

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ МИКРОВОЛНОВЫМ ЛУЧОМ ПРИ ПАРАБОЛИЧЕСКОМ АМПЛИТУДНОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ ВОЗБУЖДАЮЩЕГО ПОЛЯ

В настоящее время продолжают теоретические и экспериментальные исследования систем передачи энергии микроволновым лучом [1 – 6]. Такие системы предполагается использовать для дистанционного энергообеспечения космических аппаратов, передачи произведенной в космосе электроэнергии на Землю и ряда других приложений [1, 2]. Сегодня усилия направляются как на совершенствование конструкций приемной и передающей подсистем, так и на освоение более коротких длин волн [3, 4]. Использование миллиметрового диапазона позволит сократить размеры антенн и производить передачу энергии на более значительные расстояния. Предметом отдельных исследований является тракт распространения электромагнитных волн. Известно [6], что коэффициент полезного действия (КПД) передачи энергии зависит от амплитудно-фазового распределения (АФР) поля на апертуре передающей антенны и может быть близок к единице при расположении антенн в зоне Френеля. К числу первых работ, посвященных передаче энергии в зоне Френеля, можно отнести [7, 8]. В [9] для различных параметров системы были установлены оптимальные АФР на апертуре передающей антенны, обеспечивающие максимальный КПД передачи энергии. Оптимальным фазовым распределением (ОФР) является квадратичное, реализующее сферический фазовый фронт с центром кривизны в плоскости приемной апертуры. При сближении антенн, первоначально находящихся в дальней зоне, оптимальное амплитудное распределение (ОАР) изменяется от равномерного к все более спадающему к краям, приобретая гауссову форму.

Однако при гауссовом амплитудном распределении (АР) неэффективно используются площади передающей и приемной апертур [1]. Поэтому целесообразным представляется поиск более равномерных амплитудных распределений, способных реализовать КПД передачи энергии, близкий к максимальному. В данной работе исследована возможность использования для этой цели АР параболического типа.

Рассмотрим систему передачи энергии микроволновым лучом, состоящую (рис. 1) из круглых передающей и приемной антенн, расположенных соосно. Поляризация поля – линейная.

В [10] показано, что для зоны Френеля при осесимметричном возбуждении передающей антенны напряженность электрического поля в области расположения приемной антенны описывается выражением:

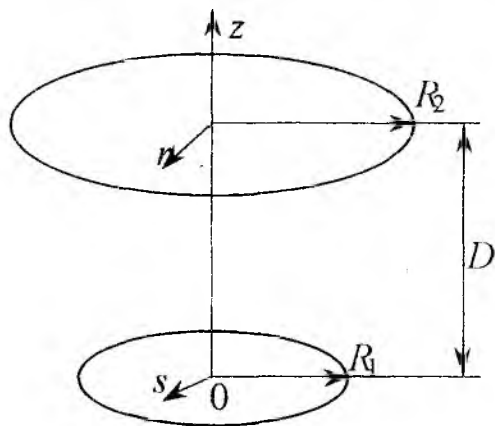


Рис. 1

$$E(r, D) = \frac{jke^{-jkD}}{D} e^{-\frac{jk}{2D}r^2} \int_0^{R_1} E(s) e^{-\frac{jks^2}{2D}} J_0\left(\frac{krs}{D}\right) s ds, \quad (1)$$

где r – радиальная координата; D – расстояние между апертурами; j – мнимая единица; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число; λ – длина волны; R_1 – радиус передающей апертуры; $E(s)$ – распределение напряженности электрического поля на апертуре передающей антенны; J_0 – функция Бесселя первого рода нулевого порядка.

На основании выражения (1) можно получить соотношение для КПД перехвата энергии, под которым понимают отношение мощности, падающей на приемную апертуру, к мощности, излучаемой передающей антенной:

$$\eta = \frac{P_{np}}{P_{uz}} = \frac{k^2}{D^2} \frac{\int_0^{R_2} \left| \int_0^{R_1} E(s) e^{-j \frac{ks^2}{2D}} J_0\left(\frac{krs}{D}\right) s ds \right|^2 r dr}{\int_0^{R_1} |E(s)|^2 s ds},$$

где R_2 – радиус приемной апертуры.

После приведения интегралов к единому интервалу интегрирования получим:

$$\eta = \frac{\int_0^a \left| \int_0^a E(u) e^{-jtu^2} J_0(u\rho) u du \right|^2 \rho d\rho}{\int_0^a |E(u)|^2 u du}, \quad (2)$$

где $a = \sqrt{\frac{kR_1 R_2}{D}}$; $t = \frac{R_1}{2R_2}$; $u = s \sqrt{\frac{kR_2}{DR_1}}$; $\rho = r \sqrt{\frac{kR_1}{DR_2}}$.

Выражение (2) показывает, что КПД перехвата энергии является функционалом амплитудно-фазового распределения $E(u)$ и зависит от параметров a и t . АФР поля возбуждения запишем в виде:

$$E(u) = F(u) \cdot e^{j\varphi(u)},$$

где $F(u)$ – амплитудное распределение; $\varphi(u)$ – фазовое распределение.

Известно [9], что оптимальным фазовым распределением с точки зрения максимизации функционала (2) является распределение

$$\varphi(u) = tu^2. \quad (3)$$

При реализации ОФР (3) выражение для КПД перехвата энергии примет вид:

$$\eta = \frac{\int_0^a \left[\int_0^a F(u) J_0(u\rho) u du \right]^2 \rho d\rho}{\int_0^a F^2(u) u du} \quad (4)$$

Оптимальное амплитудное распределение $F(u)$ должно удовлетворять уравнению [9]:

$$\rho F(u) = \int_0^a F(v) J_0(uv) v dv \quad (0 \leq u \leq a),$$

где ρ – коэффициент, равный квадратному корню из максимального значения КПД перехвата энергии.

Из этого уравнения следует, что при разложении функции Бесселя в степенной ряд ОАР оказывается четной функцией и может быть аппроксимировано полиномом степени $2M$:

$$F(u) = \sum_{i=0}^M c_i u^{2i}. \quad (5)$$

Используя также разложение функции Бесселя в виде конечной суммы и производя интегрирование в (4), приходим к следующему выражению:

$$\eta = \frac{\sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^M \sum_{k=0}^N \sum_{p=0}^N \frac{(-1)^{k+p} c_i c_j a^{2[i+j+2(k+p)+2]}}{(k!)^2 (p!)^2 2^{2(k+p+1)} (i+k+1)(j+p+1)(k+p+1)}}{\sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^M c_i c_j \frac{a^{2(i+j)}}{i+j+1}}, \quad (6)$$

где N – номер последнего члена в разложении функции Бесселя.

Формула (6) позволяет производить расчет КПД перехвата энергии по известным коэффициентам c_i полинома (5) и параметру a . Объем вычислений при этом зависит от величин M и N .

Выражение (6) представляет собой отношение двух квадратичных форм:

$$\eta = \frac{(GC, C)}{(HC, C)},$$

где G , H – квадратные положительно определенные симметричные матрицы порядка $M+1$; C – вектор размера $M+1$, состоящий из коэффициентов c_i разложения (5).

Элементами матриц G и H являются следующие величины:

$$g_{i,j} = \sum_{k=0}^N \sum_{p=0}^N \frac{(-1)^{k+p} a^{2[i+j+2(k+p)+2]}}{(k!)^2 (p!)^2 2^{2(k+p+1)} (i+k+1)(j+p+1)(k+p+1)};$$

$$h_{i,j} = \frac{a^{2(i+j)}}{i+j+1} \quad (i, j = \overline{0, M}).$$

В [10] показано, что максимально возможное (при заданном M) значение величины η равно наибольшему собственному значению матрицы $L = H^{-1}G$, а компоненты собственного вектора, соответствующего этому собственному значению, являются коэффициентами разложения амплитудного распределения, необходимого для достижения данного максимума. Чем больше M , тем большего значения КПД перехвата энергии можно достичь, но при $M > 3$ это увеличение становится незначительным. Кроме того, получаемые при $M = 3$ амплитудные распределения хорошо согласуются с приводимыми в литературе [6] оптимальными АР, найденными другим методом.

Если в изложенном выше способе положить $M = 1$, то можно определить оптимальный вид АР параболического типа. Найденные таким образом для разных значений параметра a оптимальные параболические амплитудные распределения (ОПАР) представлены на рис. 2, a получаемые при ОПАР значения КПД перехвата – на рис. 3.

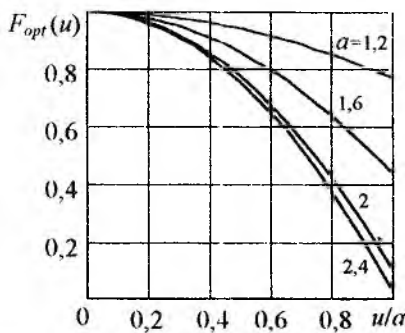


Рис. 2

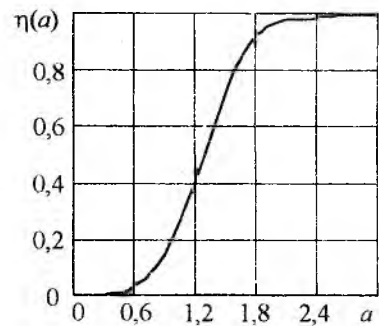


Рис. 3

Вычисления показали, что при переходе от ОАР к ОПАР КПД перехвата энергии падает не более, чем на 2%. В таблице приведены значения отношения мощности, излучаемой передающей ан-

тенной с ОПАР, к мощности, излучаемой передающей антенной с ОАР, при равенстве остальных параметров, а также напряженностей поля в центре апертуры.

Таблица

a	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4
$P_{ОПАР}/P_{ОАР}$	1,05	1,12	1,22	1,4	1,74

Из таблицы видно, что при больших значениях параметра a значительно увеличивается эффективность использования площади антенн, поскольку ОПАР является более равномерным, чем ОАР.

В общем случае соотношение, описывающее семейство оптимальных параболических амплитудных распределений, можно записать в виде:

$$F_{opt}(u, a) = 1 + c_{opt}(a) \cdot u^2$$

На рис. 4 изображена рассчитанная зависимость оптимального коэффициента c_{opt} от параметра a . На этом же рисунке пунктиром показан график аппроксимирующего эту зависимость полинома:

$$c_{opt}(a) = -0,1406a^2 + 0,01985a^4 + 1,15 \cdot 10^{-3}a^6 - 0,216 \cdot 10^{-3}a^8$$

Таким образом, в работе получены аналитические выражения, позволяющие производить анализ и оптимизацию системы передачи энергии микроволновым лучом при представлении АР в виде полинома четных степеней. Показана возможность замены оптимального АР оптимальным параболическим при незначительном уменьшении КПД перехвата энергии и заметном выигрыше в величине излучаемой мощности.

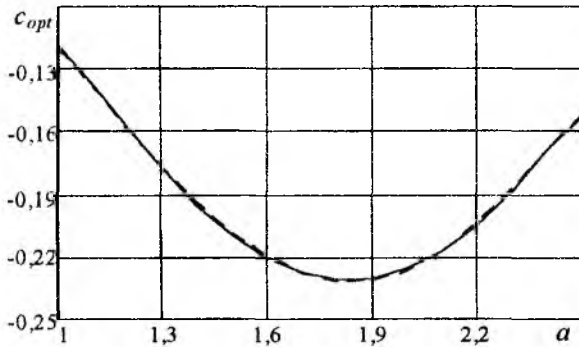


Рис. 4

Список литературы: 1. Katsenelenbaum B.Z., S. S. Shaposhnikov, "Energy transportation by a beam of electromagnetic waves". Proc. of the XXVIII Moscow International Conference on Antenna Theory and Technology, Moscow, Russia, 1998, P. 578-579. 2. Thumm M, "Gyrotrons - Moderne Quellen fuer Millimeterwellen hoec-hster Leistung." Vortrag N 425, Nordrhein-West-faelische Akademie der Wissenschaften, 1996. 3. P. Koert and J. T. Cha, "Millimeter Wave Technology for Space Power Beaming," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 40, N. 6. P. 1251 - 1258, June 1992. 4. Yoo T. and Chang K., "Theoretical and Experimental Development of 10 and 35 GHz Rectennas," IEEE Trans.

Microwave Theory Tech., Vol. 40, N. 6, P. 1259 - 1266, June 1992. 5. Glaser P. E., "An Overview of Solar Power Satellite Option," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 40, N. 6. P. 1230 - 1238, June 1992. 6. Brown W. C., Eves E. E., "Beamed Microwave Power Transmission and its Application to Space," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 40, N. 6. P. 1239 - 1250, June 1992. 7. Hu M. K., "Near-zone power transmission formula," IRE Nat'l Conv. Rec., pt. 8. P. 128 - 135, 1958. 8. Kay A. F., "Near-Field Gain of Aperture Antennas," IRE Trans. Antennas Propag., Vol. 8. P. 586 - 593, November 1960. 9. Goubau G. and Schwering F., "On the guided propagation of electromagnetic wave beams," IRE Trans. Antennas Propag., Vol. AP-9. P. 248 - 256, May 1961. 10. Shifrin J.S., Shokalo V.M., Rybalko A.M. Efficiency of Energy Transmission Systems with Microwave Beam // Proc. 5th International Symposium on Recent Advances in Microwave Technology, Kiev, Ukraine, 1995. V.1. P. 242-249.

Харьковский государственный технический университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 20.05.99