. 8. *Шифрин Я. С.* Вопросы статистической теории антенн. М.: Совет. радио, 1970. 283 с.

Харьковский военный университет

Поступила в редколлегию 05.03.2002