

621.396.674.1

**Л.М. Лобкова, д-р техн. наук, професор,****В.В. Головин, канд. техн. наук***Севастопольский национальный технический университет**ул. Университетская, 33, 99053, г. Севастополь,**E-mail: v\_golovin@mail.ru***СТАТИСТИКА ПОЛЯ В АПЕРТУРЕ ПРИЕМНОЙ АНТЕННЫ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ РАДИОСВЯЗИ**

*Проведен анализ статистических характеристик поля излучения в пределах апертуры приемной антенны с учетом влияния турбулентной атмосферы. Представлена статистическая модель поля как для случая ненаправленного излучателя в виде элемента Гюйгенса, так и для передающей антенны с заданной апертурой.*

**Ключевые слова:** Гауссова модель, Колмогоровская модель, статистическая теория антенн.

В настоящее время в мире развернута глобальная сеть линий связи с использованием ретрансляторов в виде искусственных спутников Земли (ИСЗ). В этой связи на одно из первых мест выходит проблема разработки нового поколения антенн, которые во многом являются решающим фактором обеспечения заданной пропускной способности системы связи, а также ее электромагнитной совместимости.

Эффективность работы приемных антенн, расположенных как на ИСЗ, так и в составе земных станций ЗС (см. рисунок 1) во многом определяется пространственно-временными характеристиками принимаемого сигнала, которые обусловлены влиянием статистически-неоднородной турбулентной тропосферы.

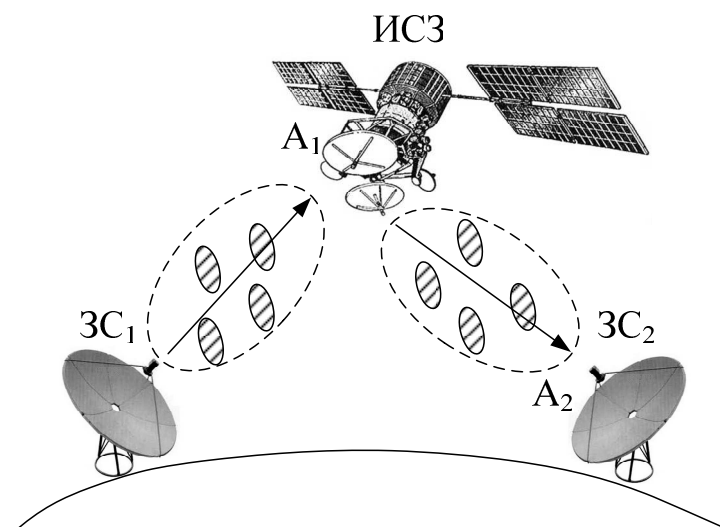


Рисунок 1 – Схема расположения приемной антенны  $A_1$  на ИСЗ и антенны  $A_2$  на земной станции  $ЗС_2$

На рисунке 1 изображены две приемные антенны  $A_1$  и  $A_2$ , однако оценка их характеристик будет различна в виду особенностей влияния земной поверхности и космического излучения. В первую очередь это влияние проявится в оценке шумовой температуры антенн. На рисунке 1 также выделена существенная область распространения радиоволн как в сторону ИСЗ, так и  $ЗС_2$ .

Рассмотрим интервал линии связи  $ЗС_1$  – ИСЗ, исходя из требуемых условий отношения С/Ш на входе приемника ИСЗ. При этом основная проблема сводится к определению оптимальных геометрических параметров приемной антенны  $A_1$ . До сих пор расчет характеристик поля излучения приемных антенн основывался на использовании теоремы взаимности, согласно которой характеристики приемной антенны рассматриваются, исходя из соображения, что волна является плоской. Иными словами, рассчитываются характеристики приемной антенны на основании ее замены передающей антенной.

При размещении антенны в неоднородной атмосфере этого делать нельзя, так как поле в апертуре приемной антенны будет иметь случайных характер как амплитудного, так и фазового распределений,

которые можно описать, учитывая только характер взаимодействия электромагнитной волны со случайно-неоднородной средой. В дальнейшем для определения статистических свойств реальной атмосферы будем использовать две модели:

- 1) для случая однородной изотропной турбулентности флуктуации показателя преломления описываются с помощью корреляционных функций;
- 2) для локально-изотропной турбулентности флуктуации показателя преломления описываются с помощью структурных функций, предложенных Колмогоровым.

Задача может быть сформулирована следующим образом. Пусть апертура передающей антенны расположена в плоскости  $X_1Y_1O$  (см. рисунок 2), а приемная антенна — в плоскости  $X'_1Y'_1L$ . Тогда, пользуясь Френелевским приближением, на основании формулы Гюйгенса-Кирхгоффа можем записать поле в любой точке апертуры приемной антенны. Решение данной задачи представлено в работах [1, 2].

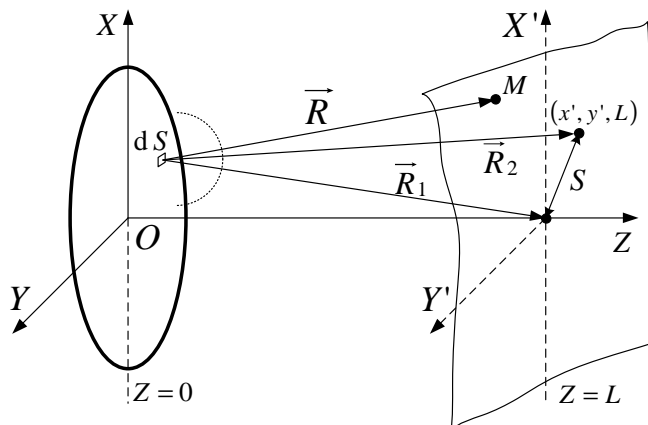


Рисунок 2 — Геометрия расположения апертур передающей и приемной антенн

Целью данной статьи является исследование амплитудно-фазового распределения поля в апертуре приемной антенны, создаваемого элементом Гюйгенса  $dS$  (см. рисунок 2) для двух моделей турбулентной атмосферы.

На основании результатов, опубликованных в монографиях [3, 4], можно воспользоваться данными, полученными при распространении сферической волны в реальной атмосфере, и получить решение для статистики распределения поля в апертуре приемной антенны с учетом эффектов дифракции на апертуре передающей антенны.

Учитывая, что приемная антенна является фильтром пространственных частот, а определяемым является статистика принимаемого сигнала, данное исследование позволит установить законы распределения сигнала на входе приемника.

С учетом вышеизложенного запишем формулу для поля излучения элемента Гюйгенса в плоскости  $Z=L$  в точке  $M$

$$E_M = A(R) \exp(j\varphi(R)), \quad (1)$$

где  $A(R)$  — случайная амплитуда поля в точке  $M$ ;  $\varphi(R)$  — случайная фаза поля в точке  $M$ .

В формуле (1) опущены все постоянные коэффициенты. Пусть амплитуда поля элемента Гюйгенса равна  $A_0$ . Тогда, воспользовавшись преобразованием

$$A(R) \frac{A_0}{A_0} = A_0 \exp\left(\ln \frac{A(R)}{A_0}\right),$$

и введя обозначение  $\chi(R) = \ln \frac{A(R)}{A_0}$ , формулу (1) можно записать в виде

$$E_M = A_0 \exp(j\varphi(R) + \chi(R)). \quad (2)$$

Предположим, что флуктуации  $\varphi(R)$  и  $\chi(R)$  подчинены нормальному закону распределения, тогда на основании (2) можно найти статистические характеристики поля  $E_M$ .

Так среднее значение  $E_M$  будет определяться характеристической функцией

$$\langle E_M \rangle = A_0 \langle \exp(j\varphi(R) + \chi(R)) \rangle,$$

которая зависит от статистических моментов  $\varphi(R)$  и  $\chi(R)$ .

При нормальном законе распределения  $\varphi(R)$  и  $\chi(R)$  получим:

$$\overline{\varphi(R)} = 0, \quad \overline{\chi(R)} = \chi_0(R);$$

$$\sigma_{\varphi}^2(R) = \overline{\varphi^2(R)}; \quad \sigma_{\chi}^2(R) = \overline{\chi^2(R)} - \chi_0^2(R).$$

Используя выражения для характеристической функции [5], запишем (3) в виде

$$\langle E_M \rangle = A_0 \exp(\chi_0(R)) \exp\left[\frac{1}{2}(-\sigma_{\varphi}^2 + \sigma_{\chi}^2)\right]. \quad (4)$$

Формула (4) записана в предположении некоррелированности амплитудных и фазовых флуктуаций. Наряду со средним значением поля  $\langle E_M \rangle$  необходимо рассмотреть пространственную когерентность поля в пределах апертуры приемной антенны. Для этого выделим два луча, которые согласно рис. 2 в точках 1 и 2 будут иметь случайные фазы  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ , а также  $\chi_1$  и  $\chi_2$ . Запишем для корреляционной функции

$$R_E(S) = (E_1 E_2^*) = A_0^2 \exp(2\chi_0) \langle \exp(j(\varphi_1 - \varphi_2) + (\chi_1 + \chi_2)) \rangle. \quad (5)$$

После преобразования (5) с учетом взаимной корреляции между  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ , а также  $\chi_1$  и  $\chi_2$  получим формулу для  $R_E$  в виде

$$R_E(S) = A_0^2 \exp(2\chi_0) \exp\left[\frac{1}{2}(-\sigma_{\varphi 1}^2 + \sigma_{\varphi 2}^2 - 2\sigma_{\varphi 1}\sigma_{\varphi 2}r_{\varphi}(S) - \sigma_{\chi 1}^2 - \sigma_{\chi 2}^2 - 2\sigma_{\chi 1}\sigma_{\chi 2}r_{\chi}(S))\right], \quad (6)$$

где  $r_{\varphi}(S)$ ,  $r_{\chi}(S)$  — пространственные коэффициенты корреляции, соответствующие флуктуациям фазы и амплитуды в апертуре приемной антенны.

Дальнейшее рассмотрение (4)—(6) проведем с учетом принятой модели турбулентной атмосферы.

В случае Гауссовой модели турбулентной атмосферы исследование фазовых и амплитудных флуктуаций поля электромагнитной волны в апертуре приемной антенны проведем с использованием гауссовой корреляционной функции для изотропной неоднородности показателя преломления атмосферы  $n(x, y, z)$ . При этом радиус корреляции как для  $n(x, y, z)$ , так и для  $\varphi(x, y, z)$  и  $\chi(x, y, z)$  будем определять размером турбулентности  $r_0$ .

Для  $r_{\varphi}(S)$  и  $r_{\chi}(S)$  можем записать

$$r_{\varphi}(S) = r_{\chi}(S) = \exp\left(-\frac{S^2}{r_0^2}\right). \quad (7)$$

Формула (7) применима для любых размеров апертуры приемной антенны  $2a$ , т. е. как для  $2a \ll r_0$ , так и для  $2a \gg r_0$ . Для  $\sigma_{\varphi}^2$  и  $\sigma_{\chi}^2$  можем воспользоваться формулами [3]:

$$\sigma_{\varphi}^2 = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \sigma_n^2 k^2 L r_0, \quad (8)$$

где  $\sigma_n^2$  — дисперсия флуктуаций показателя преломления атмосферы;  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ;  $L$  — длина трассы;

$$\sigma_{\chi}^2 = \sqrt{\pi} \sigma_n^2 k^2 L r_0. \quad (9)$$

Как следует из (8) и (9)  $\sigma_{\chi}^2$  возрастает с увеличением  $L$  так же, как и  $\sigma_{\varphi}^2$ . Поэтому пренебрежение амплитудными флуктуациями недопустимо.

В случае Колмогоровской модели турбулентной атмосферы для описания локально-изотропных турбулентностей применим метод стационарных процессов со стационарным приращением (СПСП). Для описания СПСП Колмогоров А.Н. ввел структурную функцию  $D(\tau)$ . Данная функция может использоваться наряду с корреляционной функцией только для стационарных случайных процессов, а для СПСП можно записать соотношение через  $R(\tau)$  в виде

$$D(\tau) = 2[R(0) - R(\tau)], \quad (10)$$

где  $R(0) = \sigma^2$ .

На основании [3] для определения  $\sigma_\chi^2$  можем воспользоваться соотношением

$$\sigma_\chi^2 = 0,077 C_\epsilon^2 k^{\frac{7}{6}} L^{\frac{11}{6}}, \quad (11)$$

где  $C_\epsilon^2 = 4C_n^2$  – структурная постоянная диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  и показателя преломления  $n$ .

Из формулы (11) следует, что качественная зависимость дисперсии от  $\lambda$  и  $L$  сохраняется той же, что и для гауссовой модели. Пользуясь соотношением (10), можно перейти в формуле (6) к структурным функциям  $D_\varphi(S)$  и  $D_\chi(S)$ , соответственно.

Рассмотрим два случая апертур приемной антенны:

- 1) малые апертуры с  $S \ll r_0$ ;
- 2) большие апертуры с  $S \gg r_0$ .

Для малых апертур структурные функции могут быть записаны в виде:

$$D_\varphi(S) = 0,41 C_\epsilon^2 k^2 L r_0^{-\frac{1}{3}} \left[ 1 + 0,87 \left( \frac{r_0^2}{\lambda L} \right)^{\frac{1}{6}} \right] S^2; \quad (12)$$

$$D_\chi(S) = 0,41 C_\epsilon^2 k^2 L r_0^{-\frac{1}{3}} \left[ 1 - 0,87 \left( \frac{r_0^2}{\lambda L} \right)^{\frac{1}{6}} \right] S^2. \quad (13)$$

Сравнение формул (12) и (13) показывает, что для малых апертур наблюдается квадратичная зависимость от  $S$ , которая имеет место и для гауссовой модели.

Для больших апертур структурные функции определяются по формулам:

$$D_\varphi(S) = 0,73 C_\epsilon^2 k^2 L S^{\frac{5}{3}}; \quad (14)$$

$$D_\chi(S) = A k^2 L S^{\frac{5}{3}}, \quad (15)$$

где 
$$A = \frac{1}{2} \frac{0,033 \pi^2 \frac{6}{5} \Gamma\left(\frac{1}{6}\right)}{\Gamma\left(\frac{11}{6}\right) 2^{\frac{5}{3}}}.$$

Анализ формул (14) и (15) показал, что для больших апертур приемных антенн сохраняется зависимость от  $S$  в виде закона «5/3». Учитывая то обстоятельство, что закон «5/3» близок к квадратичному, можно формулы (14) и (15) использовать и для малых апертур.

Таким образом, на основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

Для приемных антенн, которые применяются в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне волн, с диаметром апертуры  $2a$  много меньше масштаба турбулентности  $r_0$  можно применять гауссову модель турбулентности.

Для больших апертур, когда  $2a \gg r_0$ , необходимо применять только колмогоровскую модель турбулентности.

Учитывая характер корреляционной зависимости флуктуаций фазы и амплитуды от  $S$ , которая близка к закону «5/3», целесообразно применять единую методику с использованием колмогоровской модели турбулентности.

Дальнейшие исследования поля излучения в апертуре приемных антенн могут проводиться на основании колмогоровской модели турбулентной атмосферы.

#### **Бibliографический 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. Часть 1. Случайные процессы / С.М. Рытов. — М.: Наука, 1976. — 476 с.

3. Лобкова Л.М. Статистическая теория антенн сверхвысоких и оптических частот / Л.М. Лобкова. — М.: Связь, 1975. — 176 с.

4. Лобкова Л.М. Особенности формирования поля излучения апертурных антенн, обусловленные влиянием турбулентных неоднородностей / Л.М. Лобкова, В.В. Головин, А.В. Троицкий // Известия вузов. Радиоэлектроника, — К.: КПИ, 2009. — № 5. — Т. 52. — С. 73–76.

5. Лобкова Л.М. Пространственная когерентность поля излучения апертурной антенны в среде со случайными неоднородностями / Л.М. Лобкова, В.В. Головин, А.В. Троицкий / Вестник СевГТУ. Сер. Информатика, электроника, связь: сб. науч. тр. — Севастополь: СевНТУ, 2008. — Вып. 93. — С. 125–129.

*Поступила в редакцию 14.04.2010 г.*

**Лобкова Л.М., Головин В.В. Статистика поля в апертурі прийомної антени космічних систем радіозв'язку**

Проведено аналіз статистичних характеристик поля випромінювання в межах апертури прийомної антени з урахуванням впливу турбулентної атмосфери. Представлена статистична модель поля, як для випадку ненаправленого випромінювача у вигляді елемента Гюйгенса, так і для передавальної антени з заданою апертурою.

**Ключові слова:** Гаусова модель, Колмогоровська модель, статистична теорія антен.

**Lobkova L.M., Golovin V.V. The analysis of statistical models of turbulent atmosphere used to calculate a radiation field of receiving aperture antennas**

The analysis of statistical characteristics of the radiation field within the receiving antenna aperture taking into account influence of turbulent atmosphere is carried out. The field statistical model for the cases of omnidirectional radiator in the form of the Huygens element and for the transmitting antenna with the set aperture is presented.

**Keywords:** Gaussian model, Kolmogorov model, statistical theory of antennas.