

ВИБРАТОРНАЯ АНТЕННА С ЭЛЛИПТИЧЕСКОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ РАДИОСИСТЕМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

В.Д. Двуреченский,
П.П. Телепнев, А.Ю. Федотов
(ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

Методами электродинамического моделирования обоснована возможность оптимизации коэффициента эллиптичности вибраторных антенн с эллиптической поляризацией. Такие антенны используются в информационных радиосистемах ДМ-диапазона волн КА «Канопус-В» и Белорусского космического аппарата.

Ключевые слова: космический аппарат, вибраторная антенна, эллиптическая поляризация.

В состав бортового антенно-фидерного устройства телекомандных радиосистем ДМ-диапазона волн космических аппаратов (КА), таких как «Канопус-В» и Белорусский космический аппарат (БКА) входит вибраторная антенна с эллиптической поляризацией [1, 2]. Антенна состоит из двух перпендикулярно расположенных относительно друг друга симметричных вибраторов, в которых возбуждаются токи I_1 и I_2 , соответственно, сдвинутых по фазе на $\pi/2$. Вибраторы располагаются над металлическим диском на высоте H . В этом случае вибраторная антенна излучает электромагнитную волну с эллиптической поляризацией, характеризующейся коэффициентом поляризации $\nu(\theta)$, который может принимать значение от 0 (линейная поляризация) до 1 (круговая поляризация) в зависимости от угла наблюдения θ , отсчитываемого от нормали к диску.

Характер зависимости $\nu(\theta)$ определяется конструктивными параметрами антенны и характеристиками системы возбуждения антенны.

В настоящей статье представлены результаты оптимизации методами электродинамического модели-

рования конструкции и способа возбуждения антенны для достижения значений $\nu(\theta)$, обеспечивающих эффективное функционирование телекомандных радиосистем КА ДМ-диапазона длин волн.

Методы электромагнитного моделирования широко используются при разработках в частности антенно-фидерных устройств. Они позволяют значительно сократить время и затраты на создание новых устройств за счёт замены дорогостоящих и длительных экспериментальных исследований на быстродействующие и точные численные способы исследования конструктивных параметров и электрических характеристик создаваемого устройства.

Для определения потенциально достижимых значений $\nu(\theta)$ в секторе углов $(-70^\circ, +70^\circ)$ была исследована антенна в виде двух скрещенных под прямым углом симметричных вибраторов, расположенных над металлическим диском (рис.1).

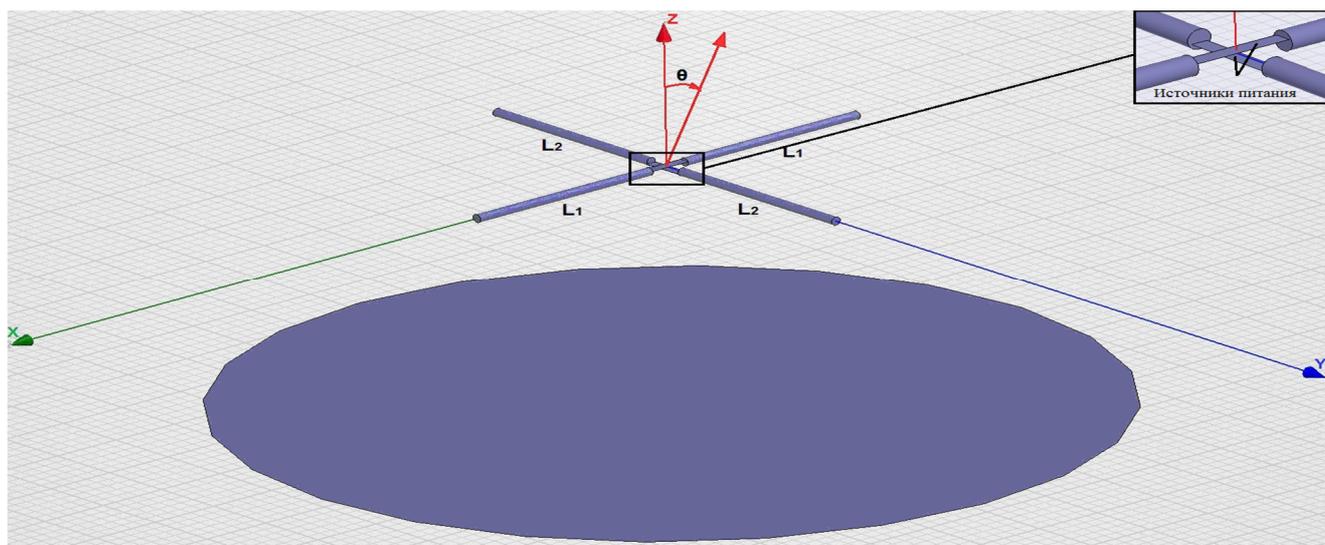


Рис. 1. Симметричные вибраторы, расположенные над металлическим диском

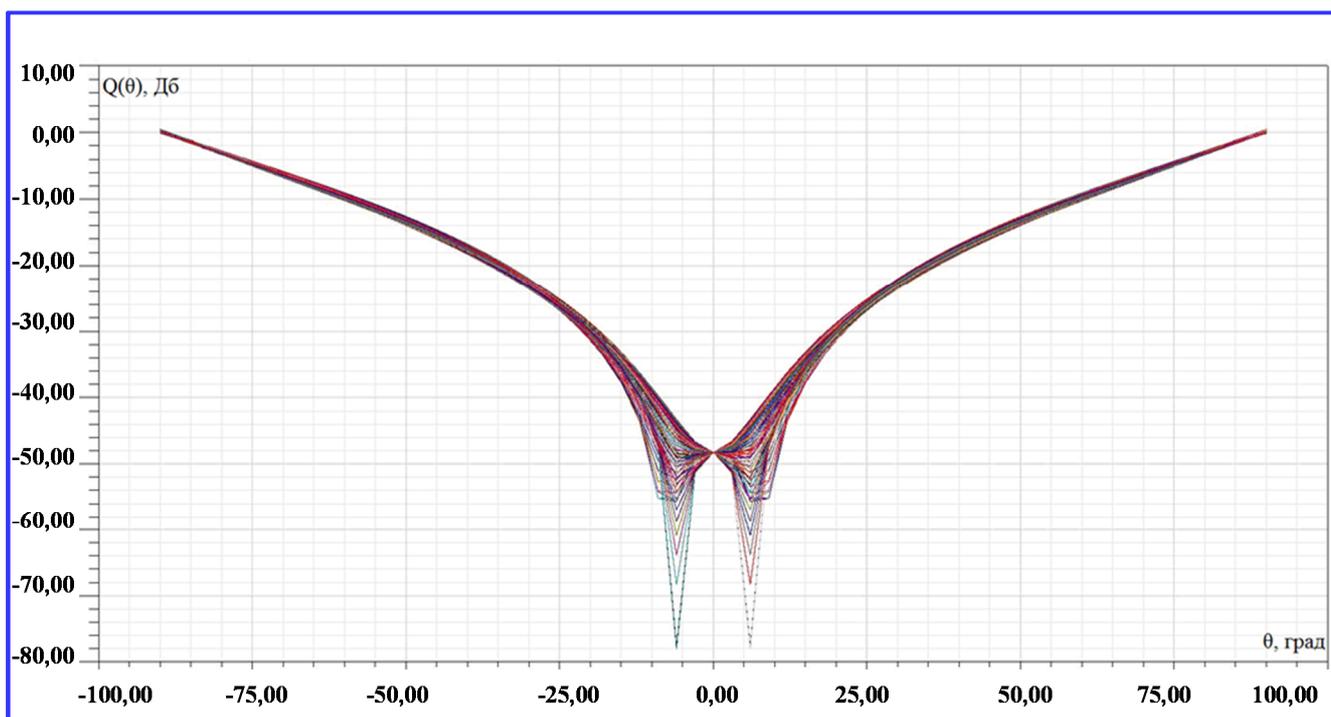


Рис. 2. Значения зависимости отношения уровня электрической составляющей электромагнитной волны с паразитной эллиптической поляризацией к уровню электрической составляющей электромагнитной волны с полезной эллиптической поляризацией $Q(\theta)$ (Дб) в плоскостях $\phi = n \cdot 10^\circ$ (где $n = 0 \div 17$) от угла θ

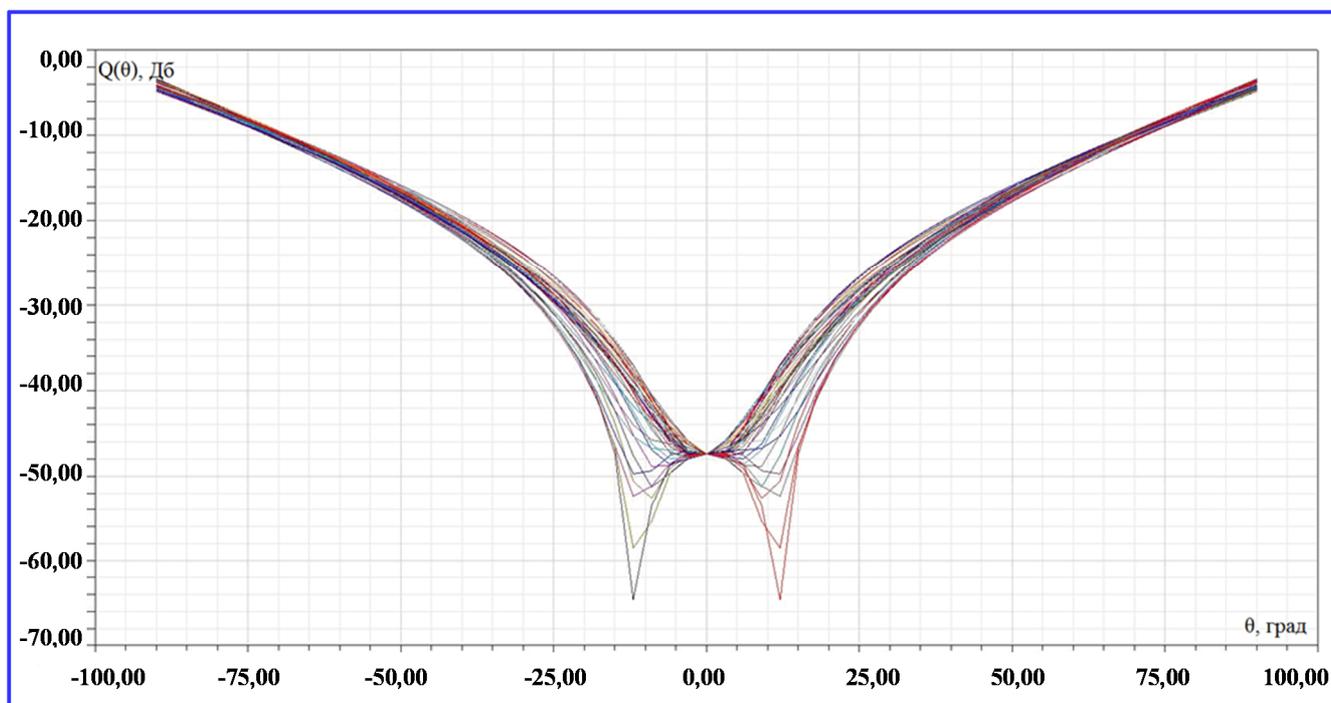


Рис. 3. Расчётные зависимости $Q(\theta)$ для $\phi = n \cdot 10^\circ$, ($n = 0 \div 17$) при наклоне плеч вибраторов 45° от угла θ

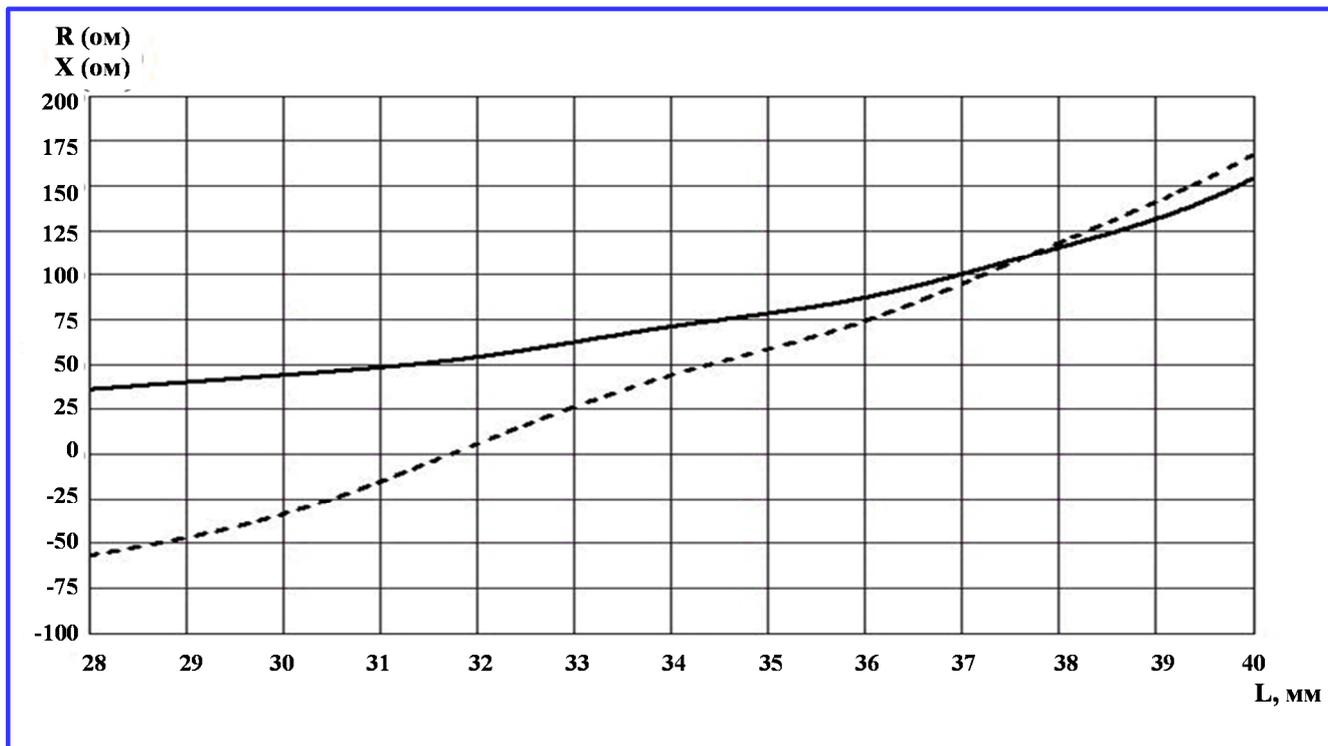


Рис. 4. Зависимость изменения входного сопротивления симметричного вибратора $Z=R+jX$ от длины его плеч (наклон плеч 45° по отношению к экрану, $a_1=a_2=1,5$ мм)

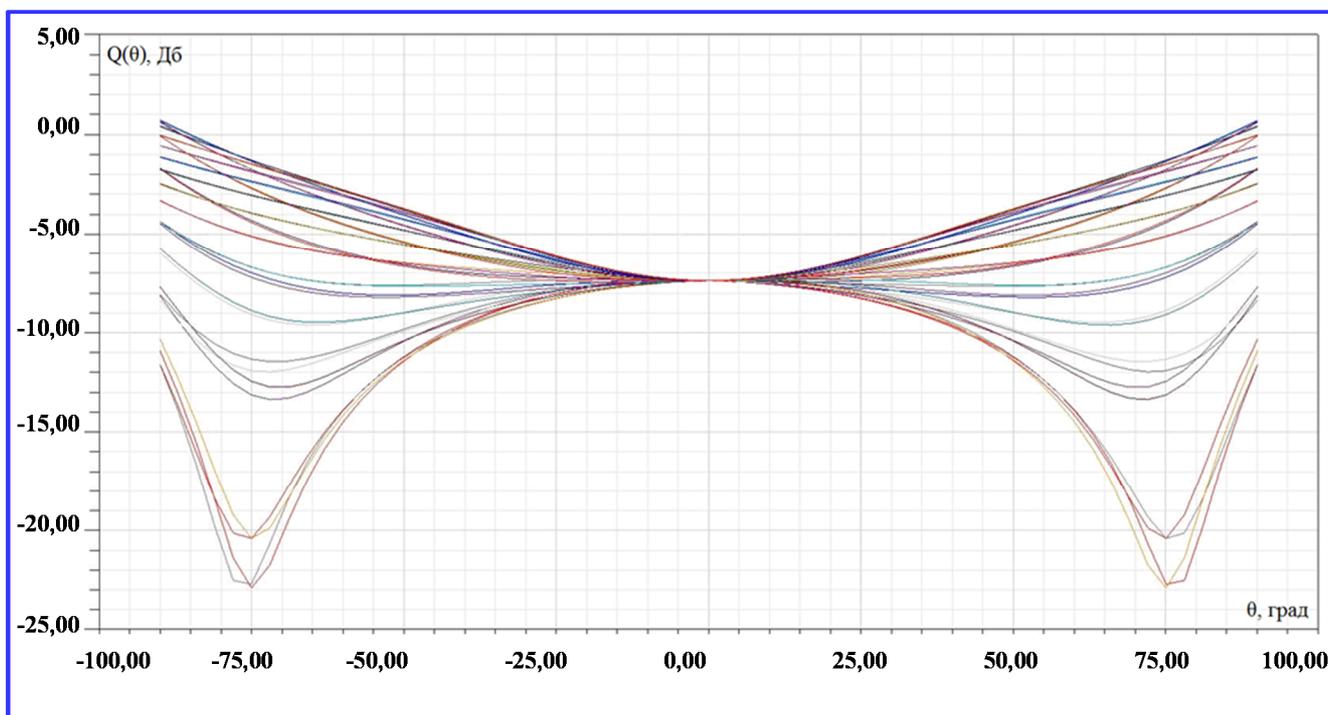


Рис. 5. Зависимость $Q(\theta)$ от угла θ ($F=2000$ МГц, $L_1=46$ мм, $L_2=32$ мм, $a_1=2$ мм, $a_2=2$ мм)

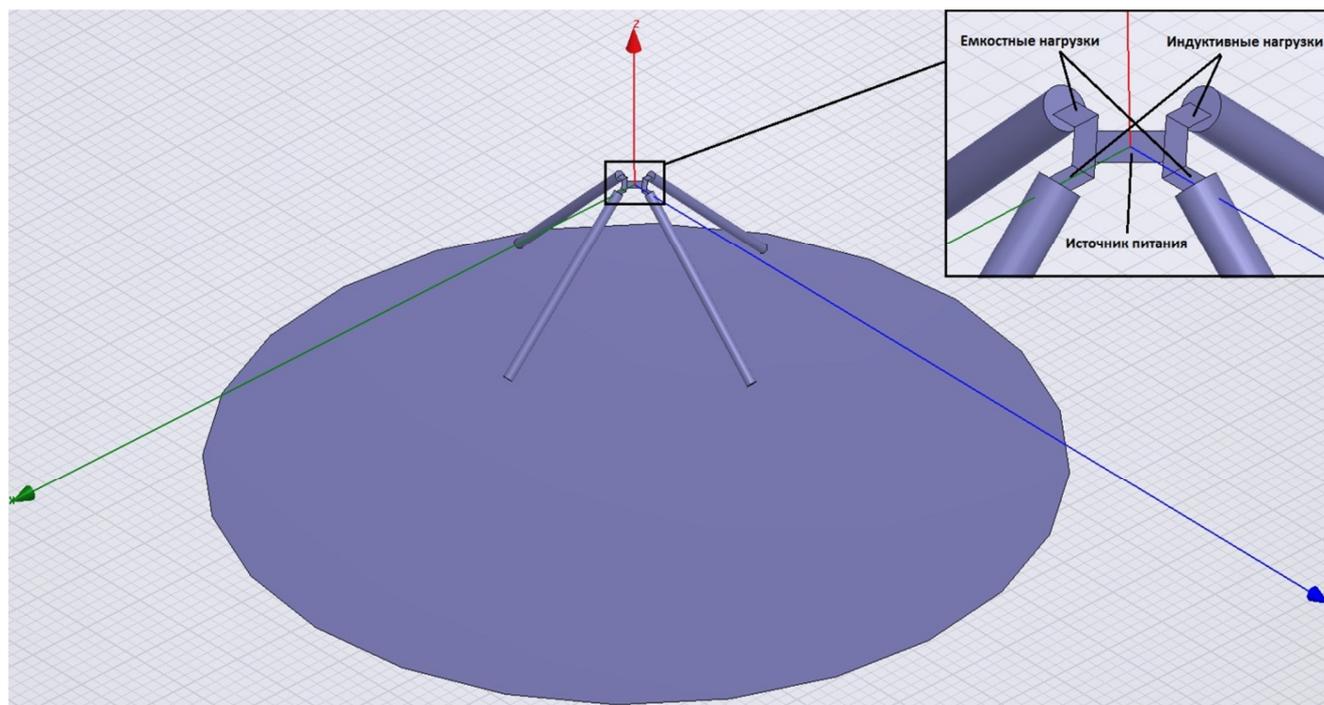


Рис. 6. Вибраторы одинаковой длины с включёнными в плечи соответствующими реактивными нагрузками и одним источником питания

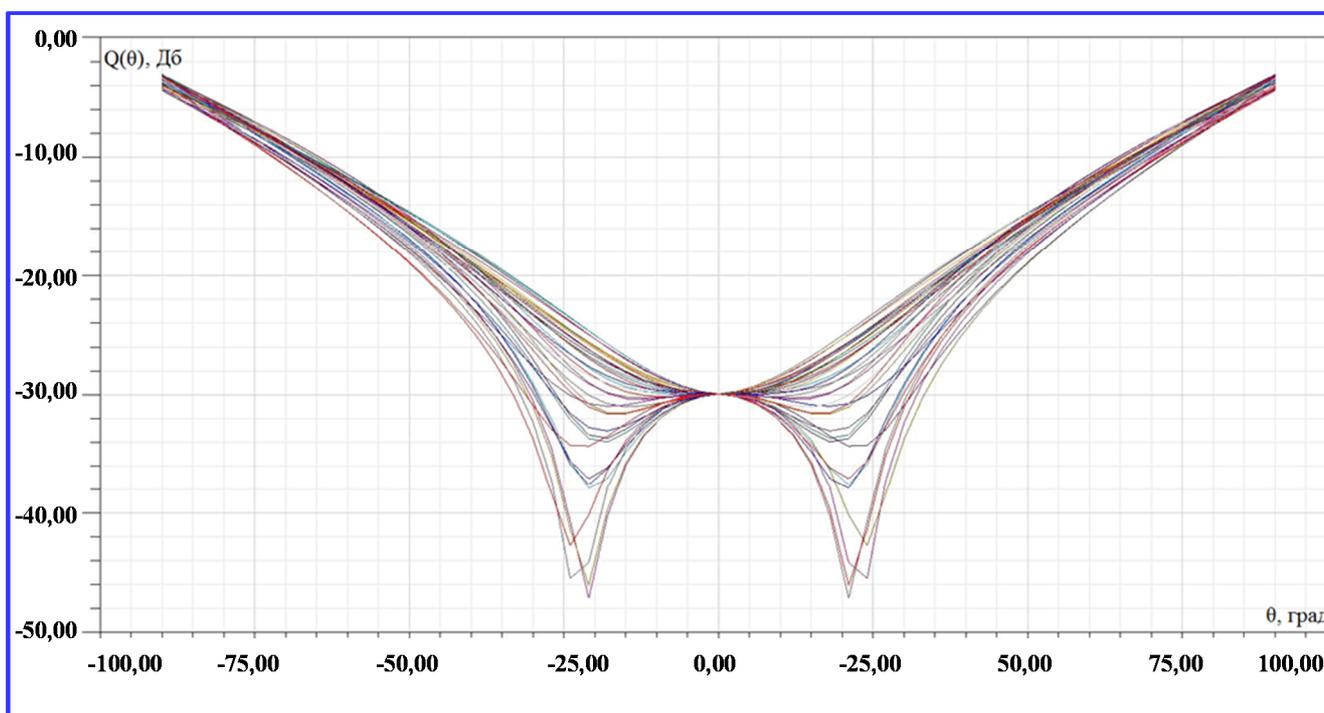


Рис. 7. Расчётные зависимости $Q(\theta)$ от угла θ при возбуждении вибраторов одним источником $U=1$ В при $L_1=L_2=29,5$ мм и включении в плечи одного вибратора ёмкости 4,25 пФ и в плечи другого вибратора индуктивностей 2,4 нГн

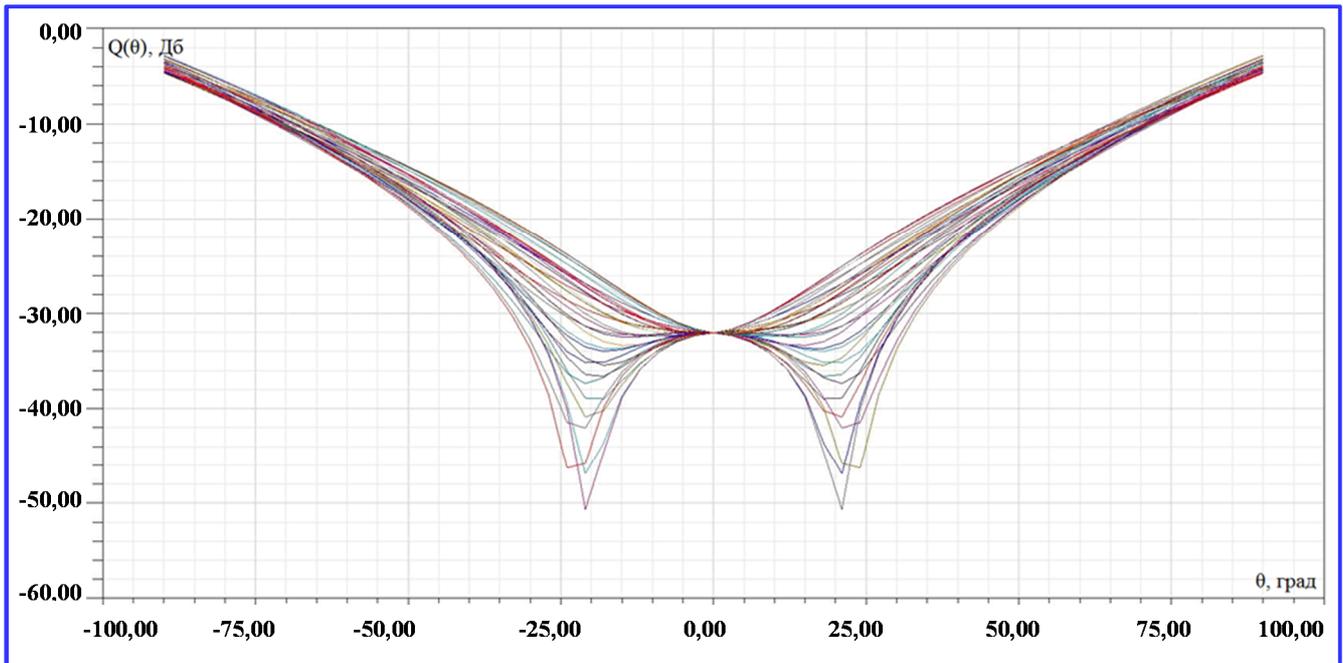


Рис. 8. Расчётные зависимости $Q(\theta)$ от угла θ при $f=2035$ МГц ($\lambda=147$ мм), $L_1=L_2=29,5$ мм, $2a=1,5$ мм, $H=37,5$ мм, $D=120$ мм

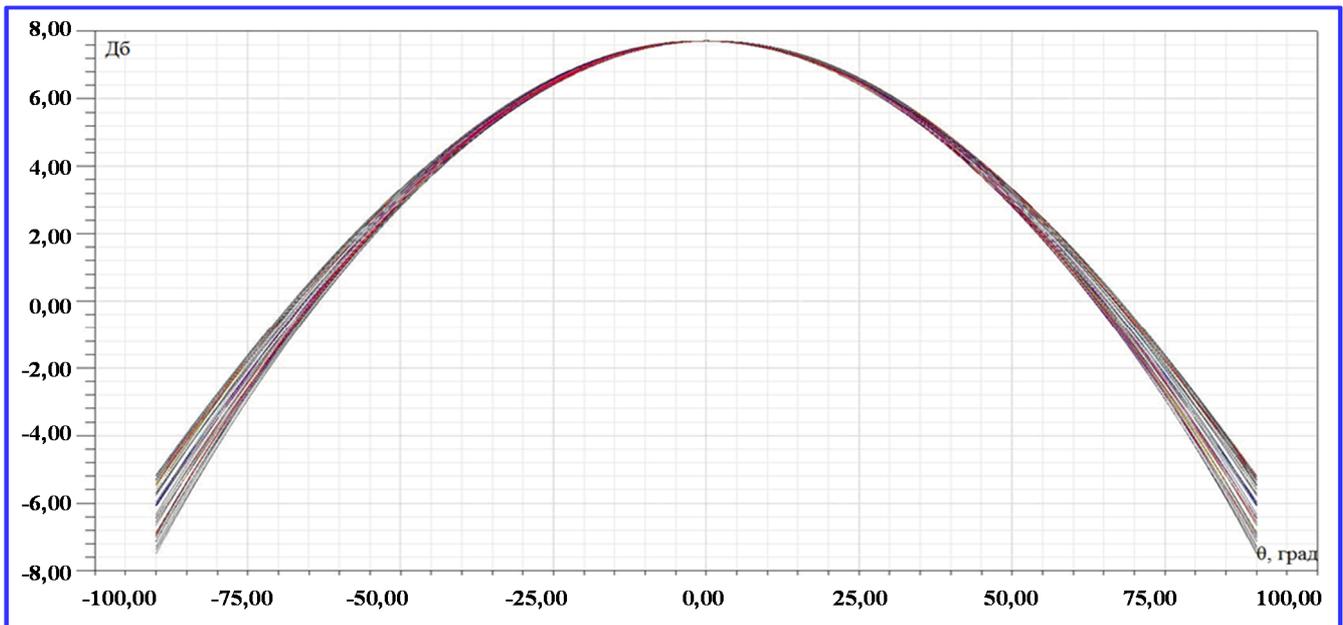


Рис. 9. Ненормированные ДН антенны в плоскостях $\varphi=n \cdot 10^\circ$, где $n=0 \div 17$

Исходными данными для расчёта электрических характеристик модели были: рабочая частота $f=2035$ МГц, длина плеч вибраторов $L_1=L_2=29,5$ мм, диаметр вибраторов $2a=1,5$ мм, высота подвеса вибраторов над диском $H=45$ мм, диаметр диска $D=120$ мм. Вибраторы возбуждались отдельными источниками с напряжением $U_1=1$ В и

$U_2=e^{j\pi/2}$ соответственно. На рис. 2 представлены значения отношения уровня электрической составляющей электромагнитной волны с паразитной эллиптической поляризацией к уровню электрической составляющей электромагнитной волны с полезной эллиптической поляризацией $Q(\theta)$ (Дб) в плоскостях $\varphi=n \cdot 10^\circ$, где $n=0 \div 17$.

Величина Q связана с коэффициентом поляризации v следующим образом $v = \text{th}(-0,0576Q)$. Из рис. 2 следует, что коэффициент эллиптичности $v \geq 0,5$ антенна обеспечивает в секторе углов $(-60^\circ, +60^\circ)$. Как показали результаты расчётов модели сектор углов θ , в котором $v \geq 0,5$, можно увеличить путём наклона плеч вибраторов к плоскости металлического диска. Установлено, что оптимальный угол наклона равен 45° . На рис. 3 изображены расчётные зависимости $v(\theta)$ для $\varphi = n \cdot 10^\circ$, ($n=0 \div 17$) при наклоне плеч вибраторов 45° . Из рисунка следует, что сектор углов θ , где $v(\theta) \geq 0,5$ расширился до $(-68^\circ, +68^\circ)$. В антеннах, расположенных на КА «Канопус-В» и БКА, схема возбуждения вибраторов реализована с учётом зависимости характера реактивной части входного сопротивления симметричного вибратора от длины его плеч [3]. На рис. 4 показаны зависимости изменения входного сопротивления симметричного вибратора $Z=R+jX$ (где R – активная составляющая входного сопротивления, а X – реактивная составляющая входного сопротивления) от длины его плеч (наклон плеч 45° по отношению к экрану $a_1=a_2=1,5$ мм).

Из графиков следует, если $L_1 \leq 32$ мм, $Z_1=R_1-jX_1$ (входное сопротивление имеет ёмкостной характер), то при $L_2 \geq 32$ мм, $Z_2=R_2+jX_2$ (входное сопротивление имеет индуктивный характер). Действительно, при $L_1=38$ мм $Z_1=114+j114$, а при $L_2=28,8$ мм $Z_2=34-j34$. Следовательно, токи в вибраторах, определяемые по формуле $I_n=U/Z_n$ (где $n=1, 2$) не равны по амплитуде, но сдвинуты по фазе на $\pi/2$ относительно друг друга. Так как в этом случае $I_1/I_2=0,38$, то $v(\theta)$ хуже оптимальных значений.

Этот факт подтверждают расчётные данные, представленные на (рис. 5), из которого следует, что в некоторых плоскостях $\varphi = \text{const}$ $v(\theta) \leq 0,5$.

Для устранения этого недостатка предлагается использовать вибраторы с одинаковыми плечами, для реализации фазового сдвига $\pi/2$ между фазами токов на входах вибраторов нужно включить соответствующие реактивные нагрузки (рис. 6).

Так плечи вибраторов попарно объединены для возбуждения антенны от одного источника $U=1$ В, то в плечи первого вибратора включены ёмкостные нагрузки $-jX_c$, а в плечи второго вибратора включены индуктивные нагрузки jX_L . Величины X_c и X_L выбраны таким образом, что $X_c - X = R$, где $R+jX$ входное сопротивление вибратора без нагрузок. В этом случае

$I_1=I_0 e^{+j\pi/4}$, $I_2=I_0 e^{-j\pi/4}$, $I_0=\sqrt{2} \cdot (U/R)$ т. е. имеет место равенство $v(0)=1$ (максимально достижимое).

На рис. 7 представлены расчётные зависимости $Q(\theta)$ при возбуждении вибраторов одним источником $U=1$ В при $L_1=L_2=29,5$ мм и включении в плечи одного вибратора ёмкости 4,25 пФ и в плечи другого вибратора индуктивностей 2,4 нГн.

Из рисунка следует, что при такой конструкции и способе возбуждения практически реализуется потенциально возможное значение $v(\theta)$ (см. рис. 2)

Для упрощения конструкции предлагается использовать симметричные вибраторы, у которых конструктивные параметры ($L, 2a, H$) таковы, что $Z=R \pm j|X|$ и $R=X$. В этом случае достаточно в каждое плечо одного из вибраторов включить реактивные нагрузки $X_H = -0,5X$, чтобы обеспечить выполнение равенств $Z_1=R-jR$, $Z_2=R+jR$, необходимое условие реализации оптимальных значений $v(\theta)$.

При этом, если $X > 0$, то $X_H < 0$ (ёмкостная нагрузка), а при $X < 0$ нагрузка $X_H > 0$ (индуктивная нагрузка). На рис. 8 показаны расчётные данные $Q(\theta)$ для: $f=2035$ МГц ($\lambda=147$ мм) $L_1=L_2=29,5$ мм, $2a=1,5$ мм, $H=37,5$ мм, $D=120$ мм. Так как в этом случае $Z=39-j39$, то $X_H=39$, а индуктивность реализующая $X_H=3,1$ нГн. Из рисунка следует, что $v(\theta) \geq 0,5$ в диапазоне углов θ $(-67^\circ, +67^\circ)$. На рис. 9 для справки приведены ненормированные ДН (диаграммы направленности) антенны в плоскостях $\varphi = n \cdot 10^\circ$ где $n=0 \div 17$. Представленные выше результаты исследований вибраторных антенн с эллиптической поляризацией подтверждают возможность практической реализации эффективных вибраторных антенн с потенциально достижимым значением коэффициента эллиптичности, что необходимо для создания перспективных радиосистем передачи информации в ДМ-диапазоне радиоволн космических аппаратов типа «Канопус-В».

Литература

1. Дабкин А. Л., Зузенко В. Л., Кислов А. Г. Антенно-фидерные устройства. – М.: Сов. радио, 1974. – 536 с.
2. Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн: Учебник для вузов / Г. А. Ерохин, О. В. Чернышев, Н. Д. Козырев, В. Г. Кожевнический; под. ред. Г. А. Ерохина. – 3-е изд. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 491 с.
3. Микроволновые устройства телекоммуникационных систем / М. З. Згуровский, М. Е. Ильченко, С. А. Кравчук и др.: В 2 т. – К.: ИВЦ «Видавництво «Політехніка», 2003.

Поступила в редакцию 05.11.2013

Виктор Дмитриевич Деуреченский, д-р техн. наук, вед. научн. сотрудник,
Павел Петрович Теленев, мл. научн. сотрудник.
Александр Юрьевич Федотов, д-р техн. наук, начальник лаборатории.
 E-mail: vniiem@vniiem.ru, т. (495) 366-27-55.