УДК 621.396.674.1
Л.М. Лобкова, д-р техн. наук, профессор,
В.В. Головин, канд. техн. наук,
Севастопольский национальный технический университет
ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 99053
E-mail: v_golovin@mail.ru

СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТУРБУЛЕНТНОЙ АТМОСФЕРЫ ДЛЯ МОРСКИХ СИСТЕМ РАДИОСВЯЗИ

Приведены основные характеристики турбулентных неоднородностей и представлены две модели атмосферы в приводном слое для расчета морских каналов связи.
***Ключевые слова**: морской канал связи, антенна, Гаусова модель.*

За последнее десятилетие на морских трассах значительно возросло практическое использование УКВ диапазона (наряду с КВ диапазоном), включая сантиметровые и миллиметровые волны. Использование указанных диапазонов радиоволн вызвано необходимостью обеспечения высокой надежности радиосвязи в пределах зоны прямой видимости, особенно при наличии большого количества судов. В обычных условиях ультракороткие волны не отражаются от ионосферы, и на их распространение существенное влияние оказывает приводный слой атмосферы, основной характеристикой которого являются показатель преломления $n(x,y,z,t)$ и его высотный профиль $n(h)$, где h — высота, отсчитываемая от среднего уровня моря. Только на морских трассах наблюдаются инверсионные слои, которые приводят к явлению сверхрефракции, в результате которой распространение электромагнитных волн происходит как в сферическом волноводе.

Целью данной работы является детальный анализ моделей турбулентных неоднородностей, позволяющих определить флуктуации амплитуды и фазы электромагнитной волны, проходящей через слой атмосферы.

Наряду с атмосферными волноводами в приводном слое образуются неоднородности показателя преломления $n(x,y,z,t)$, обусловленные турбулентным движением воздушных масс, которые приводят к рассеянию радиоволн. Таким образом, в приводном слое атмосферы наряду с регулярными изменениями n с высотой h будут иметь место флуктуации показателя преломления, и, следовательно, величину n необходимо рассматривать как случайную функцию пространственных координат и времени. Определим флуктуацию показателя преломления n_1 с помощью соотношения

$$n_1(x,y,z,t) = \langle n(x,y,z,t) \rangle - n(x,y,z,t), \tag{1}$$

где $\langle n(x,y,z,t) \rangle$ — среднее значение показателя преломления по времени, которое характеризует стационарность случайного процесса, либо среднее значение показателя преломления по пространству, которое характеризует однородность поля.

Как показывают экспериментальные исследования [1–3] флуктуации показателя преломления $n_1(x,y,z,t)$ носят нестационарный и неоднородный характер.

Математический аппарат для описания флуктуаций $n_1(x,y,z,t)$ применяется для следующих случаев:

– когда $\overline{n(t)} = const$, флуктуации $n_1(x,y,z,t)$ являются стационарным случайным процессом;

– когда $\overline{n(t)} \neq const$, используется теория стационарных случайных процессов, имеющих стационарные приращения.

По аналогии с изложенным выше рассматриваются однородные случайные поля, то есть проводится анализ пространственных флуктуаций $n_1(x,y,z)$, и однородные случайные поля со стационарным приращением. На основании проведенного исследования характера образования турбулентных неоднородностей можно выделить наибольшие размеры неоднородности, которые соизмеримы с размером исходного воздушного потока, и обозначить их как L_0.

Также в атмосфере можно выделить мелкомасштабные локально-изотропные неоднородности с внутренним масштабом l_0. Тогда возможные размеры неоднородностей принимают значения в интервале

$$l_0 << l_{\text{турб}} << L_0 .$$

Для описания свойств реальной атмосферы применяются две модели:

− модель изотропной турбулентности, Гаусова модель;

− модель локально-изотропной турбулентности, Колмогоровская модель.

Приведем основные соотношения для данных моделей атмосферы.

Гаусова модель. В реальных условиях образуется несколько турбулентных неоднородностей, однако для практических расчетов используется один масштаб турбулентности. При этом спектр плотности пространственных волновых чисел χ для флуктуаций $n_1(r,t)$ принимает вид

$$S(\chi)=\left\langle n_1^2\right\rangle \frac{r_0^3}{8\pi\sqrt{\pi}} exp\left(-\frac{r_0^2\chi^2}{4}\right), \qquad (2)$$

где r_0 — пространственный радиус корреляции флуктуации $n_1(r,t)$.

Спектральной плотности $S(\chi)$ соответствует корреляционная функция

$$R_{\text{пл}}=\left\langle n_1^2\right\rangle exp\left(-\frac{r^2}{r_0^2}\right). \qquad (3)$$

Колмогоровская модель. Для данной модели применяются структурные функции при описании флуктуаций $n_1(r,t)$ [1]. Спектральная плотность для этой модели $S(\chi)$ хорошо изучена в инерциальной области значений χ

$$\frac{2\pi}{L_0} << \chi << \frac{2\pi}{l_0}$$

и определяется соотношением

$$S(\chi)\approx 0{,}033 C_{n1}^2 \chi^{-\frac{11}{3}},$$

где C_{n1}^2 — структурная постоянная $n_1(r,t)$.

В области диссипации используются соотношения вида:

$$S(\chi)\approx \chi^{-\frac{11}{3}};$$

$$S(\chi)\approx \exp\left(-\frac{\chi^2}{\chi_{ä}^2}\right),$$

где $\chi_{\text{д}}=\frac{5{,}92}{l_0}$.

С учетом изложенного предложена следующая формула для численных расчетов

$$S(\chi)=0{,}033 C_{n1}^2 \chi^{-\frac{11}{3}} \exp\left(-\frac{\chi^2}{\chi_{ä}^2}\right). \qquad (4)$$

Таким образом, соотношение (4) достаточно правильно описывает $S(\chi)$ в инерциальной области и является приближенным в диссипативной области. Преобразуя $S(\chi)$ по Фурье с учетом (3) и (4), получаем для структурных функций $D_{n1}(r)$ следующие соотношения:

$$D_{n1}(r)=C_{n1}^2 r^{\frac{2}{3}}, \text{ при } L_0 >> r > l_0; \qquad (5)$$

$$D_{n1}(r)=C_{n1}^2 l_0^{\frac{2}{3}}\left(\frac{r^2}{l_0^2}\right), \text{ при } r << l_0. \qquad (6)$$

Сведения о масштабах l_0, L_0, C_{n1}^2 можно получить для реальных трасс только из экспериментальных данных.

В качестве примера рассмотрим применение Гауссовой модели турбулентной атмосферы для определения флуктуаций фазы электромагнитной волны, прошедшей слой атмосферы. Для этого воспользуемся первым приближением метода Рытова [2], которое при выполнении условий

$$l_{\text{турб}} >> \lambda;$$

$$\sqrt{\lambda L} << l_{\text{турб}},$$

где L — длина трассы.

Данные соотношения позволяют определить случайные изменения фазы волны, обусловленные наличием крупномасштабных неоднородностей на основании следующей формулы

$$\varphi(x,y,z)=kx+k\int_0^L n_1(x',y,z)\mathrm{d}x', \qquad (7)$$

где $k=\dfrac{2\pi}{\lambda}$ — волновое число.

На рисунке 1 пунктирными линиями показаны хаотические траектории лучей, прошедших турбулентный слой толщиной $x=L$.

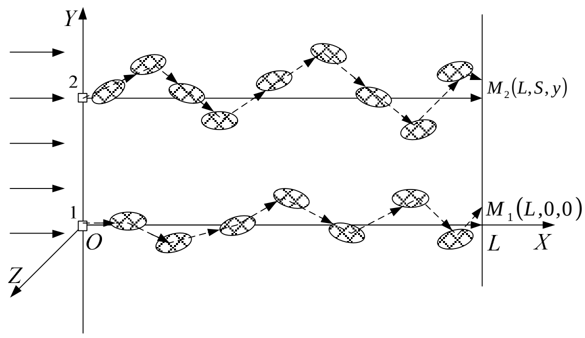

Рисунок 1 — Модель распространения электромагнитных волн в неоднородной атмосфере

В соотношении (7) первое слагаемое определяет постоянную фазу волны, равную $\varphi_0=kL$. Особый интерес в (7) представляет второе слагаемое

$$\varphi_1=k\int_0^L n_1(x',y,z)\mathrm{d}x',$$

зависящее от флуктуаций показателя преломления $n_1(x',y,z)$.

Для дисперсии фазы волны σ_φ^2 можно получить следующую формулу

$$\sigma_\varphi^2=\left\langle\varphi_1^2\right\rangle-\left\langle\varphi_1\right\rangle^2=\sqrt{\pi}k^2Lr_0\left\langle n_1^2\right\rangle.$$

При определении функции корреляции $R_\varphi(S)$ воспользуемся спектральной плотностью $S(\chi)$.

С учетом обозначений на рисунке 1 можем составить следующее выражение

$$R_\varphi(S)=\left\langle\varphi_1\varphi_2\right\rangle=k^2\int_0^L\mathrm{d}x_1\int_0^L\left\langle n_1(x_1,0,0)n_2(x_2,y_2,z_2)\right\rangle\mathrm{d}x_2, \qquad (8)$$

где $\left\langle n_1(x_1,0,0)n_2(x_2,0,S)\right\rangle=R_{n1}(x_1-x_2,S)$ — корреляционная функция флуктуаций $n_1(x,y,z)$.

Подставив R_{n1} в (8) и введя новую переменную $\xi=x_1-x_2$, получим

$$R_\varphi(S)=2k^2L\int_0^\infty R_{n1}(\xi,S)\mathrm{d}\xi, \qquad (9)$$

где

$$R_{n1}(\xi,S)=2\pi\int_0^\infty S(\chi,\xi)J_0(\chi\xi)\chi\mathrm{d}\chi. \qquad (10)$$

После подстановки (10) в (9) и интегрирования, получим выражение

$$R_\varphi(S)=\sigma_\varphi^2\exp\left(-\frac{S^2}{r_0^2}\right). \qquad (11)$$

Сравнение соотношения (11) с формулой (3) показывает, что пространственная корреляция флуктуаций фазы полностью зависит от R_{n1}, а их радиусы корреляции совпадают.

На основании проведенного исследования статистических моделей атмосферы для морских трасс можно сделать следующие выводы:

− обоснованы две модели турбулентных неоднородностей, позволяющие определить флуктуации амплитуды и фазы электромагнитной волны, проходящей через слой атмосферы;

− выведены формулы для дисперсии фазы σ_{φ}^{2} и корреляционной функции $R_{\varphi}(S)$ для Гауссовой модели, которые показали полное соответствие с флуктуациями показателя преломления $n_1(r)$;

− предложенная методика определения фазовых флуктуаций для плоской электромагнитной волны позволит в дальнейшем рассматривать реальные антенны, для которых элементарные излучатели (диполь Герца или элемент Гюйгенса) создают сферическую волну.

В дальнейшем предполагается определить фазовые флуктуации сферической электромагнитной волны, прошедшей слой атмосферы.

Библиографический список использованной литературы

1. Татарский В.И. Распространение радиоволн в турбулентной атмосфере / В.И. Татарский. — М.: Наука, 1967. — 548 с.
2. Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику / С.М. Рытов. — М.: Радио и связь, 1976. — Ч. 1. — 494 с.
3. Лобкова Л.М. Распространение радиоволн над морской поверхностью / Л.М. Лобкова. — М.: Радио и связь, 1991. — 256 с.

Поступила в редакцию 18.03.2013 г.

Лобкова Л.М., Головін В.В. Статистична модель турбулентної атмосфери для морських систем радіозв'язку

Наведені основні характеристики турбулентних неоднорідностей та представлено дві моделі атмосфери в приводному шарі для розрахунків морських каналів зв'язки.

Ключові слова: Морський канал зв'язку, антена, Гаусова модель.

Lobkova L.M., Golovin V.V. Statistical model of the turbulent atmosphere for the radio communication shipborne systems

The main characteristics of turbulent heterogeneities are introduced and two models of the atmosphere in a surface layer for calculation of sea communication channels are presented.

Keywords: Sea communication channel, antenna, Gausse model.