

ВЛИЯНИЕ ФЛУКТУАЦИЙ АФР НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЕРЕДАЧИ СВЧ-ЭНЕРГИИ МЕЖДУ КРУГЛЫМИ АПЕРТУРНЫМИ АНТЕННАМИ В ЗОНЕ ФРЕНЕЛЯ

Проблема создания систем передачи энергии (СПЭ) СВЧ-лучом весьма актуальна в связи с интенсивным развитием космических технологий. При разработке таких систем возникает целый ряд проблем, обусловленных фокусировкой СВЧ-луча в заданную точку, получением больших плотностей энергии и т.д. Решение последних зачастую ведет к увеличению размеров используемых антенн, которое неминуемо сопровождается снижением точности их изготовления, усилением влияния различных случайных факторов на их параметры. Для передачи энергии с большим КПД приемная антенна СПЭ (ректенна) должна находиться в зоне Френеля передающей антенны. Эффективность передачи энергии в зоне Френеля определяется КПД передачи, зависящим от вида амплитудно-фазового распределения (АФР) передающей и приемной антенн. В настоящее время хорошо развиты детерминированные методы анализа СПЭ [1]. С их помощью показано, что АФР по приемной и передающей апертурам СПЭ в общем случае могут быть разнотипными, т.е. скорость спада амплитудного распределения (АР) по приемной апертуре может изменяться как естественным образом при изменении дальности [2], так и преднамеренно [3] для повышения общего КПД системы. В реальных условиях АФР поля возбуждения передающей антенны всегда реализуется со случайными ошибками амплитуды и фазы, которые приводят к ухудшению качественных показателей СПЭ. Данный эффект в литературе рассмотрен недостаточно, особенно для случая разнотипных АФР.

При наличии флуктуаций АФР эффективность передачи энергии можно оценить в рамках статистической теории антенн [4] с помощью среднего КПД. Нами получены выражения для среднего КПД и проведена оценка эффективности передачи электромагнитной энергии между двумя круглыми апертурными антеннами в зоне Френеля с возбуждающим полем на передающей, которое имеет флуктуации амплитуды и фазы. Исследовано влияние параметров флуктуаций АФР передающей антенны на средний КПД передачи при различных сочетаниях амплитудного распределения в плоскостях расположения апертур приемной и передающей антенн. На

основании полученных результатов определены комбинации АР, наименее подверженные влиянию флуктуаций.

Основные соотношения. Рассмотрим СПЭ из двух антенн, имеющих круглые апертуры A_r и A_t , для каждой из которых введена своя система координат XYZ (r, t) с разными, вообще говоря, радиусами R_r, R_t (рис. 1). Для фокусировки антенны в зону Френеля необходимо реализовать АФР с квадратичным фазовым набегом. Одним из возможных способов такой реализации являются антенны со сферической поверхностью, имеющие радиусы кривизны b_r, b_t . Расстояние между антеннами относительно их центров равно L . Линия, соединяющая центры антенн, взаимно перпендикулярна к плоскостям апертур A_r и A_t .

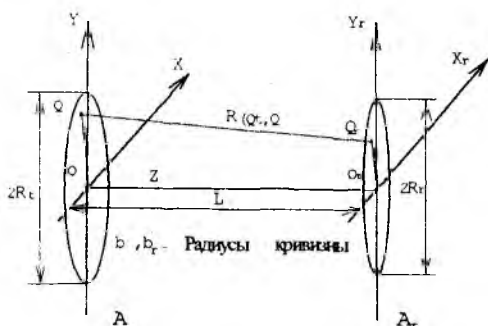


Рис. 1

Потери в антеннах отсутствуют, и антенны согласованы со своими питающими линиями.

Пусть антенна A_r приемная и принимает мощность P_r , а A_t передающая и излучает в пространство мощность P_t . Тогда КПД передачи энергии

$$\eta = P_R/P_t \quad (1)$$

В [5] показано, что КПД в отсутствие ошибок можно представить в виде

$$\eta = \frac{\left| \int_{A_r} f_r(Q_r) dQ_r \int_{A_t} f_t(Q_t) e^{jkR(Q_t, Q_r)} dQ_t \right|^2}{(\lambda L)^2 \int_{A_r} |f_r(Q_r)|^2 dQ_r \int_{A_t} |f_t(Q_t)|^2 dQ_t} \quad (2)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число; λ — длина волны в свободном пространстве; $f_t(Q_t)$, $f_r(Q_r)$ — амплитудно-фазовые распределения (АФР) поля передающей и приемной апертур.

Используя для зоны Френеля аппроксимацию Френеля для малых углов, экспоненциальный множитель в (2) можно записать в цилиндрической системе координат $(r, \theta, z)_{r, t}$ как

$$R(r'_r, r'_t, \theta_r, \theta_t) = L + \frac{(r'_r R_r)^2}{2L} \left(1 - \frac{L}{b_r}\right) + \frac{(r'_t R_t)^2}{2L} \left(1 - \frac{L}{b_t}\right) - \frac{R_r R_t r'_r r'_t}{L} \cos(\theta_r - \theta_t), \quad (3)$$

где $r'_r = r_r / R_r$, θ_r — безразмерные радиальные координаты и углы в цилиндрической системе координат для A_r ; $r'_t = r_t / R_t$, θ_t — то же для A_t .

Предположим, что распределение поля на передающей апертуре реализовано с некоторыми ошибками и $f_t(r'_t, \theta_t)$ является случайной величиной:

$$f_t(r'_t, \theta_t) = f_{t0}(r'_t, \theta_t) e^{B(r'_t, \theta_t) + j\Psi(r'_t, \theta_t)} = f_{t0}(r'_t, \theta_t) \chi(r'_t, \theta_t), \quad (4)$$

где $f_{t0}(r'_t, \theta_t)$ — АФР в отсутствие ошибок; $B(r'_t, \theta_t)$, $\Psi(r'_t, \theta_t)$ — случайные функции, описывающие флуктуации амплитуды и фазы.

Далее используем следующие общепринятые допущения в определении флуктуаций амплитуды и фазы [4]: $B(Q_t)$, $\Psi(Q_t)$ распределены по нормальному закону, однородны и взаимонезависимы, средние их значения $B(r'_t, \theta_t) = B_0$, $\Psi(r'_t, \theta_t) = 0$, а дисперсии — $\sigma_B^2(r'_t, \theta_t) = \sigma_{B0}^2$; $\sigma_\Psi^2(r'_t, \theta_t) = \sigma_{\Psi0}^2$.

С учетом (3) и (4) выражение (2) можно записать как отдельную реализацию случайного процесса:

$$\eta = \frac{\left| \int_{A_r} \int_{A_t} f_{r0}(r'_r, \theta_r) e^{-j\frac{\chi_r}{2} r'^2_r} \int_{A_r} \int_{A_t} f_{t0}(r'_t, \theta_t) e^{-j\frac{\chi_t}{2} r'^2_t} e^{j\{B(r'_t, \theta_t) + \Psi(r'_t, \theta_t)\}} e^{j c r'_r r'_t \cos(\theta_r - \theta_t)} dP_r dP_t \right|^2}{(2L)^2 \int_{A_r} \left| f_{r0}(r'_r, \theta_r) \right|^2 dP_r \int_{A_t} \left| f_{t0}(r'_t, \theta_t) e^{j\{B(r'_t, \theta_t) + \Psi(r'_t, \theta_t)\}} \right|^2 dP_t}, \quad (5)$$

где $\chi_r = \frac{R_r}{R_t} \left(1 - \frac{L}{b_r}\right)$, $\chi_t = \frac{R_t}{R_r} \left(1 - \frac{L}{b_t}\right)$, $c = \frac{k R_r R_t}{L}$ — число Френеля.

Средний КПД введен как отношение средних значений числителя и знаменателя. Такое усреднение справедливо, если при наличии ошибок полная мощность, излучаемая антенной, меняется слабо, в то время как

мощность, излучаемая в некотором направлении, может меняться сильно [4].

Усреднив случайное распределение поля передающей апертуры, получим

$$\overline{f_t(Q_t) f_{tt}^*(Q_{tt})} = \overline{f_t(Q_t) f_{tt}^*(Q_{tt})} \frac{\overline{q(Q_t) q^*(Q_{tt})}}{\overline{q(Q_t) q^*(Q_{tt})}} = \overline{f_t(Q_t) f_{tt}^*(Q_{tt})} p(Q_t, Q_{tt}). \quad (6)$$

Здесь индексы t и tt обозначают разные координатные системы.

В соотношении (6) $p(Q_t, Q_{tt}) = 1 + K_1(Q_t, Q_{tt})$, где

$$K_1(Q_t, Q_{tt}) = \frac{\overline{\Delta q(Q_t) \Delta q^*(Q_{tt})}}{\overline{q(Q_t) q^*(Q_{tt})}} \quad \text{— нормированная корреляционная функция}$$

(НКФ) случайного процесса $\Delta q(Q_t) = q(Q_t) - \overline{q(Q_t)}$.

Коэффициенты корреляции флуктуаций амплитуды и фазы выбраны в гауссовской форме [4], равны между собой и зависят от разности координат:

$$\begin{aligned} r_B(r'_t, \theta_t, r'_{tt}, \theta_{tt}) &= r_Y(r'_t, \theta_t, r'_{tt}, \theta_{tt}) = r = \\ &= \exp\left(-\frac{(r_t'^2 + r_{tt}'^2) R_t^2}{c_0^2}\right) \exp\left(\frac{r_t'^2 r_{tt}'^2 R_t^2}{c_0^2} \cos(\theta_t - \theta_{tt})\right), \end{aligned} \quad (7)$$

где c_0 — радиус корреляции в абсолютных единицах.

Если использовать аппарат характеристических функций [4] для случая малых ошибок и выражение (6), НКФ примет вид

$$K_1(Q_t, Q_{tt}) = r \sigma_\Sigma^2, \quad (8)$$

где $\sigma_\Sigma^2 = \sigma_B^2 + \sigma_\Psi^2 = \alpha_\Sigma$ — суммарная дисперсия.

Усреднив знаменатель выражения (5), запишем следующее выражение для среднего КПД:

$$\eta_{\text{ср}} = e^{-\sigma_\Sigma^2} \frac{\int_{A_r} \int_{A_{rr}} f_{r_0}(r_r, \theta_r) f_{r_0}^*(r_{rr}, \theta_{rr}) e^{-\frac{\sigma_{rr}^2}{2}(r_r^2 - r_{rr}^2)} G(r_r, \theta_r, r_{rr}, \theta_{rr}) dP_r dP_{rr}}{(\lambda L)^2 \int_{A_r} |f_{r_0}(r_r, \theta_r)|^2 dP_r \int_{A_t} |f_t(r_t, \theta_t)|^2 dP_t}, \quad (9)$$

где

$$G(r'_r, \theta_r, r'_{rr}, \theta_{rr}) =$$

$$= \int_{A_r} \int_{A_{rr}} f_t(r'_t, \theta_t) f_t^*(r'_{tt}, \theta_{tt}) e^{-j \frac{c \chi_t}{2} (r_t'^2 - r_{tt}'^2)} \left(1 + r \sigma_{\Sigma}^2\right) e^{j c r'_r r'_t \cos(\theta_r - \theta_t)} dP_t dP_{tt}.$$

Полученное выражение является общим. Если поле возбуждения аксиально симметрично, то, используя интегральное представление для бесселевых функций [6] и условие нормировки радиальных координат, выражение (9) преобразуем в вид

$$\eta_{cp} = c^2 e^{-\sigma_{\Sigma}^2} \frac{\int_0^1 \int_0^1 R(r'_r, r'_{rr}) \int_0^1 \int_0^1 T(r'_t, r'_{tt}) D(r'_r, r'_{rr}, r'_t, r'_{tt}) r'_r r'_{rr} r'_t r'_{tt} dr'_r dr'_{rr} dr'_t dr'_{tt}}{\int_0^1 |f_{r0}(r'_r)|^2 r'_r dr'_r \int_0^1 |f_{t0}(r'_t)|^2 r'_t dr'_t}, \quad (10)$$

где

$$R(r'_r, r'_{rr}) = f_{r0}(r'_r) f_{rr0}^*(r'_{rr}) e^{-j \frac{\chi_r c}{2} (r_r'^2 - r_{rr}'^2)};$$

$$T(r'_t, r'_{tt}) = f_{t0}(r'_t) f_{tt0}^*(r'_{tt}) e^{-j \frac{\chi_t c}{2} (r_t'^2 - r_{tt}'^2)};$$

$$D(r'_r, r'_{rr}, r'_t, r'_{tt}) =$$

$$= J_0(c r'_r r'_t) J_0(c r'_{rr} r'_{tt}) \left[1 + \sigma_{\Sigma}^2 I_0 \left(\frac{2 r'_t r'_{tt} R_t^2}{c_0^2} \right) \exp \left(- \left(\frac{r_t'^2 + r_{tt}'^2}{c_0^2} \right) R_t^2 \right) \right];$$

$J_0(x)$, $I_0(x)$ — функции Бесселя нулевого порядка, соответственно вещественного и мнимого аргументов.

Формула (10) позволяет находить средний КПД при наличии флуктуаций АФР передающей апертуры. При условии отсутствия флуктуаций $\alpha_{\Sigma} = 0$ эта формула сводится к выражению (2).

Результаты численного моделирования. С помощью соотношения (10) произведена оценка среднего КПД передачи энергии при различных АФР на передающей антенне с учетом флуктуаций и различных стационарных АФР на приемной. Показано влияние дисперсии и коэффициента корреляции на средний КПД. Антенны при этом имеют одинаковые размеры и взаимно сфокусированы, т.е. каждая антенна сфокусирована в центр другой.

На рис. 2 представлены зависимости среднего КПД (далее просто КПД) от числа Френеля при наличии флуктуаций (для различных суммарных дисперсий α_Σ и $c_0=1$) для спадающего (рис. 2, а) и равномерного (рис. 2, б) АР на приемной и передающей апертурах. Спадание происходило по закону $[1-r_n^2]$, где r_n — нормированный размер апертуры, $0 \leq r_n \leq 1$.

Наибольшее влияние флуктуаций наблюдалось для значений числа Френеля, при которых имеет место максимум КПД, т.е. в области фокусировки. При наличии флуктуаций с параметрами $\alpha_\Sigma = 0,2$, $c_0 = 1$ КПД падает на 7...8 % по сравнению со случаем отсутствия ошибок. Для спадающих АР КПД выше и область фокусировки шире, чем для равномерных АР.

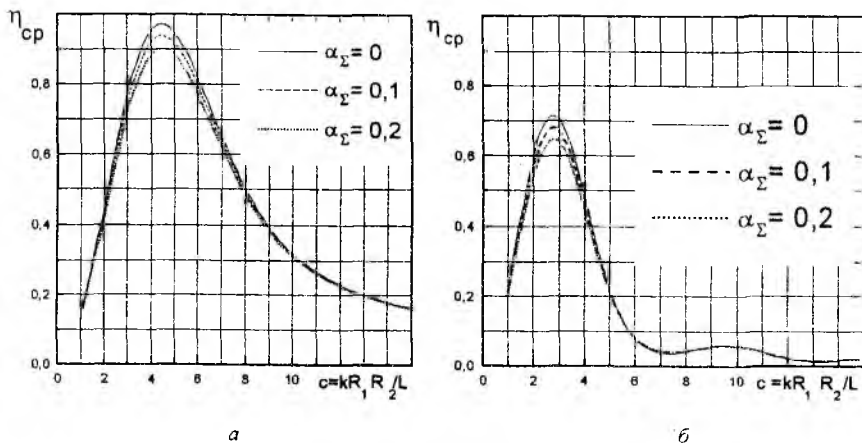


Рис. 2

Оценим влияние степени спадания АР Δ на КПД с учетом ошибок (рис. 3). Рассмотрим такие АР: равномерное, степенное на пьедестале и

степенное, выбранные в виде $f(r'_{lr}) = \left[(1 - r'_{lr})^2 \right]^n + \Delta$. Пьедестал $\Delta = 0,462$ соответствует 10-децибельному спадаению АР поля к краям антенны, а $\Delta = 0,111$ — 20-децибельному спадаению поля [5]. При этом рассмотрим одностипные АР на передающей и приемной антеннах (кривые 1 — 3). Как показано в [2], для зоны Френеля, при смещении приемной апертуры относительно расстояния фокусировки передающей, происходит подъем пьедестала возбуждающего поля. Поэтому целесообразно остановиться на случае разнотипного возбуждения. На передающей антенне изменяется высота пьедестала с учетом флуктуаций, а на приемной антенне как предельный случай получено равномерное АР (кривые 4 — 6). Для сравнения разнотипных возбуждений отражен случай, когда на передающей апертуре реализовано равномерное АР с ошибками, при изменяющейся высоте пьедестала на приемной (кривые 7—9).

Рассмотрим рост флуктуаций АФР: ошибок нет — кривые 1, 4, 7; ошибки присутствуют: $\alpha_{\Sigma} = 0,1$; $c_0 = 1$ — кривые 2, 5, 8; $\alpha_{\Sigma} = 0,2$; $c_0 = 1$ — кривые 3, 6, 9. С возрастанием флуктуаций необходимо уменьшать высоту пьедестала передающей антенны, поскольку меньше сказывается влияние фазовых ошибок, сосредоточенных в основном на краях апертуры, на распределение поля в пространстве. Для достижения максимального КПД передачи следует использовать одностипные АР (кривые 1 — 3) с нулевым пьедесталом (квадратичное АР, $\Delta = 0$). Как показано в работе [3], при неравномерном облучении приемно-выпрямительной апертуры (ПВА) ректенны падающим СВЧ-полем в ней возникают значительные потери сбора мощности постоянного тока, растущие с повышением степени неравномерности облучения ПВА. В силу неравномерности облучения ректенны эквивалентные ЭДС, силы токов и внутренние сопротивления эквивалентных источников тока, которыми представлен каждый приемно-выпрямительный элемент (ПВЭ), будут существенно различаться при движении по ПВА. В этой связи необходимо соблюсти ключевой принцип построения ректенн с высоким КПД — выровнять эквивалентные ЭДС или токи ПВЭ по апертуре [3]. Поэтому вариант со спадающим АР на передающей антенне и равномерным на приемной является предпочтительным при рассмотрении общего КПД СПЭ, несмотря на то что КПД передачи для разнотипных АР на 12 ... 14 % ниже, чем для одностипных АР (например, см. кривые 2 и 5, 3 и 6). Максимальный КПД с нулевым пьедесталом без ошибок составляет 83 %. При флуктуациях ($\alpha_{\Sigma} = 0,1$; $c_0 = 1$) КПД падает на 3 %. Спадание АР приемной антенны приводит к уменьшению КПД по сравнению с КПД в случае спадаения поля передающей антенны при равномерном АР на передающей и приемной

антеннах. Так, для квадратичного АР на приемной и равномерного АР на передающей при дисперсии $\alpha_{\Sigma} = 0,1$ КПД меньше на 1,2 % (кривые 5 и 8), а при $\alpha_{\Sigma} = 0,2$ — на 2,5 % (кривые 6 и 9) по сравнению с КПД для квадратичного АР на передающей антенне и равномерного АР на приемной.

На рис. 4 показана зависимость значений числа Френеля c_{opt} (соответствующих максимуму КПД) от высоты пьедестала Δ при различных способах возбуждения апертур. СПЭ менее чувствительна к месторасположению антенн (в смысле достижения максимального КПД) при разнотипных АР на приемной и передающей апертурах. Это позволяет при маневрировании космических аппаратов сохранять в допустимых пределах энергетические параметры СПЭ. Расположение точек с максимальным КПД не зависит от флуктуаций АФР при одно- и разнотипном возбуждении антенн СПЭ.

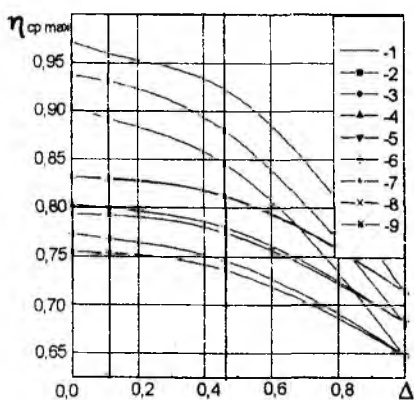


Рис. 3

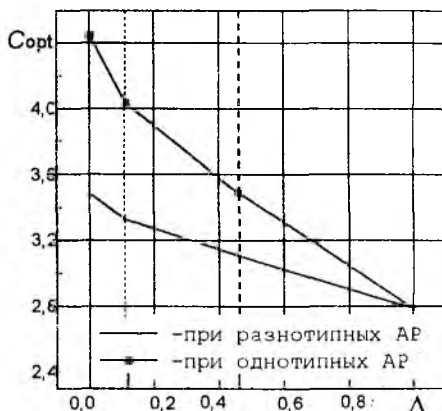
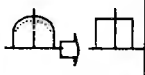



Рис. 4

Рассмотрим для спадающих АР ($\Delta = 0$) влияние скорости спадания поля по апертуре на эффективность передачи энергии. В таблице приведены значения максимального КПД в зависимости от скорости спадания поля по апертуре при флуктуациях АР. В качестве исследуемых АР взяты квадратичное, треугольное $(1 - r_{r,t}')$ и гауссовское $(e^{-\sigma r_{r,t}'^2})$ с различными параметрами σ ; здесь $r_{r,t}'$ — нормированный размер апертуры, $0 \leq r_{r,t}' \leq 1$.

При разнотипном возбуждении рассмотрены два случая: на передающей антенне изменяется скорость спадания поля с учетом флуктуаций при равномерном АР на приемной антенне и, наоборот, на передающей апертуре реализовано равномерное АР с ошибками при изменяющейся скорости спадания поля на приемной антенне. КПД стремится к 1, когда на приемной и передающей антеннах реализовано АР гауссовского типа ($\sigma \rightarrow 7$).

С увеличением σ от 4 до 7 при наличии ошибок ($\alpha_{\Sigma} = 0,2$, $c_0 = 1$) КПД возрастает на 2,5 %, в то время как при меньшей суммарной дисперсии ($\alpha_{\Sigma} = 0,1$, $c_0 = 1$) он повышается лишь на 1,8 %, т.е. рост флуктуаций слабее влияет на уменьшение КПД для АР при $\sigma \rightarrow 7$. При разнотипном возбуждении антенн КПД слабо зависит от скорости спадания; при $\sigma \rightarrow 7$ наблюдается некоторое его уменьшение. Изменение скорости спадания поля на приемной антенне сильнее влияет на снижение КПД при равномерном АР на передающей антенне с ошибками, что можно объяснить большим вкладом периферии передающей антенны в формировании поля в области приемной антенны.

АР на передающей и приемной антеннах		Определяемая величина	Дисперсия α_{Σ} при $c_0 = 1$	Тип АР				
				Квадратичное	Треугольное	Гауссовское		
						$\sigma = 4$	$\sigma = 6$	$\sigma = 7$
Однотипные		$\eta_{\text{ср max}}$	0	0,97	0,99	0,995	1,00	1,00
			0,1	0,94	0,96	0,97	0,98	0,99
			0,2	0,90	0,93	0,95	0,96	0,97
		c_{opt}	—	4,50	5,30	8,00	12,10	14,8
Разнотипные		$\eta_{\text{ср max}}$	0	0,83	0,84	0,82	0,81	0,81
			0,1	0,80	0,81	0,80	0,80	0,80
			0,2	0,77	0,78	0,78	0,78	0,78
		$\eta_{\text{ср max}}$	0	0,83	0,84	0,82	0,81	0,81
			0,1	0,79	0,78	0,78	0,78	0,78
			0,2	0,75	0,76	0,74	0,74	0,74
		c_{opt}	—	3,50	3,76	4,50	5,45	5,90

Однотипные гауссовские АР также более чувствительны к условиям взаимного расположения антенн СПЭ. Например, при более крутом спаде АР ($\sigma \rightarrow 7$) на краю антенны c_{opt} возрастает до 15. При разнотипных АР такая зависимость меньше проявляется ($c_{\text{opt}} = 3 \dots 6$).

На рис. 5 представлена зависимость КПД СПЭ от радиуса корреляции c_0 для различных значений суммарной дисперсии α_Σ : обе антенны имеют распределение вида $\left[(1-r_n^2) + 0,111 \right]$, где r_n — нормированный радиус апертуры $0 \leq r_n \leq 1$. Влияние радиуса корреляции ошибок на КПД сильнее проявляется при $c_0 \leq 1$. При $c_0 \rightarrow 0,5$ и $\alpha_\Sigma = 0,3$ КПД уменьшается на 14 % по сравнению с КПД при $c_0 \geq 3$, когда зависимость растет слабо.

Рассмотрим зависимость КПД СПЭ от суммарной дисперсии α_Σ (рис. 6) для различных значений радиуса корреляции c_0 , когда обе антенны имеют гауссовское распределение вида $e^{-\sigma r_n^2}$ с параметром $\sigma = 4$ (r_n — нормированный размер апертуры, $0 \leq r_n \leq 1$). Рост суммарной дисперсии ведет к линейному уменьшению КПД, особенно при малых радиусах корреляции $c_0 = 0,1$. Так, при увеличении суммарной дисперсии до $\alpha_\Sigma = 0,3$ при $c_0 = 0,1$ КПД падает на 25 %.

Далее рассмотрим зависимость КПД СПЭ от числа Френеля (рис. 7) при флуктуациях АФР ($\alpha_\Sigma = 0,1$ для кривых 1, 3, 5, 7; $\alpha_\Sigma = 0,2$ для остальных) и различных возбуждениях антенн. Кривые 1, 2 соответствуют АР вида $\left[(1-r_n^2) + 0,462 \right]$; кривые 3, 4 — АР вида $\left[1-r_n^2 \right]$; кривые 5, 6 — АР вида $(1-r_n)$; кривые 7, 8 — АР вида $e^{-\sigma r_n^2}$ с параметром $\sigma = 6$, где r_n — нормированный размер апертуры $0 \leq r_n \leq 1$. Из показанных зависимостей видно, что для АР степенного типа максимумы КПД наблюдаются при малых значениях числа Френеля (кривые 1–6) и они ближе к дальней границе зоны Френеля $\frac{L}{L_{FZ}} = \frac{0,785}{c}$. Здесь $L_{FZ} = \frac{2D^2}{\lambda}$ — граница дальней зоны; D — максимальный линейный размер излучающей апертуры. Несмотря на то что характер зависимостей, представленных на рис. 2,7, сходный, следует указать, что наиболее приемлемым для обеспечения максимального КПД передачи является гауссовское АР (кривые 7–8, рис. 7), реализуемое как на приемной, так и на передающей апертурах. Средний КПД $\eta_{cp} \geq 0,8$ сохраняется в более широком интервале значений числа Френеля c , чем при других АР. В случае повышения общего КПД СПЭ нужно при спадающем АР на передающей антенне (с учетом флуктуаций)

на приемной рассматривать АР, имеющее пьедестал. Средний КПД при этом составляет 70...80 %, что соответствует реальной СПЭ [3].

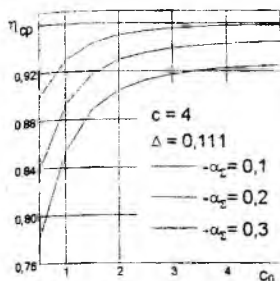


Рис. 5

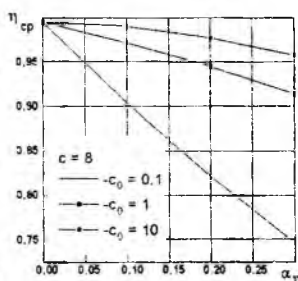


Рис. 6

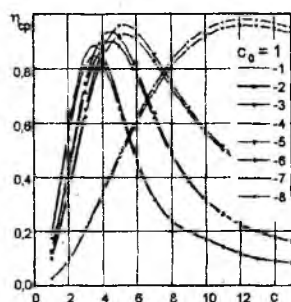


Рис. 7

Выводы. Анализ приведенных результатов позволил выявить основные зависимости в изменении среднего КПД от изменения параметров флукуаций, расстояния между ними, а также различных видов АФР. Наличие флукуаций поля по апертуре передающей антенны не меняет характера зависимости среднего КПД от числа Френеля c .

Однако появление флукуаций приводит к уменьшению потенциально возможного среднего КПД.

Предпочтительными являются спадающие АФР, в общем случае разнотипные, например гауссовского типа. КПД передачи при этом имеет заданные допустимые значения в более широком интервале значений c . Разнотипные АР менее чувствительны к условиям взаимного расположения антенн СПЭ.

Список литературы: 1. Shifrin J.S., Shokalo V.M., Rybalko A.M. Efficiency of energy transmission systems with microwave beam // Proc. of 5th Intern. Symp. Recent Advances in Microwave Technology. Kiev, 1995. Vol. 1. P. 242 — 249. 2. Sherman J. Properties of focused apertures in the Fresnel region // IRE Trans. Antennas and Propagation. 1962, July. Vol. 10. P. 39 — 52. 3. Анализ и проектирование схем сбора мощности постоянного тока. Сообщение 2. Способы повышения КПД схемы сбора, основанный на выравнивании по апертуре ретенны распределения ЭДС или токов приемно-выпрямительных элементов / А.И. Лучанинов, В.М. Шокало, А.А. Щербина // Радиотехника. 1993. Вып. 97. С.73 — 78. 4. Шифрин Я.С. Вопросы статистической теории антенн. М.: Сов. радио, 1970. 384 с. 5. Kay A.F. Near field gain aperture antennas // IRE Trans. Antennas and Propagation. 1960, Nov. Vol. 8. P. 586 — 593. 6. Лебедев Н.Н. Специальные функции и их приложения. М.: Физматгиз, 1963. 358 с.

Харьковский государственный технический университет радиозлектроники

Поступила в редколлегию 25.06.98