

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РЕАКТИВНОГО ПОЛЯ ПЕРЕХОДОВ КОАКСИАЛЬНЫХ ФИДЕРНЫХ ЛИНИЙ К ЭЛЕКТРИЧЕСКИ МАЛЫМ ПРОВОЛОЧНЫМ АНТЕННАМ ВА И КА

ИБРАИМОВ И.К., ОВСЯНИКОВ В.В.,
ПАНЧЕНКО А.Ю., КРАВЕЦ Н.В.

Анализируется реактивное поле перехода коаксиальной фидерной линии к электрически малой проволочной антенне. Учитывается специфика работы антенн на корпусах космических и воздухоплавательных аппаратов. Находится распределение поля, вклад в общее излучение, допускается учет вставок, защитных колец на конце фидера, слоистость и проводимость среды, которая может возникнуть при входе космического аппарата в плотные слои атмосферы.

Ключевые слова: антенна, излучение, электромагнитное поле, функции Грина, эквивалентная емкость, интегральное уравнение, экран.

Key words: antenna, radiation, electromagnetic field, Green's functions, equivalent capacitance, integral equation, screen.

1. Введение

Антенны систем навигации и связи воздухоплавательных и космических аппаратов (ВА и КА) имеют свою специфику [1-5]. Они должны быть всенаправленными и широкодиапазонными [6-13]. Кроме того, они должны иметь малое аэродинамическое сопротивление, а иногда находиться в углублениях внешней оболочки. Это приводит к тому, что ВА и КА имеют электрически малые антенны (ЭМА). Их выполняют в виде коротких штырей, полосков, проволок с изгибами и корректирующими нагрузками (КН) [14]. Сложность оценки их параметров требует разбиения ЭМА на части [15]. Анализ излучающей части электрически малых проволочных антенн (ЭМПА) уделено достаточное внимание [16-19]. Но в СВЧ диапазоне увеличиваются электрические размеры всех элементов электродинамической системы. Пропорционально возрастает их вклад в общие характеристики антенны. Заметный вклад в излучаемое поле и в общий импеданс ЭМА может вносить область перехода от питающего фидера к излучающей части. Решение задачи оценки этого вклада требует иного подхода. Он был развит в рамках работ по микроволновой микроскопии и теории СВЧ сенсоров в виде коаксиальных открытых апертур [20-24].

Целью данной работы является создание методики определения влияния области подключения фидера к ЭМПА. *Задачами* – получение аналитических выражений и оценка сделанных при

этом приближений. При создании методики должны быть учтены особенности условия работы антенн ВА и КА.

1. Условия и постановка задачи

Питание двухчастотных и широкополосных ЭМПА во многих случаях осуществляется с помощью коаксиальной линии. Для вычисления вклада места подключения нужно решить электродинамическую задачу относительно компонент ЭМП в этой области. Условия решения задачи поясняют геометрические схемы, приведенные на рис. 1 а,б,в,г.

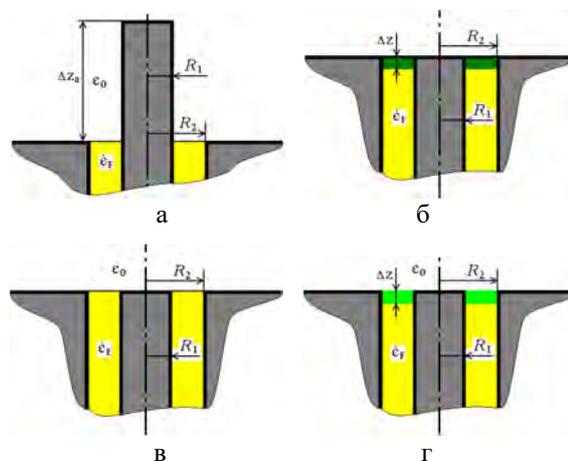


Рис. 1. Схемы условий задачи перехода ЭМП фидера к ЭМПА КА

Выбранные схемы соответствуют расположению ЭМА на внешней поверхности КА, которая представляет собой металлический экран.

В случае прямого штыря (рис. 1, а) расчет параметров ведется для всей конструкции в целом. Поэтому данный вариант в методике не рассматривается.

Согласование фидера в случае нагрузки коаксиальной линии тонким поглощающим кольцом ($\Delta z \rightarrow 0$), у которого сопротивление между образующими радиусами равно волновому сопротивлению линии (рис. 1, б), будет ближайшим к идеальному. Наибольший вклад в излучаемое поле относительно уровня поля самой ЭМПА будет при коротком штыре или без него (рис. 1, в). Открытая коаксиальная апертура тоже является излучающей системой [20]. Но наиболее полно условия задачи и возможности ее решения отражает схема с кольцом (обозначено ярко зеленым), полное сопротивление которого равно вычисленному сопротивлению антенны в месте подключения к фидеру (рис. 1, г). Поэтому для дальнейшего анализа выбрана эта схема.

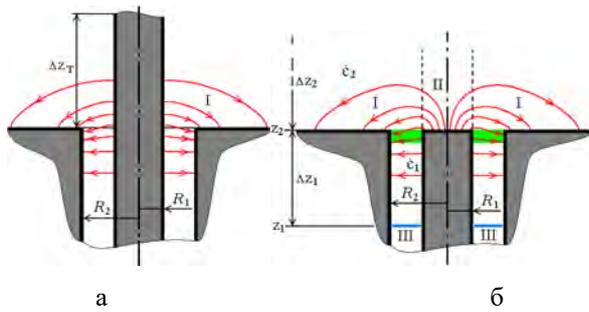


Рис. 2. ЭМП в области соединения ЭМПА с коаксиальным фидером

В коаксиальной линии, как правило, используется основная мода колебаний (ТЕМ-волна). Диэлектрическая проницаемость ϵ_F и отношение радиусов R_1/R_2 определяет волновое сопротивление фидера ρ_F . Для наиболее часто применяемых величин ρ_F значение R_1/R_2 лежит в пределах 1,5...3. Сравнение распределения компонент ЭМП для выбранного варианта и прямого штыря представлено на рис. 2, а, б.

Между начальным участком ЭМПА (Δz_T) и экраном (область I на рис. 2, а) существует реактивное электрическое поле. Во всех случаях реальных конструкций можно считать эту область электрически короткой, потому что реактивное поле в открытом пространстве быстро затухает. Поэтому вклад этой области будет емкостный. Как известно, емкость системы определяется отношением энергии электрического поля в системе к половине квадрата напряжения на ней. Уменьшение объема поля, прилегающего к штырю (рис. 2, а), компенсируется полем в области II (рис. 2, б), и в первом приближении такое представление допустимо.

При формулировании задачи было внесено поглощающее кольцо с эквивалентным сопротивлением ЭМПА. Электрофизические свойства этого кольца войдут в расчетные формулы емкости перехода фидер-ЭМПА (C_T), и это существенно изменит ее рассчитанное значение. Но комплексное сопротивление ЭМПА и сопротивление C_T соединяются параллельно, поэтому полное сопротивление, подключенное к выходу фидера, можно определить на конечном этапе, а все математические преобразования относительно C_T провести без этого кольца. Такая последовательность позволит ограничить электродинамическую задачу методом разработкой методики оценки величину C_T открытой коаксиальной апертуры. Кроме того, она допускает включение

достаточно простого алгоритма учета вклада диэлектрических вставок в фидере, а также дальнейшее развитие методики в направлении вычисления параметров других осесимметричных способов подключения ЭМА.

Строгое решение электродинамических задач требует существования области, в которой компоненты ЭМП наиболее полно соответствуют реальным. В данном случае это область, углубленная в коаксиальный фидер [25,26]. Он представляет собой электрически тонкую линию ($R_2 \ll \lambda$), и в нем быстро затухают все моды колебаний, кроме основной. Поэтому на малом расстоянии от конца можно считать, что электрическое поле имеет только радиальную компоненту $-E_r$, а магнитное – только азимутальную H_ϕ .

Определение компонент ЭМП в области перехода можно провести, используя тензорные функции Грина уравнений Максвелла для цилиндрических областей.

2. Основные соотношения

Углубленное сечение фидера при условии $R_2 \ll \lambda$ будет считаться областью расположения источников – сечение $z=z_1$ на рис. 2, б. В этом сечении достаточно задать только одну из компонент падающей волны, например, E_r , которая равна $E_r(r) = U_0 \cdot r^{-1}$, где $U_0 = U_C [\ln(R_2/R_1)]^{-1}$, U_C – напряжение между проводниками линии.

Разбиение всей электродинамической системы на частичные простые области, в которых сечение и диэлектрическая проницаемость (ϵ) постоянны, позволит получить аналитические выражения компонент ЭМП в каждой из них. Примером частичной области может быть коаксиальная область, которая связана с другими через верхнюю и нижнюю границы (рис.3).

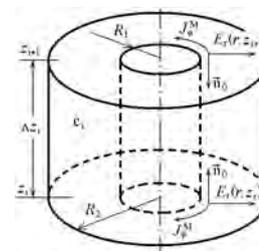


Рис. 3. Распределение источников ЭМП в частичной области

Поверхностное электрическое поле на торцах \vec{E}_s связано с поверхностным магнитным током \vec{J}_s^i как

$$\vec{j}_s^i = -[\vec{n}_o \vec{E}_s]. \quad (2)$$

Тогда через тензорную функцию Грина для магнитной компоненты ЭМП она выражается как

$$\vec{H}(r, z) = \int_V \vec{A}^{MM}(\vec{r}, \vec{r}') \vec{j}^M(\vec{r}') dv, \quad (3)$$

где $\Gamma^{MM}(\vec{r}, \vec{r}')$ – функция Грина для магнитного поля и магнитного тока.

Приравнивая на основании граничных условий соответствующие компоненты ЭМП на границах между областями, можно создать систему интегральных уравнений. Это позволит получить пространственное распределение компонент ЭМП, которое в свою очередь дает возможность вычислить необходимые характеристики всей электродинамической системы. Детально эта процедура для распределения E_r в плоскости экрана показана в [27]. Здесь приведем ее конечный результат для выбранной конфигурации (рис. 2, б).

В плоскости экрана E_r подчиняется уравнению:

$$\int_{R_1}^{R_2} E_r(r', z_2) [\dot{\epsilon}_2 \dot{S}_1(r') + \dot{\epsilon}_1 \dot{S}_2(r')] r' dr' = \dot{\epsilon}_1 \int_{R_1}^{R_2} E_r(r', z_1) \dot{S}_3(r') r' dr', \quad (4)$$

$$\text{где } \dot{S}_1(r') = \int_0^\infty \frac{J_1(\kappa r) J_1(\kappa r') \kappa}{\gamma_2} d\kappa;$$

$$\dot{S}_2(r') = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2\pi \frac{\partial}{\partial r}(\chi_n(r)) \frac{\partial}{\partial r'}(\chi_n(r'))}{\eta_n k_n^2 \gamma_n} \text{csh}(\gamma_1 \Delta z_1);$$

$$\dot{S}_3(r') = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2\pi \frac{\partial}{\partial r}(\chi_n(r)) \frac{\partial}{\partial r'}(\chi_n(r'))}{\eta_n k_n^2 \gamma_n} \text{cth}(\gamma_1 \Delta z_1);$$

При $n=0$

$$\chi_0(r) = \ln(k_0 r), \quad \gamma_0 = \sqrt{-\dot{\epsilon}_1 k_0^2}, \quad \eta_0 = \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right),$$

где k_0 – постоянная распространения в вакууме [28].

При $n > 0$ функции $\chi_n(r)$ и нормы η_n равны [29]

$$\chi_n(r) = Y_0(k_n R_1) \cdot J_0(k_n r) - Y_0(k_n r) \cdot J_0(k_n R_1),$$

$$\eta_n = \frac{R_2^2}{2} [N_0(k_n R_1) J_1(k_n R_2) - J_0(k_n R_1) N_1(k_n R_2)]^2 - \frac{R_1^2}{2} [N_0(k_n R_1) J_1(k_n R_1) - J_0(k_n R_1) N_1(k_n R_1)]^2,$$

где J и N – функции Бесселя I и II рода;

$$\gamma_2 = \sqrt{\kappa^2 - \dot{\epsilon}_2 k_0^2}; \quad \gamma_n = \sqrt{k_n^2 - \dot{\epsilon}_2 k_0^2}.$$

Собственные значения k_n определяются как корни уравнений

$$N_0(k_n R_2) J_0(k_n R_1) - J_0(k_n R_2) N_0(k_n R_1) = 0.$$

Разложение тангенциальных компонент электрического поля на границах $z=z_1$, $z=z_2$ и функции Грина переходной области по собственным функциям коаксиального участка позволит алгебраизировать задачу. Связь между гармониками $E_r(r', z_1)$ и $E_r(r', z_2)$ будет выражаться системой алгебраических уравнений. Применение аналогичной процедуры к простой штыревой антенне при ее работе в многослойной среде (область I на рис. 2, а) позволит получить строгое решение задачи работы такой антенны в плазме. Это соответствует случаю вхождения КА в плотные слои атмосферы при его спуске. Если в качестве ЭМА антенны использовать открытую коаксиальную апертуру (рис. 2, б), этот метод также позволит строго вычислить ее параметры. Но, учитывая очень громоздкую запись результатов, дальнейшее описание ограничено анализом (4).

Результат $E_r(z_2, r)$ получается в виде разложения по базису функций $\frac{\partial}{\partial r}(\chi_n(r))(\eta_n)^{-0,5}$, ортогональных в интервале $[R_1, R_2]$, с коэффициентами e_n . Суммы $\dot{S}_1(r, r')$ и $\dot{S}_2(r, r')$ в (4) представлены функциями базиса, сумма $\dot{S}_3(r, r')$ приводится к этому базису искусственно, $E_r(z_1, r')$ существует, как один элемент. Алгебраическая система из m уравнений, где $m=n$, позволяет получить значения всех e_n . Точность зависит от выбора числа составляющих – n_{\max} . Строгое описание распределения $E_r(z_1, r')$ позволит вычислить все параметры электродинамической системы (рис. 2, б).

Влияние емкости C_T растет с увеличением частоты. Для иллюстрационных расчетов выберем частоту ЭМП $f_0=10^{10}$ Гц, $\dot{\epsilon}=1-j0,0001$, напряжение между проводниками линии – $U_C=1$ В, внешний радиус фидера $R_2=2$ мм, внутренний (R_1) будет в качестве параметра.

Рассчитанное согласно (4) распределение поля $E_r(z_2, r)$ по сравнению с полем в бесконечной коаксиальной линии ($\hat{E}_r(r) = U_0 r^{-1}$) показано на рис. 4.

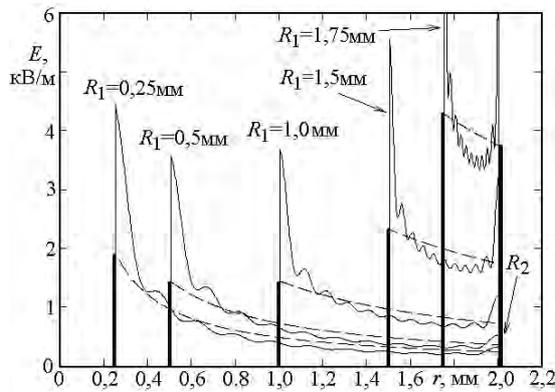


Рис. 4. Распределение E_r на выходе фидера

На этом рисунке вертикальными жирными линиями показаны границы коаксиального фидера (выбрано 5 значений R_1 : 0,25, 0,5, 1, 1,5, и 1,75мм). Штриховыми линиями показаны зависимости $\hat{E}_r(r)$ при $U_C = 1$ В. Тонкими линиями показаны рассчитанные значения $E_r(z_2, r)$. При расчете $E_r(z_2, r)$ выбрано 20 составляющих ($n_{\max} = 20$). Чтобы показать в масштабе этого рисунка погрешность расчетов, осцилляции результатов усилены в 10 раз при сохранении средних значений. При $n_{\max} \rightarrow \infty$ рассчитанное значение поля E_r на краях увеличивается до бесконечности. Ограниченность составляющих (n_{\max}) не ограничивает точности дальнейших расчетов, потому что бесконечность функции E_r является бесконечностью первого рода.

При разработке конкретных конструкций используют сосредоточенные параметры ЭМПА – эквивалентные емкости, индуктивности, действительные сопротивления. Но все приведенное выше описание относится к распределенным параметрам. Наиболее простой переход к сосредоточенным параметрам можно провести, используя вектор Пойнтинга в углубленном сечении коаксиальной линии, а в качестве вспомогательного сосредоточенного параметра – напряжение между проводниками линии в том же сечении. Тогда полное сопротивление в этом сечении равно

$$\dot{X}_1(z_1) = 0,5U_C^2 \left[\int_{R_1}^{R_2} \dot{E}_r(z_1, r') \dot{H}_\phi(z_1, r') r' dr' \right]^{-1}. \quad (5)$$

Для того чтобы обосновать эвристический выбор места положения сечения z_1 в фидере, нужно рассмотреть распределение компонент ЭМП. Магнитная компонента в фидере (участок Δz_1 на рис. 2, б) имеет вид

$$H_\phi(r, z) = -j\omega\epsilon_0\dot{E}_1 \times \int_{R_1}^{R_2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2\pi}{\eta_n(k_n)^2} \frac{\partial}{\partial r} (\chi_n(r)) \frac{\partial}{\partial r'} (\chi_n(r')) \frac{r'}{\gamma_n \text{sh}(\gamma_n \Delta z_1)} \times \left[E_r(r', z_1) \text{csh}(\gamma_n(\Delta z_1 - z)) - E_r(r', z_2) \text{cth}(\gamma_n z) \right] dr'. \quad (6)$$

Распределение $\vec{E}(r, z)$ определяется через поле H_ϕ согласно первому уравнению Максвелла

$$\vec{E}(r, z) = \frac{1}{j\omega\epsilon_0\dot{E}_1} \left[-\vec{i}_0 \frac{\partial H_\phi}{\partial z} + \vec{z}_0 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r H_\phi) \right]. \quad (7)$$

Полученные выражения (5), (6), (7) позволяют провести анализ сосредоточенных и распределенных параметров области перехода.

3. Анализ результатов

На рис. 5, а, б показано распределение компонент электрического поля в конце фидера с параметрами: $R_1 = 1$ мм, $R_2 = 2$ мм, $\dot{E}_1 = 1 - j0,0001$. Частота ЭМП равна $f_0 = 10^{10}$ Гц, напряжение между проводниками линии – $U_C = 1$ В. Осевой размер отсчитывается от конца фидера в направлении свободного пространства.

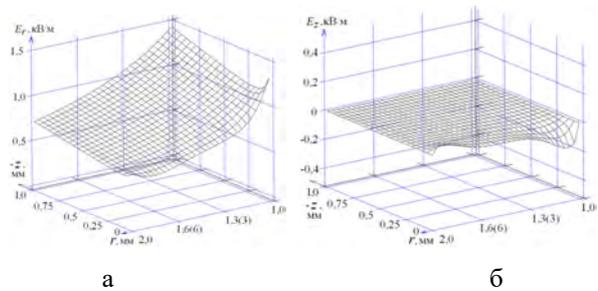


Рис. 5. Распределение компонент электрического поля \dot{E}_r (а) и \dot{E}_z (б) в конце фидера

Форма распределения поля приобретает существенные изменения только на самом краю фидера. Радиальная компонента (рис. 5, а) возрастает к краям, что соответствует росту напряженности поля вблизи ребер, и уменьшается в центре относительно поля в регулярной линии. Осевая компонента также возникает вблизи ребер, но на самой поверхности проводников, согласно граничному условию, равна нулю (рис. 5, б).

На рис. 6 а, б показано распределение H_φ в конце фидера и непосредственно за ним. Границы проводников показаны вертикальными жирными линиями.

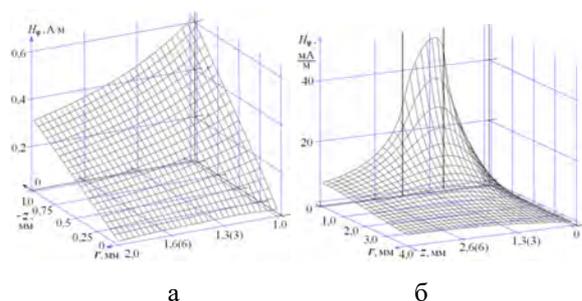


Рис. 6. Распределение H_φ : а – в конце фидера; б – при выходе поля в свободное пространство

Существенное изменение формы распределения в сечении выхода обуславливает значительную величину реактивного поля. При этом рост \vec{E} у краев коаксиальной линии и уменьшение магнитной указывает на емкостный характер этой области.

Представление распределений компонент \vec{E} при выходе в свободное пространство завершает этот этап анализа. На рис. 7, а, б показаны, соответственно, радиальная и осевая компоненты \vec{E} в непосредственной близости соединения антенны с фидером.

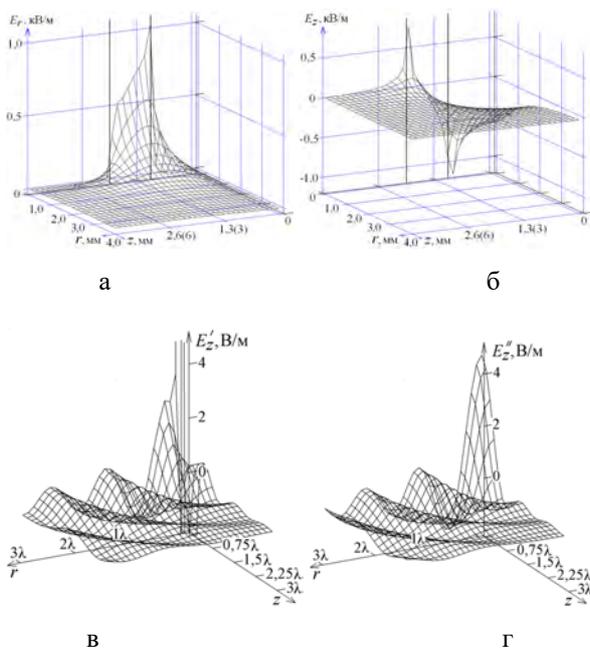


Рис. 7. Распределение электрического поля при выходе в свободное пространство

Чтобы оценить величину излучения этой части ЭМПА на рис. 7,в,г показано в существенно увеличенном масштабе действительное и мнимое значение осевой компоненты электрического поля в области 3λ в радиальном и осевом направлениях. Затухание поля в осевом направлении существенно больше, чем в радиальном. Это соответствует ДН короткого штыря. Поведение радиальной компоненты не рассматривается, потому что при осевой симметрии ее поле чисто реактивное, и она не вносит вклад в излучение.

На основании полученных распределений $\dot{H}_\varphi(z_1, r)$ согласно (5) проведен расчет емкости в сечении z_1 (см. рис. 2, б). Рассчитанные величины этой емкости – \dot{C}_1 на основании формул для длинных линий позволили оценить емкость на выходе фидера – \dot{C}_T . Зависимости действительной C'_T и мнимой частей C''_T емкости перехода от положения z_1 показаны на рис. 8 а, б.

На рис. 8, а выбран случай: $R_1=1\text{мм}$, $R_2=2\text{мм}$, $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 1 - j0,0001$. При этом волновое сопротивление фидера равно $\rho_F=41,6 \text{ Ом}$. В случае, который показан на рис. 8,б выбрано: $R_1=0,33(3)\text{мм}$, $R_2=2\text{мм}$, $\epsilon_1 = 2,1 - j0,00021$, $\epsilon_2 = 1 - j0,0001$, при этом $\rho_F=74,2 \text{ Ом}$. В обоих случаях рабочая частота равна 10 ГГц.

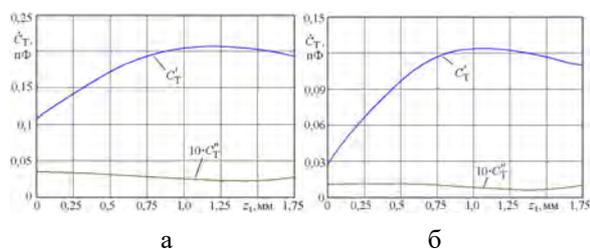


Рис. 8. Емкость области выхода центрального проводника фидерной линии

Физически эти результаты соответствуют приведенным на рис. 6,а. Рост интеграла по r от $H_\varphi(z, r)$ при малых заглублениях в фидер проходит быстрее, так как часть энергии ТЕМ волны на этом участке трансформируется в энергию осевой компоненты E_z (рис. 7, б). Эта энергия определяет значительную добавку к общей энергии электрического поля и, как следствие, к емкости системы. С другой стороны, согласно (5), если сечение расчета совпадает с концом фидера, то не учитывается продвижение энергии вдоль радиуса, которое возникает за счет формирования осевой компоненты \vec{E} , обуславливающей излучения системы без штыря (рис. 7, в,г).

Некоторое снижение рассчитанных значений при $z_1 > 1,25$ мм (рис. 8, а) и при $z_1 > 1$ мм (рис. 8, б), обусловлено методом расчета, при котором учитывалась только основная мода (см. рис. 5, а, б и рис. 6, а). Использование формул длинной линии учитывает вклад высших гармоник при выходе поля из фидера и в его конце. Рассчитанная таким образом C_1 при определении окончательного результата, а именно, нагрузки на генератор или вход приемника, учитывает все факторы, потому что она будет использоваться в тех же формулах длинных линий.

Рассчитанные значения компонент полного сопротивления области перехода для обоих указанных выше случаев показаны на рис. 9, а, б.

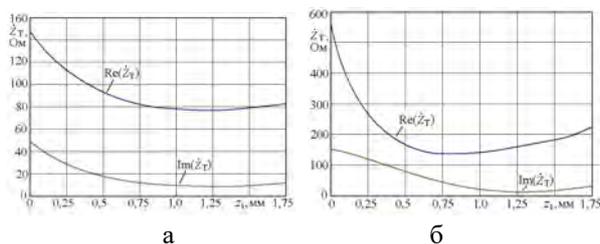


Рис. 9. Компоненты комплексного сопротивления выхода центрального проводника

Некоторое расхождение в форме графиков возникает вследствие разницы в сечениях и за счет отражения от границы изменения диэлектрической проницаемости во втором случае.

Полученные числовые значения показывают, что при работе ЭМПА на частотах около 1 ГГц и выше вклад емкостной области может повлиять на рассчитанные параметры антенн.

Выводы

1. Выбранный метод и созданная методика позволяет получить аналитические выражения, которые в достаточной мере описывают параметры области подключения ЭМПА КА к коаксиальному фидеру.
2. Численные расчеты показывают, что при работе ЭМПА на частотах около 1 ГГц и выше нужно компенсировать вклад емкостной области и учитывать его в расчете поля излучения ЭМПА при определении фазовых центров антенн систем навигации КА. Представленная возможность определения параметров емкостной области позволяет провести необходимые вычисления.
3. Методика дает возможность распространить строгое решение на работу ЭМПА над металлическим корпусом КА при спуске и входе в плотные слои атмосферы, во время которого образуется плазменный слой.
4. Подробно рассчитанный вариант открытой коаксиальной апертуры может быть полезным,

как ЭМА КА. Его преимущество – отсутствие аэродинамического сопротивления.

5. Полученные результаты можно использовать для других вариантов конструкций ЭМПА, прежде всего с изгибами и КН, применяя принципы дуальности, отражения и другие, разработанные в современной электродинамике.

6. Эти результаты имеют самостоятельное значение в смежных направлениях науки и СВЧ техники.

Список литературы:

1. *Khmyrov B.E.* The AUREOL-3 satellite / B.E. Khmyrov, S.S. Kavelin, A.M. Popel, V.S. Varyvdin, K.V. Rodin, V.V. Ovsyanikov // *Annales de geophysique*, Paris 1982. 38, N 5. P. 547-556.
2. *Овсяников В. В.* Электрически малые штыревые антенны для радиосистем космической и авиационной техники // *Журн. Изв. ВУЗ-ов. Радиоэлектроника*. Киев. 2010. Т 53, №3. С 13 – 25.
3. *Овсяников В.В., Крюков А. В.* Малогабаритная спиральная коническая антенна для спутниковых систем // *Журн. Изв. ВУЗов. Радиоэлектроника*. Киев-2005. Т 48, № 10. С 59 – 64.
4. *Слюсар В.И.* Перспективные технологии антенных решеток мобильных терминалов спутниковой связи. Технологии и средства связи. 2014. № 4. С.64 – 68.
5. *Овсяников В.В.* Состояние разработок вибраторных, диэлектрических и плазменных антенн в контексте исторического развития антенной техники // *Радиофизика и электроника*. ИРЭ НАН Украины. 2016. Т. 7 (21), №3. С. 58-73.
6. *Kolomojtssev F.I.* The use of capacitive elements to increase the broadband of curved vibrators / F.I. Kolomojtssev, V.S. Varyvdin, V.V. Ovsyanikov // *Radio engineering and electronics*, 1972. Vol. XVII, No. 11. P.2429-2432.
7. *Овсяников В.В., Реута О.В., Безносова Е.Р.* Анализ и оптимизация двухчастотного турникетного излучателя с импедансными элементами в ветвях. *Радиофизика и электроника*. Харьков: Сб. научн. трудов ИРЭ НАН Украины. 2002. Т. 7, Спец. вып. С.285-287.
8. *Galischuk A.A., Maslyey V.M., Olshevsky O.L., Romanenko E.D.* and all / Variants of the double - frequency GPS antennas // 2017 XI Intern.Conf. (ICATT), Kyiv, Ukraine, P. 202 – 205.
9. *Овсяников В. В., Безносова Е.Р.* Широкополосные антенны и антенные решетки с реактивными нагрузками. // *Радиофизика та електроніка*. Харків. Ж. ІРЕ НАН України. 2018. Т.23, № 2. С. 9 – 21
10. *Овсяников В.В.* Исследование широкополосной вибраторной антенной решетки круговой поляризации // *Радиофизика и радиоастрономия*, НАН Украины. Харьков. 1999. Т.4, № 4. С. 349 - 356.
11. *Ovsyanikov V.V., Svyntarenko D.M., Beznosova E.R., Tsipko L.Z.* Two-band antennas microwave range of waves // *Journ. of Phys. and Electronics*. Vol. 27 (1), 2019. P. 95-100.
12. *Ovsyanikov V. V., Morozov V. V., Beznosova E.R., Tsipko L.Z., Gorobets N.N.* Broadband antennas with reactive loads // 2018, 9th International Conference UWBUSIS'18. Sept 4-7, Odessa, Ukraine, P. 353-356
13. *Ovsyanikov V.V., Smirnov S.A., Ol'shevs'kiy O.L., Popel' V.M., Rodin K.V., Romanenko Y.D.* // Wideband antenna array of circular and linear polarization. Proc. of

- the Int. Conf. UWBUSIS' 08. Sevastopol, Ukraine. 2008. P. 55-58.
14. *Овсяников В.В.* Электрически малые вибраторные, спиральные и петлевые антенны // Радиопизика и электроника. Харьков. Ж. ИРЭ НАН Украины–2017. Т.8 (22), № 1. С. 57 – 67.
 15. *Krjukov A, Ovsyanikov V.* The antennas for Mobile Radio Communications // 31st European Microwave Conference. London 2001. Vol. 3. P.469 – 472.
 16. *Овсяников В.В., Свиначенко Д.Н., Безносова Е.Р., Цыпко Л.З.* Методы расчета произвольно изогнутых антенн с комплексными и реактивными нагрузками // Радиопизика и электроника. Харьков. Ж. ИРЭ НАН Украины. 2018. Т.9, № 4. С. 58 – 73.
 17. *Ovsyanikov V.V., Svyachenko D.M., Beznosova E.R., Tsipko L.Z.* Approximate and strict methods for the calculation of rode angle antennas of microwave range // Journal of Physics and Electronics Vol. 26 (1), 2018. P. 83-88.
 18. *Овсяников В.В.* К расчету электродинамических характеристик проволочных телекоммуникационных антенн с импедансными элементами // Изв. Вузов Радиоэлектроника. НТУУ «КПИ», Киев. 2007, №73. С. 51-59.
 19. *Овсяников В.В.* Расчет петлевых антенн с реактивными нагрузками // Радиопизика и электроника. Харьков. Сб. научных трудов ИРЭ НАН Украины. 2000. Т. 5, №1. С. 61-63.
 20. *Wen Mingming, Liu Chang, Panchenko A.Yu, Slipchenko N.I.* Evaluation of influence of microwave radiation sensor in the form of an open end of the coaxial line on its metrological characteristics. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2015, vol. 74(15), pp. 1355-1366. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v74.i15
 21. *An integral equation for the field distribution within the aperture plane of the coaxial sensor / Ch. Lu, A.Yu. Panchenko, Mykola I. Slipchenko / Telecommunications and Radio Engineering*. Том 75, 2016. Вып. 7. P.587-594. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v75.i7.20
 22. *Analysis of the properties of the integral equation for the field distribution across the aperture of a coaxial sensor / Ch. Liu, A.Yu. Panchenko, Mykola I. Slipchenko / Telecommunications and Radio Engineering / Том 75, 2016 Выпуск 11 P. 969-977. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v75.i11.20*
 23. *Повышение точности теоретической калибровки и информативности четвертьволновых резонаторных датчиков для СВЧ диагностики / А.Ю. Панченко, Н.И. Слипенченко, А.Н. Бородкина / Радиоэлектроника и информатика, 2014, №2. С. 8-14.*
 24. *Коаксиальный сенсор открытого типа. Интегральное уравнение электрического поля в плоскости апертуры / Л. Чан, А.Ю. Панченко, Н.И. Слипенченко, О.Б. Зайченко // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапартобудування. Вип. 69. 2017. С. 11-16.*
 25. *Панченко А.Ю.* Повышение точности теоретической калибровки и информативности четвертьволновых резонаторных датчиков для СВЧ диагностики / А.Ю.Панченко, Н.И. Слипенченко, А.Н. Бородкина. // Радиоэлектроника и информатика. 2014. №2. С. 8-14.
 26. *Borodkina A.N.* On the development of a practical technique of theoretical calibration of resonant sensors for near-field microwave diagnostics / A.Yu. Panchenko, N.I. Slipchenko, A.N. Borodkina // Telecommunication and Radio Engineering. 2014. №73(15). P.1397-1407. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v73.i15.80.
 27. *Бондаренко И.Н.* Оценка осевой разрешающей способности СВЧ сенсора для исследований биологических объектов / И.Н. Бондаренко, Н.А. Мамедова, А.Ю. Панченко, И.Н. Светличная // Радиоэлектроника и информатика. 2018. №4. С. 20-25.
 28. *Tai C.T.* Dyadic Green's functions for a coaxial line. *IEEE Trans. of Antennas and Propagation*, 1983. Vol. 48, No. 2, pp. 355–358.
 29. *Панченко Б.А.* Тензорные функции Грина уравнений Максвелла для цилиндрических областей *Радиотехника: Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник*. 1970. Вып. 15, С. 82-91.
- Транслитерированный список литературы:**
1. *Khmyrov B.E.* The AUREOL-3 satellite / B.E. Khmyrov, S.S. Kavelin, A.M. Popel, V.S. Varyvdin, K.V. Rodin, V.V. Ovsyanikov // *Annales de geophysique*, Paris 1982. 38, N 5. P. 547-556.
 2. *Ovsyanikov V. V.* E`lektricheski maly`e shty`revy`e anteny` dlya radiosistem kosmicheskoy i aviacionnoy tekhniki // *Zhurn. Izv. VUZ-ov. Radioe`lektronika*. Kiev. 2010. Т 53, №3. С 13 – 25.
 3. *Ovsyanikov V.V., Kryukov A.V.* Malogabaritnaya spiral`naya konicheskaya antenna dlya sputnikovy`kh sistem // *Zhurn. Izv. VUZ-ov. Radioe`lektronika*. Kiev - 2005. Т 48, № 10. С. 59 – 64.
 4. *Slyusar V.I.* Perspektivny`e tekhnologii anteny`kh reshetok mobil`ny`kh terminalov sputnikovoy svyazi. *Tekhnologii i sredstva svyazi*. 2014. № 4, С.64 – 68.
 5. *Ovsyanikov V.V.* Sostoyanie razrabotok vibratory`kh, di-e`lektricheskikh i plazmenny`kh anten v kontekste istoriche-skogo razvitiya antennoj tekhniki // *Radiofizika i e`lektro-nika. IRE` NAN Ukrainy`*. 2016. Т. 7 (21), №3. С. 58-73.
 6. *Kolomoitsev F.I.* The use of capacitive elements to increase the broadband of curved vibrators / F.I. Kolomoitsev, V.S. Varyvdin, V.V. Ovsyanikov // *Radio engineering and electronics*, 1972. Vol. XVII, No. 11. P.2429-2432.
 7. *Ovsyanikov V.V., Reuta O.V., Beznosova E.R.* Analiz i op-timizaciya dvukhchastotnogo turniketnogo izluchatelya s impedansny`mi e`lementami v vetvyakh. *Radiofizika i e`lektro-nika*. Khar`kov: Sb. nauchn. trudov IRE` NAN Ukrainy`. 2002. Т. 7, Specz. vy`p. С.285-287.
 8. *Galischuk A.A., Maslyey V.M., Olshesky O.L., Romanenko E.D.* and all. / Variants of the double - frequency GPS antennas.// 2017 XI Intern.Conf. (ICATT), Kyiv, Ukraine, P. 202 – 205.
 9. *Ovsyanikov V. V., Beznosova E.R.* Shirokopolosny`e anteny` i anteny`e reshetki s reaktivny`mi nagruzkami. // *Radi`ofi`zika ta elektroni`ka*. Khar`k`v. Zh. I`RE NAN Ukrayini. 2018. Т.23, № 2. С. 9 – 21.
 10. *Ovsyanikov V.V.* Issledovanie shirokopolosnoj vibratory`kh antennoj reshetki krugovoy polyarizaczii // *Radiofizika i radioastronomiya, NAN Ukrainy`*. Khar`kov. 1999. Т.4, № 4. С. 349 - 356.2750.
 11. *Ovsyanikov V.V., Svyachenko D.M., Beznosova E.R., Tsipko L.Z.* Two-band antennas microwave range of waves // ISSN 2616-8685. *Journ. of Phys. and Electronics*. Vol. 27 (1), 2019. P. 95-100.
 12. *Ovsyanikov V.V., Morozov V.V., Beznosova E.R., Tsypko L.Z., Gorobets N.N.* Broadband antennas with reactive loads // 9th International Conference UWBUSIS'18. Sept 4-7 2018. Odessa, Ukraine, P. 353-356.
 13. *Ovsyanikov V.V., Smirnov S.A., Ol'shevs`kiy O.L., Popel` V.M., Rodin K.V., Romanenko Y.D.* Wideband antenna array of circular and linear polarization // *Proc. of*

- the Int. Conf. UWBUSIS' 08. Sevastopol, Ukraine. 2008. P. 55-58.
14. *Ovsyanikov V.V.* E'lektricheski maly'e vibratorny'e, spi-ral'ny'e i petlevy'e anteny // Radiofizika i e'lektronika. Khar'kov. Zh. IRE' NAN Ukrainy'. 2017. T.8 (22), № 1. C. 57 – 67.
15. *Krjukov A., Ovsyanikov V.* The antennas for Mobile Radio Communications // 31st European Microwave Conference. London 2001. Vol. 3. P.469 – 472.
16. *Ovsyanikov V.V., Svinarenko D.N., Beznosova E.R., Czy'pko L.Z.* Metody' rascheta proizvol'no izognuty'kh anten s kompleksny'mi i reaktivny'mi nagruzkami // Radiofizika i e'lektronika. Khar'kov. Zh. IRE' NAN Ukrainy'. 2018. T.9, № 4. C. 58 – 73.
17. *Ovsyanikov V.V., Svinarenko D.M., Beznosova E.R., Tsipko L.Z.* Approximate and strict methods for the calculation of rode angle antennas of microwave range // Journal of Physics and Electronics. 2018. Vol. 26 (1). P. 83-88.
18. *Ovsyanikov V.V.* K raschetu e'lektrodinamicheskikh kharak-teristik provolochny'kh telekommunikacionny'kh anten s impedansny'mi e'lementami // Izv. Vuzov Radioe'lektronika. NTUU «KPI», Kiev. 2007, №73. C. 51-59.
19. *Ovsyanikov V.V.* Raschet petlevy'kh anten s reaktivny'mi nagruzkami // Radiofizika i e'lektronika. Khar'kov. Sb. nauchny'kh trudov IRE' NAN Ukrainy'. 2000. T. 5, №1. C. 61-63.
20. *Wen Mingming, Liu Chang, Panchenko A.Yu, Slipchenko N.I.* Evaluation of influence of microwave radiation sensor in the form of an open end of the coaxial line on its metrological characteristics. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2015, vol. 74(15), pp. 1355-1366. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v74.i15.
21. *An integral equation for the field distribution within the aperture plane of the coaxial sensor / Ch. Lu, A.Yu. Panchenko, Mykola I. Slipchenko / Telecommunications and Radio Engineering. Том 75, 2016 Выпуск 7 P.587-594. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v75.i7 20*
22. *Analysis of the properties of the integral equation for the field distribution across the aperture of a coaxial sensor / Ch. Liu, A.Yu. Panchenko, Mykola I. Slipchenko / Telecommunications and Radio Engineering. 2016. Том 75, Вып. 11. P. 969-977. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v75.i11.20*
23. *Povy'shenie tochnosti teoreticheskoy kalibrovki i informativnosti chetvert'volnovy'kh rezonatorny'kh datchikov dlya SVCh diagnostiki /A.Yu. Panchenko, N.I Slipchenko, A.N. Borodkina / Radioe'lektronika i informatika. 2014. №2. C. 8-14.*
24. *Koaksial'ny'j sensor otkry'togo tipa. Integral'noe uravnenie e'lektricheskogo polya v ploskosti apertury' / L. Chan, A.Yu. Panchenko, N.I. Slipchenko, O.B. Zajchenko // Vi'snik NTUU «KPI». Seri'ya Radi'otekhnika. Radi'opartobudovannya. Vy'p.69. 2017. C. 11-16.*
25. *Panchenko A.Yu. Povy'shenie tochnosti teoreticheskoy kalibrovki i informativnosti chetvert'volnovy'kh rezonatorny'kh datchikov dlya SVCh diagnostiki / A.Yu.Panchenko, N.I. Slipchenko, A.N. Borodkina. // Radioe'lektronika i informatika. 2014. №2. C. 8-14.*
26. *Borodkina A.N.* On the development of a practical technique of theoretical calibration of resonant sensors for near-field microwave diagnostics / A.Yu. Panchenko, N.I. Slipchenko, A.N Borodkina // Telecommunication and Radio Engineering. 2014. №73(15). P.1397-1407. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v73.i15.80
27. *Bondarenko I.N.* Ocenka osevoj razreshayushhej sposobnosti SVCh sensora dlya issledovaniy biologicheskikh ob'ektov / I.N. Bondarenko, N.A. Mamedova, A.Yu. Panchenko, I.N. Svetlichnaya // Radioe'lektronika i informatika. 2018. №4. C. 20-25.
28. *Tai C.T.* Dyadic Green's functions for a coaxial line. *IEEE Trans. of Antennas and Propagation*. 1983. Vol. 48, No. 2. P. 355–358.
29. *Panchenko B.A.* Tenzorny'e funkczii Grina uravnenij Maksvella dlya czilindricheskikh oblastej Radiotekhnika: Vseukrainskij mezhdedomstvenny'j nauchno-tekhnicheskij sbornik. 1970. Vy'p. 15. C. 82-91.
- Поступила в редколлегию 25.10.2019
- Рецензент:** д-р физ.-мат. наук, проф. Бондаренко И.Н.
- Ибраимов Ильвер Казимович**, аспирант кафедры проектирования и эксплуатации электронных аппаратов ХНУРЭ. Научные интересы: электродинамика, акустика атмосферы. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Науки, 14, тел. 7021494.
- Овсяник Виктор Владимирович**, д-р техн. наук, профессор факультету физики, электроники и компьютерных систем Днепровский национальный университет им. Олесь Гончара. Научные интересы: электродинамика, антенны космических аппаратов. Адрес: Украина, 49010, Днепр, пр. Гагарина, 72, тел. (056) 374-98-01, 373-12-63.
- Панченко Александр Юрьевич**, д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой проектирования и эксплуатации электронных аппаратов ХНУРЭ. Научные интересы: электродинамика, акустика атмосферы. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Науки, 14, тел. раб. 7021494.
- Кравец Николай Владимирович**, аспирант кафедры проектирования и эксплуатации электронных аппаратов ХНУРЭ. Научные интересы: электродинамика, резонансные системы. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Науки, 14, тел. 7021494.
- Iver Ibraimov**, Post graduate student, Department of Design and Operation of Electronic Devices, Kharkov National University of Radio Electronics. Scientific interests: electrodynamics, atmospheric acoustics. Address: Ukraine, 61166, Kharkiv, Nauka Ave., 14, Phone/fax: +380577021494.
- Ovsyanikov Viktor Vladimirovich**, Dr of Techn. Sc., Professor at the Faculty of Physics, Electronics and Computer Systems Dneprov National University. Olesya Gonchar. His research interests are electrodynamics, spacecraft antennas. Address: Ukraine, 49010, Dnipro, 72 Gagarin Ave., (056) 374-98-01, 373-12-63.
- Alexander Panchenko**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Design and Operation of Electronic Devices, Kharkov National University of Radio Electronics. Scientific interests: electrodynamics, atmospheric acoustics. Address: Ukraine, 61166, Kharkiv, Nauka Ave., 14, e-mail: oleksandr.panchenko@nure.ua
- Kravec Nikolaj Vladimirovich** Post graduate student of the Department of Design and Operation of Electronic Devices of the Kharkov National University of Radio Electronics. Scientific interests: electrodynamics, atmospheric acoustics. Address: Ukraine, 61166, Kharkiv, Nauka Ave., 14, Phone/fax: +380577021494.