

УДК 621.396.674.1

Л.М. Лобкова, профессор, д-р. техн. наук,

В.В. Головин, канд. техн. наук,

А.В. Троицкий, канд. техн. наук

Севастопольский национальный технический университет

ул. Университетская 33, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: v_golovin@mail.ru

ВЛИЯНИЕ АМПЛИТУДНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЯ В АПЕРТУРЕ АНТЕННЫ НА ЕЕ СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Проведено исследование средних диаграмм направленности по мощности для апертурных антенн, обусловленных влиянием атмосферной турбулентности, представленной в виде гауссовой модели.

Интенсивное освоение сантиметровых и миллиметровых диапазонов радиоволн привело к необходимости применения на линиях связи антенн с большими электрическими размерами, т.е. $\frac{2a}{\lambda} \gg 1$,

где a — радиус круглой апертуры; λ — длина волны. Для наземных систем радиосвязи пространство между апертурами передающей и приемной антенн заполнено локально-неоднородной турбулентной атмосферой, которая приводит к флуктуациям амплитуды и фазы электромагнитной волны, распространяющейся в этой среде.

Следовательно, трудно ожидать реализацию потенциальных характеристик излучения антенны, таких как диаграмма направленности (ДН), коэффициент направленного действия (КНД) антенны. Исследованию этой проблемы посвящено огромное количество публикаций и монографий [1 — 3], однако они посвящены анализу характеристик плоских волн, а направленные свойства антенны рассматриваются лишь для частных случаев малых апертур и равномерного распределения поля. В этом случае справедливо в первом приближении применение метода «Фазового экрана», однако, для больших апертур необходимо рассматривать «объемную модель», так как флуктуации амплитуды и фазы волн происходят с накоплением их значения по мере увеличения расстояния между антеннами, а также учитывать их зависимость от пространственного масштаба турбулентности атмосферы.

Целью данной статьи является провести исследование влияния амплитудного распределения поля в апертуре антенны с использованием метода «Фазового экрана».

Пусть в декартовой системе координат XYZ в плоскости $z = 0$ расположена апертура передающей антенны (см. рисунок 1) с амплитудным распределением поля в виде:

$$E(x) = E_0 \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{a_0^2}\right), \quad (1)$$

где E_0 — амплитуда поля в центре апертуры; a_0 — масштаб распределения (при $a_0 \rightarrow \infty$ амплитудное распределение переходит в равномерное); фазовое распределение постоянно.

Будем считать, что локально-неоднородная турбулентная среда заполняет все правое пространство при $z \geq 0$. Тогда для случая гауссовой модели турбулентной атмосферы [3] можем записать соотношения для средней диаграммы направленности по мощности в виде:

$$F(\theta, \varphi) = \iiint \exp\{u_1(x - x_1) + u_2(y - y_1)\} \exp\left\{-\frac{x^2 + y^2 + x_1^2 + y_1^2}{a_0^2}\right\} \times \\ \times \exp\left\{-\sigma_\varphi^2 [1 - R_\varphi(x - x_1, y - y_1)]\right\} dx dy dx_1 dy_1. \quad (2)$$

Здесь $u_1 = k \sin \theta \sin \varphi$, $u_2 = k \sin \theta \cos \varphi$, σ_φ^2 — дисперсия фазовых флуктуаций, которая определяется формулой

$$\sigma_\varphi^2 = \sqrt{\pi} k^2 R r_0 \sigma_n^2,$$

где $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, R — расстояние до приемной антенны, отсчитываемое вдоль оси Z ; r_0 — масштаб

пространственной корреляции фазовых флуктуаций неоднородности тропосферы; σ_n^2 — дисперсия флуктуации показателя преломления атмосферы; R_φ — коэффициент пространственной корреляции флуктуации фазы.

Далее из рисунка 1 видим, что $\overline{r} = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2}$, следовательно, удобно воспользоваться полярной системой координат, полагая

$$x - x_1 = r \cos \varphi_s, \quad y - y_1 = r \sin \varphi_s,$$

где φ_s — полярный угол в плоскости апертуры и меняется в пределах $0 \dots 2\pi$, при этом r изменяется от 0 до $2a$, a — радиус апертуры.

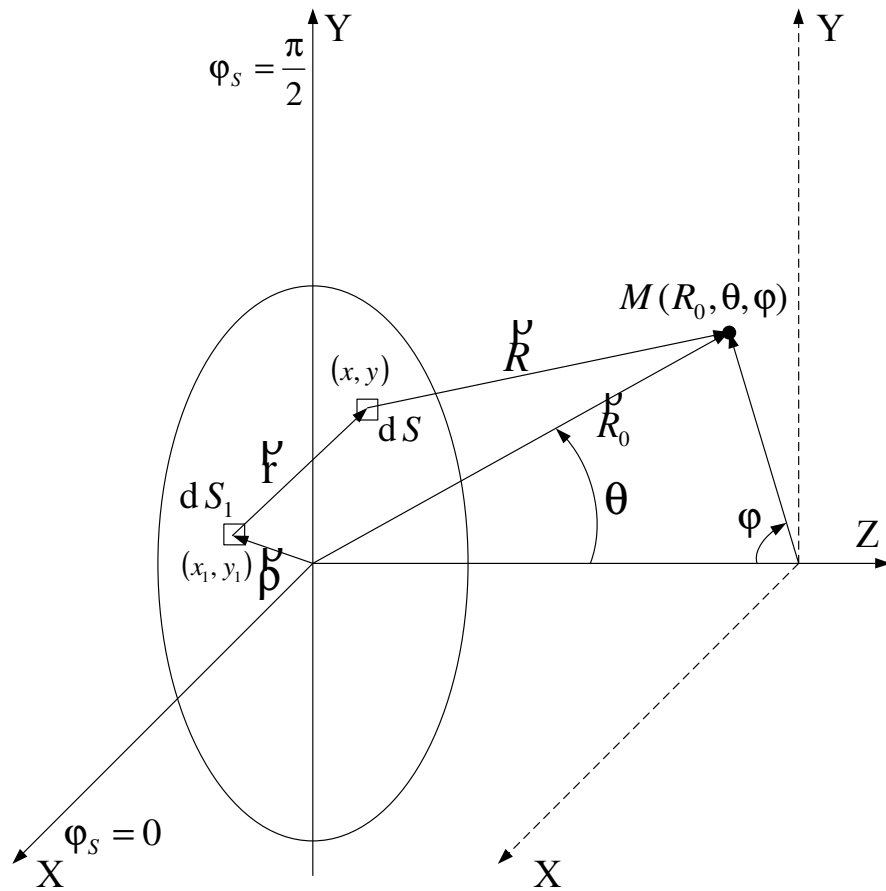


Рисунок 1 — К определению поля излучения в точке $M(R_0, \theta, \varphi)$

Таким образом от переменных x и y перейдем к переменным r и φ_s , а $dS = dx dy = r dr d\varphi_s$. Учитывая, что

$$x^2 = x_1^2 + 2x_1 r \cos \varphi_s + r^2 \cos^2 \varphi_s,$$

$$y^2 = y_1^2 + 2y_1 r \sin \varphi_s + r^2 \sin^2 \varphi_s,$$

можем записать $\exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{a_0^2}\right)$ в виде

$$\exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{a_0^2}\right) = \exp\left(-\frac{x_1^2 + y_1^2}{a_0^2}\right) \exp\left(-\frac{2x_1 r \cos \varphi_s + 2y_1 r \sin \varphi_s}{a_0^2}\right) \exp\left(-\frac{r^2}{a_0^2}\right). \quad (3)$$

Удобно от координат x_1 и y_1 перейти также к полярным координатам:

$$x_1 = \rho \cos \alpha, \quad y_1 = \rho \sin \alpha,$$

тогда

$$dS = dx_1 dy_1 = \rho d\rho d\alpha,$$

при этом ρ меняется в пределах $0 \dots a$, а α — $0 \dots 2\pi$.

На основании перехода к новым переменным $r, \rho, \varphi_s, \alpha$ можем соотношение (2) представить в виде:

$$F(\theta, \varphi) = \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{2a} \int_0^{2a} \exp\{-j[u_1 r \cos \varphi_s + u_2 r \sin \varphi_s]\} \exp\left\{-\frac{r^2}{a_0^2}\right\} \times \\ \times \exp\left[-\frac{2\rho r}{a_0^2}(\cos \alpha \cos \varphi_s + \sin \alpha \sin \varphi_s)\right] \times$$

$$\times \exp\left\{-\sigma_{\Phi}^2[1-R_{\Phi}(r)]\right\} \exp\left(-\frac{2\rho^2}{a_0^2}\right) r \rho \, dr \, d\rho \, d\phi_S \, d\alpha. \quad (4)$$

Выражение (4) можно преобразовать после интегрирования его по $d\alpha$ и $d\phi_S$ в следующем порядке. Так интегрирование (4) по $d\alpha$ позволяет получить

$$\int_0^{2\pi} \exp\left[-\frac{2\rho r}{a_0^2}(\cos\alpha \cos\phi_S + \sin\alpha \sin\phi_S)\right] d\alpha \, d\phi_S = 4\pi^2 J_0\left(j\left(\frac{2r\rho}{a_0^2}\right)\right), \quad (5)$$

где $J_0(jx)$ — функция Бесселя от мнимого аргумента.

Интегрируя по $d\phi_S$, получаем:

$$\int_0^{2\pi} \exp\{-j[u_1 r \cos\phi_S + u_2 r \sin\phi_S]\} d\phi = 4\pi^2 J_0(ur), \quad (6)$$

где $u = k \sin\theta$; $J_0(x)$ — функция Бесселя вещественного аргумента.

После подстановки (5) и (6) в соотношение (4) и преобразования можем записать:

$$F(\theta, \varphi) = \int_0^a \int_0^{2a} \exp\left[-\left(\frac{r^2}{a_0^2} + \frac{2\rho^2}{a_0^2}\right)\right] J_0\left(\frac{2r\rho}{a_0^2}\right) J_0(ur) \times \\ \times \exp\left\{-\sigma_{\Phi}^2[1-R_{\Phi}(r)]\right\} r \rho \, dr \, d\rho. \quad (7)$$

Интегрирование (7) удобно провести с введением нормированных переменных ρ и r :

$$r' = \frac{r}{2a}, \quad \rho' = \frac{\rho}{a},$$

тогда

$$\frac{r^2}{a_0^2} = \frac{r'^2}{\left(\frac{a_0}{2a}\right)^2}; \quad \frac{2\rho^2}{a_0^2} = \frac{2\rho'^2}{\left(\frac{a_0}{a}\right)^2} = \frac{1}{2} \frac{\rho'^2}{\left(\frac{a_0}{2a}\right)^2}.$$

Вводя обозначение обобщенного угла $\psi = 2ka \sin\theta$, опуская константы и штрихи для r' и ρ' запишем соотношение для $F(\psi)$ в виде:

$$F(\psi) = \int_0^1 \int_0^1 \exp\left[-\frac{r^2}{b^2}\right] \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{\rho^2}{b^2}\right] J_0\left(j\left(\frac{r\rho}{b^2}\right)\right) J_0(\psi r) \times \\ \times \exp\left\{-\sigma_{\Phi}^2[1-R_{\Phi}(r)]\right\} r \rho \, dr \, d\rho, \quad (8)$$

где

$$b^2 = \left(\frac{a_0}{2a}\right)^2; \quad R_{\Phi} = \exp\left(-\frac{r^2}{(r_0/2a)^2}\right).$$

Анализ формулы (8) показал, что можно выполнить еще интегрирование по $d\rho$, представляя в виде ряда:

$$J_0\left(\frac{r\rho}{b^2}\right) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n! \Gamma(n+1)} \left(\frac{r}{2b^2}\right)^{2n} \rho^{2n}.$$

Тогда после интегрирования (8) по $d\rho$ получим:

$$F(\psi) = \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \frac{1}{n! \Gamma(n+1)} \left[\frac{n!}{(1/2b^2)^{n+1}} - \exp\left(-\frac{1}{b^2}\right) \sum_{k=0}^n \frac{n!}{k!} \frac{1}{(1/2b^2)^{n-k+1}} \right] \times \right. \\ \left. \times \int_0^1 \exp\left[-\frac{r^2}{b^2}\right] J_0(\psi r) \left(\frac{r}{2b^2}\right)^{2n} \exp\left\{-\sigma_{\Phi}^2[1-R_{\Phi}(r)]\right\} r \, dr \right\}. \quad (9)$$

На основании формулы (9) были проведены численные расчеты. Был проведен анализ средней ДН по мощности в зависимости от соотношения масштаба неоднородности r_0 и диаметра апертуры a для различных амплитудных распределений в апертуре антенны. Особый интерес представляет зависимость ДН по мощности от расстояния R до приемной антенны и, соответственно, от величины σ_ϕ^2 . Численные расчеты были проведены в следующем порядке.

Исследовались ДН апертурной антенны с диаметром зеркала $D = 1$ м при амплитудных распределениях поля в апертуре, представленных на рисунке 2, а. Расчеты проводились на частоте $f = 3$ ГГц. Для случая однородной атмосферы ДН антенны показаны на рисунке 2, б. Результаты расчетов подтверждают, что полученные выражения для расчета ДН апертурных антенн в присутствии неоднородностей в атмосфере не противоречат теории: спадающее распределение поля формирует в дальней зоне антенны ДН с большей шириной главного лепестка и меньшим уровнем бокового излучения.

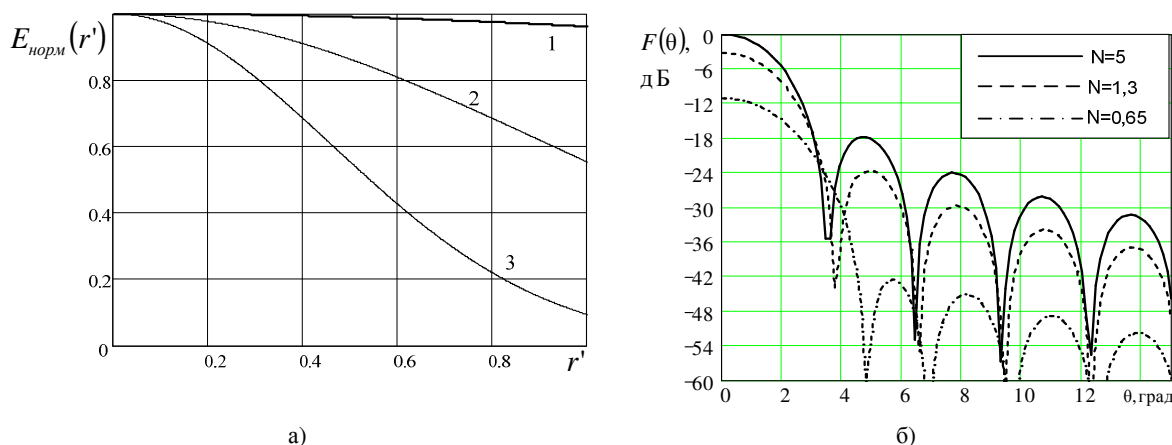


Рисунок 2 — Характеристики зеркальной антенны без учета статистических параметров турбулентной атмосферы:

- а) распределение поля в апертуре 1 — $N = 5$; 2 — $N = 1,3$; 3 — $N = 0,65$;
 б) диаграммы направленности антенны при различных амплитудных распределениях поля в апертуре

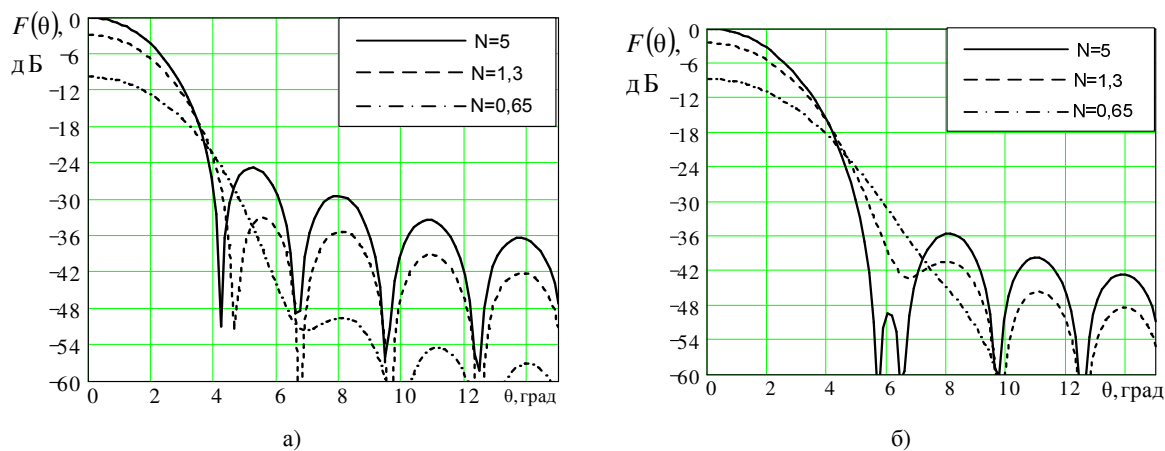


Рисунок 3 — Диаграммы направленности зеркальной антенны:

- а) дисперсия фазовых флуктуаций $\sigma^2 = 5$, $\frac{r_0}{2a} = 2$; б) $\sigma^2 = 10$, $\frac{r_0}{2a} = 2$

Представляет большой практический интерес оценить, каким образом изменятся характеристики антенн с учетом турбулентной атмосферы, если в апертуре антенны формируются различные амплитудные распределения.

На рисунке 3 представлены ДН для случая малых размеров неоднородностей при больших (рисунок 3, б) и малых (рисунок 3, а) значениях дисперсии фазовых флуктуаций. Установлено, что уменьшение размеров неоднородностей приводит к расширению главного лепестка и изменениям в области бокового излучения. Увеличение σ_ϕ^2 влияет на характеристики антенны тем больше, чем меньше размеры неоднородностей в атмосфере. Проведенные расчеты показали, что при спадающих к краям распределениях поля деформация формы ДН антенны с уменьшением размеров неоднородностей $r_0/2a$ и ростом σ_ϕ^2 происходит интенсивнее, чем при более равномерных распределениях поля в апертуре.

Обобщение изменений в свойствах направленности антенн проведено по результатам расчетов коэффициента направленного действия, показанных на рисунках 4 и 5. Анализ кривых 1 и 2 на рисунке 4 для

случая больших размеров неоднородностей $r_0/2a = 5$ показал, что влияние дисперсии фазовых флуктуаций, а значит и расстояния между приемной и передающей антеннами, сказывается незначительно и главным образом в случаях, когда $\frac{a_0}{2a} \leq 0,75$, что соответствует пьедесталу нормированного распределения поля в апертуре $\Delta = 0,17$. Согласно рисунку 5 в данном случае потери на усиление составляют около 1 дБ.

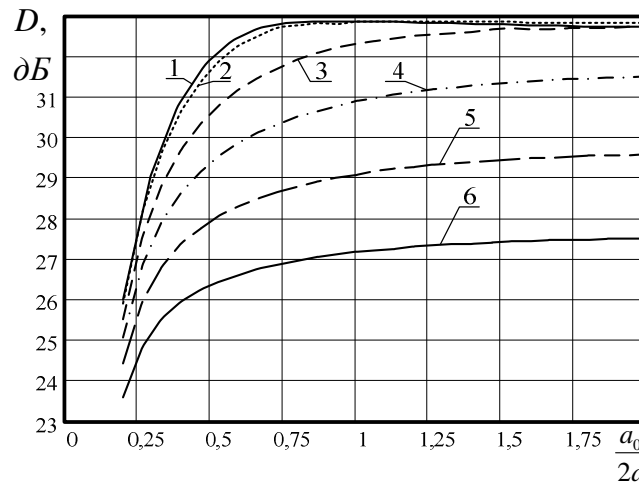


Рисунок 4 — КНД для зеркала $a = 0,5$ м:

- 1 — $r_0/2a = 5$, $\sigma_\varphi^2 = 2$; 2 — $r_0/2a = 5$, $\sigma_\varphi^2 = 10$; 3 — $r_0/2a = 2,5$, $\sigma_\varphi^2 = 10$;
4 — $r_0/2a = 1,75$, $\sigma_\varphi^2 = 10$; 5 — $r_0/2a = 1,3$, $\sigma_\varphi^2 = 10$; 6 — $r_0/2a = 1$, $\sigma_\varphi^2 = 10$

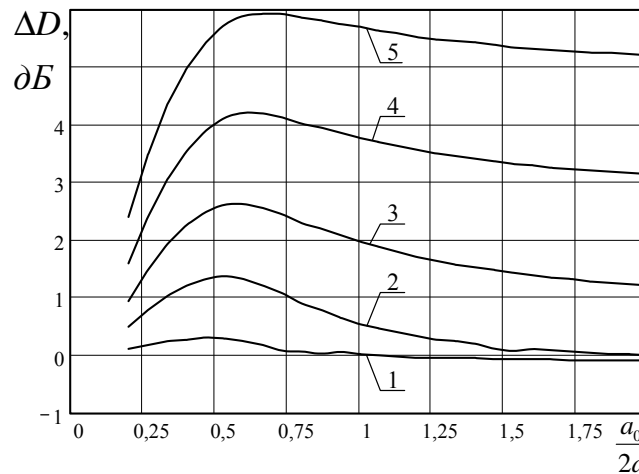


Рисунок 5 — Потери КНД для зеркала $a = 0,5$ м:

- 1 — $r_0/2a = 5$, $\sigma_\varphi^2 = 10$; 2 — $r_0/2a = 2,5$, $\sigma_\varphi^2 = 10$; 3 — $r_0/2a = 1,75$, $\sigma_\varphi^2 = 10$;
4 — $r_0/2a = 1,3$, $\sigma_\varphi^2 = 10$; 5 — $r_0/2a = 1$, $\sigma_\varphi^2 = 10$

Более сложная ситуация складывается, когда масштабы неоднородностей в атмосфере уменьшаются. На рисунках 4, 5 рассмотрен наиболее неблагоприятный случай, когда $\sigma_\varphi^2 = 10$. Из рисунка 4 видно, что по мере уменьшения $r_0/2a = 5 \dots 0,2$ вследствие искажения формы ДН значения КНД при различных апертурных распределениях поля отличаются друг от друга в меньшей степени. Общий характер изменения КНД при различных Δ нелинеен. Нелинейно также возрастают потери усиления при уменьшении $r_0/2a$. Следует отметить, что потери усиления при $\Delta > 0,4$ ($\frac{a_0}{2a} > 1$) и $\Delta < 0,02$ ($\frac{a_0}{2a} < 0,5$) одинаковы и максимальны в случае $0,02 < \Delta < 0,17$ ($0,5 < \frac{a_0}{2a} < 0,75$).

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

Выводы

С использованием метода «Фазового экрана» разработана математическая модель поля излучения зеркальной антенны, в которой учитывается влияние статистических характеристик турбулентной атмосферы.

Расчеты диаграмм направленности антенны с различными апертурными распределениями поля при изменении характеристик атмосферы показали, что дисперсия фазовых флуктуаций σ_φ^2 влияет на характеристики антенны тем больше, чем меньше размеры неоднородностей в атмосфере.

Установлено, что наименьшие потери усиления, обусловленные уменьшением $r_0/2a$ и увеличением σ_φ^2 наблюдаются при $\Delta > 0,4 \left(\frac{a_0}{2a} > 1 \right)$ и $\Delta < 0,02 \left(\frac{a_0}{2a} < 0,5 \right)$, а также одинаковы и максимальны в случае $0,02 < \Delta < 0,17 \left(0,5 < \frac{a_0}{2a} < 0,75 \right)$.

Полученные результаты позволяют в дальнейшем осуществить поиск амплитудных распределений поля в апертуре антенны, при которых влияние турбулентной атмосферы будет минимально влиять на характеристики зеркальной антенны. Это в свою очередь позволит перейти к разработке соответствующей облучающей системы.

Библиографический список

1. Кравцов Ю.А. Прохождение радиоволн через атмосферу Земли / Ю.А. Кравцов, З.И. Фейзулин, А.Г. Виноградов. — М.: Радио и связь, 1983. — 224 с.
2. Шифрин Я. С. Вопросы статистической теории антенн / Я.С. Шифрин. — М.: Сов. радио, 1970. — 582 с.
3. Лобкова Л.М. Статистическая теория антенн сверхвысоких и оптических частот / Л.М. Лобкова. — М.: Радио и связь. 1975 — 176 с.

Поступила в редакцию 20.02.2008 г.