

**РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМЕННЫХ И  
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ АНТЕНН, УСТАНОВЛЕННЫХ НА  
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ И КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТАХ**

*Овсяников В.В.<sup>1</sup>, д.т.н., профессор, Мороз С.Н.<sup>2</sup>, аспирант*

*<sup>1</sup>Днепропетровский национальный университет*

*им. О. Гончара, Украина*

*<sup>2</sup>Государственное ВУЗ «Национальный горный университет»,*

*г. Днепропетровск, Украина*

В настоящее время размеры подвижных наземных, космических и воздушных средств и других мобильных объектов становятся соизмеримыми с рабочей длиной излучаемой (принимаемой) электромагнитной (ЭМ) волны устанавливаемой на них микроволновой приемопередающей аппаратуры и антенн. В основном это антенны систем радио телекоммуникаций, выполняющие функции ретрансляции пакетов информации, передачи телеметрической и научной информации, служащие для приема команд управления, приема или передачи навигационной информации и т. п. В связи с соизмеримостью длины рабочей волны антенн с размерами данных мобильных объектов, излучаемые или принимаемые антенной электромагнитные волны активно дифрагируют с корпусом мобильного объекта. Это оказывает влияние на электрические характеристики антенн, включая их входные сопротивления и коэффициент бегущей волны по напряжению (КСВН), форму диаграммы направленности (ДН), коэффициент усиления антенны (КУ), КПД и другие. Оценкам влияния формы объекта на радиотехнические (РТ) характеристики был посвящен ряд работ, например, [1-3]. Для исследования ЭМ поля вокруг данного объекта в них применяется метод интегрального уравнения для тока, после чего интегральное уравнение дискретизируется по поверхности объекта и представляется в виде суммы сегментов, на которые условно делится объект и антенна. Затем матричным методом решается уравнение относительно комплексных поверхностных токов на каждом сегменте и обычным методом выполняется расчет диаграммы излучения рассматриваемой системы антенна – поверхность объекта. Однако, при расчетах данными методами задача идеализируется и упрощается и не учитывается влияние ряда важных элементов мобильного объекта, на котором установлена антенна, например, крыльев летательных аппаратов (ЛА), солнечных панелей и других элементов космических аппаратов (КА).

В данной работе исследованы РТ характеристики антенн (КСВН, ДН, КУ, КПД), установленных в разных местах ЛА и КА и их фрагментах в

программной среде FEKO компании EMSS, что позволяет проводить на более высоком уровне, чем в [1-3] объемное моделирование сложных излучающих структур. При создании данного программного обеспечения как известно также применялся метод интегрального уравнения и метод моментов в совокупности с методами физической оптики, что позволяет выполнять расчеты антенных систем в присутствии металлических объектов сложной геометрической формы. В работе приведены сравнительные характеристики антенн, установленных на мобильных объектах выполненных из металла и на основе холодной плазмы газового разряда, в дальнейшем называемых плазменными антеннами (ПА). Исследовано влияние паров ртути, вводимых обычно в ПА для облегчения создания газового разряда [4], которые в разной степени изменяют проводимость и диэлектрическую проницаемость среды ПА.

### **Проводимость и диэлектрическая проницаемость исследуемых антенн**

Для ввода исходных данных в программную среду FEKO необходимо знать, кроме конфигурации антенн и мобильного объекта, внутренние электрофизические характеристики антенны. Если антенна выполнена из немагнитного металла с высокой удельной проводимостью (УП) и диэлектрической проницаемостью (ДП) близкой к ДП окружающей среды, например, алюминия, меди, латуни и т.п., можно с небольшой погрешностью задавать в программу расчета соответствующее значение УП данного металла по справочным данным, а относительное значение ДП приблизительно равным 1. Если антенна более сложной конструкции, например, создана из холодной плазмы газового разряда, искусственно получаемой в диэлектрической трубке, в литературе имеются методы расчета ее проводимости и ДП, например, в классической работе В. Л. Гинзбурга [5]. Однако в этой и других известных нам работах не учтены УП и ДП ПА с учетом вводимых внутрь плазменной трубки паров ртути [6]. Ртуть является проводником и присутствующие в холодной плазме ее пары будут увеличивать проводимость и мнимую часть ДП по сравнению с полученными по формулам В.Л. Гинзбурга, в зависимости от объема плазменной трубки и плотности паров ртути в ней.

Рассмотрим упрощенную методику оценки влияния паров ртути на удельную проводимость ПА (рис. 1).

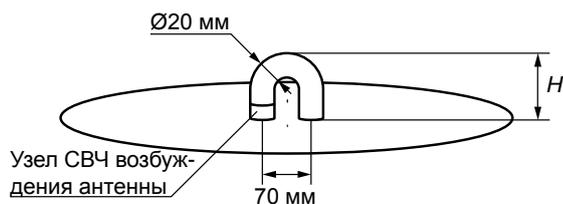


Рис. 1.

Внешний вид плазменной антенны, устанавливаемой на исследуемых мобильных объектах:

а)  $H=500$  мм для ЛА; б)  $H=300$  мм для КА

Выполним оценку вклада в проводимость ПА (рис. 1) за счет введения

в нее паров ртути. С учетом размеров антенны, указанных на рис.1 внутренний объем ПА составляет  $V=373,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ . Учитывая, что масса ртути, вводимой обычно в ПА составляет около 70 мг [7], плотность паров ртути в ПА будет равной  $0,187 \text{ кг/м}^3$ . В соответствии со справочными данными проводимость ртути в обычном состоянии равна  $1,04 \cdot 10^6 \text{ См/м}$ , а ее плотность  $1,36 \cdot 10^4 \text{ кг/м}^3$  [8]. То есть, в данном объеме ПА плотность паров ртути должна уменьшиться в 72730 раз и, следовательно, УП паров ртути составит приблизительно  $14,29 \text{ См/м}$ .

При расчетах РТ характеристик ПА будем задавать в качестве исходных данных проводимость ПА без учета ( $\sigma_1$ ) и с учетом наличия в ПА паров ртути ( $\sigma_2$ ). Эти данные приведены в таблице 1 для различных частотных диапазонов, которые используются на ЛА и КА. Данные в табл. 1 получены по методикам [5, 9] при условии, что температура электронной компоненты плазмы равна  $T_e = 10^4 \text{ }^\circ\text{K}$ , а эффективность концентрации заряженных частиц в ней  $N_e = 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . Как видно из табл. 1, с увеличением рабочей частоты, УП паров ртути все больше превалирует над УП холодной плазмы газового разряда, полученной из [5, 9].

Таблица 1  
Удельные проводимости ПА

Частотный диапазон	$f, \text{ МГц}$	$\sigma_1, \text{ См/м}$	$\sigma_2, \text{ См/м}$
I	45	364.39	350,04
	90	112.45	98,15
	150	50.57	36,27
	300	23.47	9,17
	450	18.38	4,08
II	1610	0,30	14,60
	1627	0,29	14,59
III	2484	0,12	14,42
	2500	0,12	14,42

Ниже рассмотрены результаты компьютерного моделирования плазменных и металлических антенн, установленных на ЛА и КА.

### **Внутренние и внешние РТ характеристики антенн, установленных на характерных фрагментах ЛА**

Для упрощения и ускорения процедуры компьютерного моделирования антенных систем на ЛА используем два типа фрагментов присущих самолетам [10]. Это цилиндрическая часть самолета, например, разработки фирмы Локхид-Мартин (США) (рис. 2) и усеченный конус (рис. 6), которым аппроксимируем носовую часть этого самолета. На фрагментах моделируем установку и возбуждение петлевой ПА или металлической антенны (МА), представленной на рис.1.

2.1. Расчет КСВН, ДН и КУ при установке ПА и МА на цилиндрической части ЛА (см. рис. 2). На рис. 3 представлены результаты расчетов в частотном диапазоне №1, (см. табл. 1) КСВН плазменной и алюминиевой антенн (АА), установленных как показано на фрагменте рис. 2. Видно, что как ПА так и АА на относительно близких частотных диапазонах обеспечивают резкое резонансное понижение КСВН до приемлемых для практи-

ки значень. Однак частотний діапазон значень КСВН у ПА, приблизительно вдвое шире, чем у АА, что является положительным свойством ПА. На рис. 4 и рис. 5 представлены ДН антенн в дальней зоне в уровнях КУ, дБ, установленных на фрагменте рис. 2 для случаев отсутствия и наличия крыльев, соответственно. Из сравнения рис.4 и рис. 5 видно, что крылья оказывают значительное влияние на формирование ДН в дальней зоне, как в направлении на Землю, так и в противоположном направлении. При наличии крыльев ДН становятся более изрезанными, в направлении Земли возникает нулевой провал порядка  $-30 \dots -40$  дБ. Исследовалось также влияние диаметра фрагмента при изменении в пределах от 3,5 до 7,0 м в этом же частотном диапазоне, что показало незначительное влияние на ДН. Однако, на более высоких частотах прогнозируется более значительное влияние при увеличении диаметра. Следует отметить, что при равных условиях с ПА для АА ДН более изрезанные. На КСВН и КПД в 1-м частотном диапазоне наличие крыльев и изменение диаметра заметного влияния не оказывает.

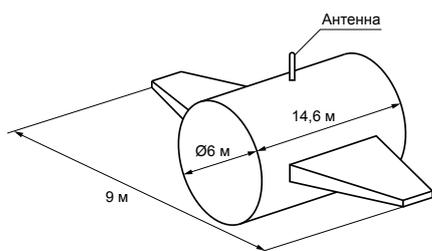


Рис. 2. Упрощенный фрагмент летательного аппарата

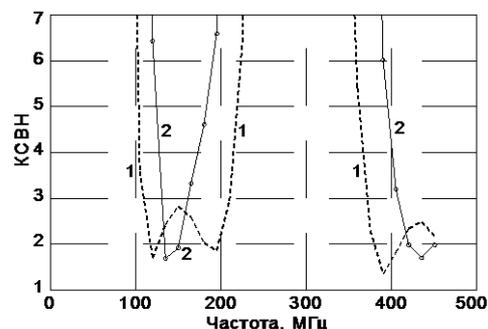


Рис. 3. КСВН на входе антенны (рис. 1), установленной на фрагменте ЛА как показано на рис. 2: 1 – ПА; 2 – алюминиевая антенна

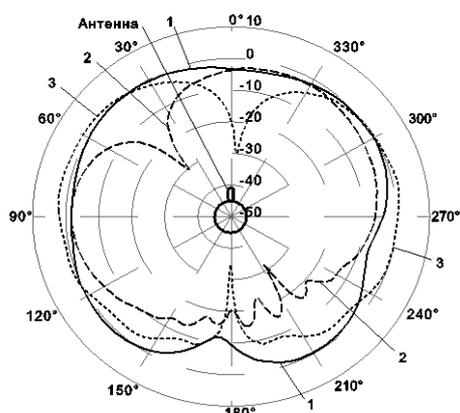


Рис. 4. ДН ПА при отсутствии крыльев на фрагменте рис. 2: 1- частота 45 МГц; 2 – частота 150 МГц; 3- частота 300 МГц

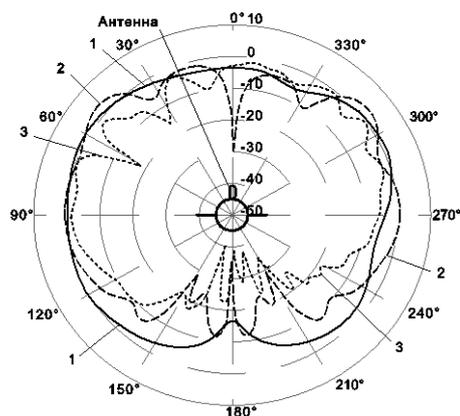


Рис. 5. ДН ПА при наличии крыльев на фрагменте рис. 2: 1- частота 45 МГц; 2 – частота 150 МГц; 3- частота 300 МГц

2.2. Расчет КСВН, ДН, КУ и КПД при установке ПА в носовой части ЛА. Для упрощения компьютерного моделирования РТ параметров антенной системы, установленной в носовой части ЛА исследуем фрагмент в виде конуса с углом при вершине  $\beta$  для случая, когда антенна установлена в вершине этого конуса и сориентирована вдоль его оси. Длина образующей конуса  $L=3$  м. Основание конуса металлическое.

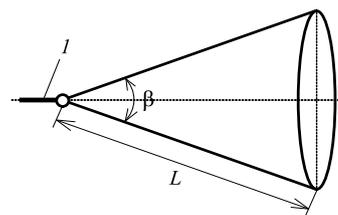


Рис. 6. Общий вид фрагмента носовой части ЛА с установленной на нем антенной 1

На рис. 7 - 9 приведена частотная зависимость КСВН, ДН в уровнях КУ, дБ и КПД антенн (рис. 1а), установленных в вершине конуса как показано на рис.6. Как видно из рис.7 характер КСВН несколько иной, чем при установке этой же антенны на цилиндре (рис. 2, рис. 3).

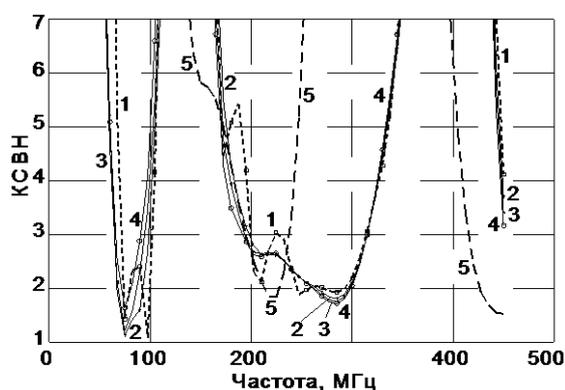


Рис. 7. Частотная зависимость КСВН ПА: 1 –  $\beta=0^\circ$ ; 2 –  $\beta=20^\circ$ ; 3 –  $\beta=40^\circ$ ; 4 –  $\beta=60^\circ$ ; 5 – антенна из алюминиевой трубки  $\beta=20^\circ$

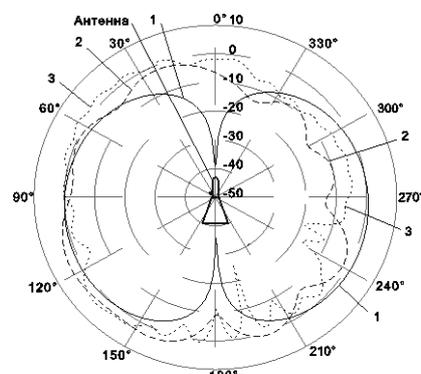


Рис. 8. ДН ПА, установленной на носовой части фрагмента рис.6: 1– 45 МГц; 2 – 150 МГц; 3 – 450 МГц

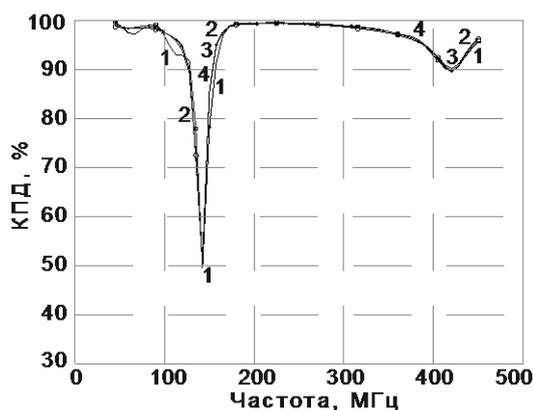


Рис. 9. Частотная зависимость КПД ПА: 1 –  $\beta=0^\circ$ ; 2 –  $\beta=20^\circ$ ; 3 –  $\beta=40^\circ$ ; 4 –  $\beta=60^\circ$

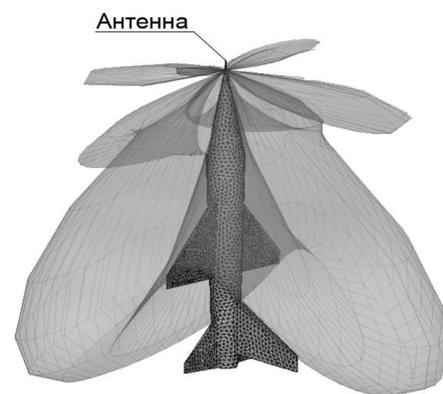


Рис. 10. Объемная ДН антенны, установленной в носовой части самолета на частоте 45 МГц

В частности диапазон пониженных КСВН значительно смещен в область более высоких частот до 200-300 МГц. Также возникает дополнительный диапазон пониженных КСВН в области относительно низких частот 90-100 МГц, близкий к диапазону пониженных КСВН варианта на ци-

линдре (рис. 2, рис. 3) для углов при вершине конуса  $\beta$  от 0 до 70 град. Следовательно, мы получили двухдиапазонную ПА с относительно высокой развязкой между каналами. На рис.8 представлены ДН этой антенны, установленной на коническом фрагменте (рис. 6) на трех широко разнесенных частотах, из которых видно, что на низших частотах диапазона I ДН квазиизотропные, а уже на частоте 450 МГц вдоль оси конуса имеются нулевые провалы глубиной до -45 дБ. Из графиков КПД на рис. 9 виден глубокий нулевой провал между двумя частотными диапазонами, указанными выше, что подтверждает предположение о высокой развязке между этими каналами. Такие свойства антенны весьма приемлемы для организации дуплексной связи, как это практикуется в наземных и спутниковых системах связи. При разных углах  $\beta$  при вершине конуса КПД остается практически неизменным. На рис. 10 представлена объемная ДН в уровнях КУ, дБ для самолета подобного F-16 фирмы Локхид-Мартин.

Влияние паров ртути внутри плазменной антенны на ее КСВН, ДН, и КПД на исследованных выше относительно низких частотах диапазона I (табл. 1) незначительно.

#### Внутренние и внешние характеристики антенн, установленных на КА связи системы Globalstar

В данном разделе рассмотрены результаты компьютерного моделирования РТ характеристик ПА и АА, установленных на космическом аппарате связи и направленных в сторону Земли как показано на рис. 11.

Исследовано влияние солнечных панелей (СП) и заполнения ПА парами ртути на РТ параметры антенн. Дана сравнительная оценка РТ параметров для ПА и АА.

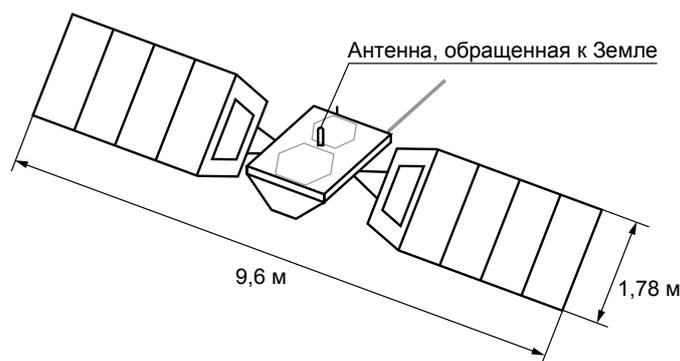


Рис. 11. Общий вид спутника связи Globalstar

3.1. Влияние солнечных панелей КА на КСВН, ДН, КУ и КПД в двух частотных диапазонах II-м и III-м спутниковой связи (табл. 1). На рис.12 и 13 приведены частотные зависимости КСВН ПА, установленной на КА Globalstar как показано на рис.11 в приемном и передающем диапазонах спутниковой связи. Из графиков следует, что солнечные панели заметно увеличивают КСВН, особенно на III-м частотном диапазоне. Что касается ДН на одной из частот III-го диапазона (рис. 14 и рис.15), то они

суттєво зависять від наявності сонячних панелей на КА і сприяють збільшенню КУ в напрямленні Землі, то єсть в нижню півкулю. Розрахунки показують, що КПД ПА суттєво зависить від робочої частоти і в обох діапазонах має мінімальні значення від 73 до 76 %.

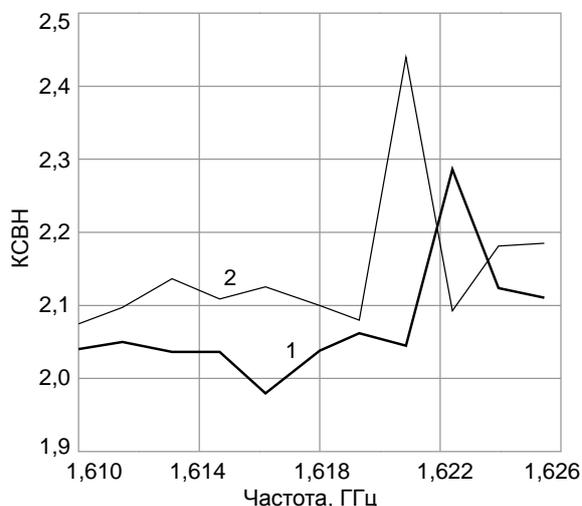


Рис. 12. Частотна залежність в діапазоні II КСВН ПА, установленної на КА як показано на рис. 11: 1 – без СП; 2 – з СП

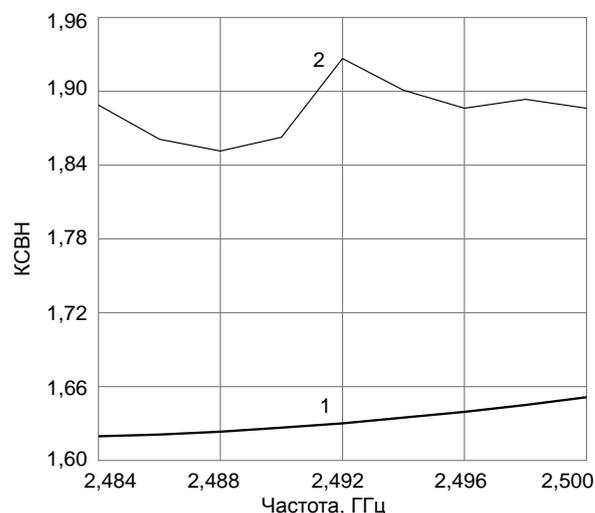


Рис. 13. Частотна залежність в діапазоні III КСВН ПА, установленної на КА як показано на рис. 11: 1 – без СП; 2 – з СП

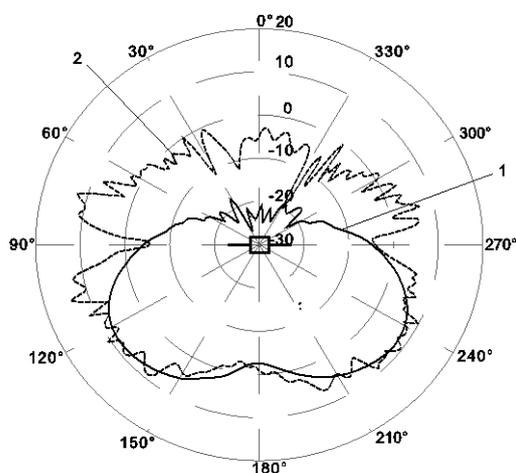


Рис. 14. ДН в рівнях КУ, дБ на частоті 2484 МГц: 1 – з СП; 2 – без СП

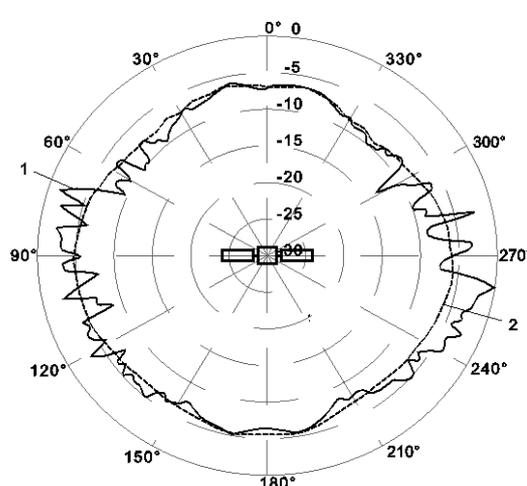


Рис. 15. ДН на частоті 2484 МГц: 1 – з СП; 2 – без СП

3.2 Влияние материала, из которого изготовлена антенна в диапазонах I и II (табл. 1) спутниковой связи на КСВН и ДН ПА. Во втором и третьем частотных диапазонах исследованы зависимости КСВН ПА и антенны, изготовленной из алюминия. При всех одинаковых условиях КСВН ПА не превышал 1,5 – 2,0, а для алюминиевой антенны КСВН увеличивался до 2,0-2,5. ДН слабо зависят от материала антенны, а больше от конфигурации КА.

3.3 Влияние на КСВН, ДН, КПД наличия паров ртути в плазменной антенне. Как видно из табл. 1 вклад в УП ПА за счет наличия паров ртути в ПА в общее значение УП ПА весьма значителен.

Это и является причиной значительного изменения КСВН на входе ПА из-за наличия паров ртути. На рис. 16 приведена иллюстрация уменьшения КСВН при наличии в ПА паров ртути, что является положительным свойством. Однако КПД ПА изменяется в худшую сторону и его значение становится ниже 80 %.

Авторы выражают благодарность Пономаренко Ю.В. за выполнение ряда расчетов параметров антенн.

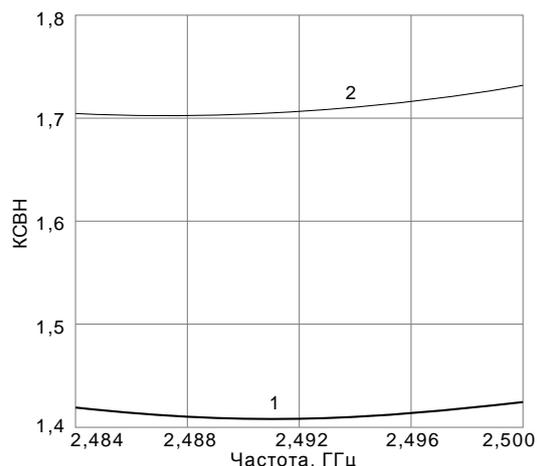


Рис. 16. Частотная зависимость КСВН:  
1 – с учетом паров ртути;  
2 – без учета паров ртути

### Заключение

1. Проведено компьютерное моделирование РТ параметров плазменных и металлических антенн (КСВН, ДН, КУ и КПД), установленных на летательных и космических аппаратах и их фрагментах и выполнено сравнение и оценка этих характеристик.

2. В результате выполненных расчетов выяснена степень влияния конфигурации и размеров этих объектов на внутренние и внешние параметры этих антенн в нескольких наиболее применяемых микроволновых диапазонах. Впервые обнаружены двухдиапазонные свойства ПА, установленных на коническом фрагменте ЛА.

3. Подтверждено, что ПА, установленные на мобильных объектах сложной формы имеют в два-три раза шире частотный диапазон по КСВН и ДН, по сравнению с металлическими антеннами.

4. Предложена методика уточнения удельной проводимости ПА, полученной по классическим формулам В.Л. Гинзбурга, в связи с введением в ПА паров ртути. Проведено сравнение расчетных значений РТ характеристик ПА на мобильных объектах с учетом и без учета паров ртути.

Полученные результаты могут быть полезными при разработке плазменных и металлических антенн, устанавливаемых на летательных и космических аппаратах.

### Литература

1. Марков Г.Т., Васильев Е.Н. Математические методы прикладной электродинамики. Сов. Радио, – М.: 1970, 386 с.
2. Васильев Е.Н. Возбуждение гладкого идеально проводящего тела вращения. Изв. ВУЗ-в «Радиофизика», т. II, № 4, 1959, С. 588-601.
3. Васильев Е.Н., Серегина А. Р. Возбуждение толстого цилиндра конечной длины., Радиотехника и электроника, т. VII, № 12, 1963, С. 1972-1979.
4. Jenn D.C. Plasma antennas: Survey of Techniques and the Current State of the Art / D.C. Jenn; Naval Postgraduate School, Prepared for: SPAWAR PMW 189 San Diego, CA,

USA, 2003. – 27 p.

5 Гинзбург В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме / В. Л. Гинзбург – М., 1960. – 552 с.

6. Alexeff I. The Plasma Antenna – Now You See It, Now You Don't / I. Alexeff // XI Kharkiv Young Scientists Conference on "Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics". Ukraine, – 2011 – Thesis.

7. Паламаренко С. И. Люминесцентные лампы и их характеристики / С. И. Паламаренко // Радиолобитель - Электрик, – 2001 – № 1. – С. 26.

8. Кухлинг Х. Справочник по физике. Пер. с нем. / Х. Кухлинг – М.: Мир, 1982, – 475 с.

9. Овсяников В.В. Параметры излучателей из холодной плазмы / В.В. Овсяников, С.Н. Мороз // Вісник НТУ України «КПІ» Серія – Радіотехніка. Радіоапаратобудування.– 2011 – №46 – С. 133 – 139.

10. Ovsyanikov V.V. The plazma antennas mounted on fragments of mobile objects / V.V. Ovsyanikov, O.L.Olshevskiy, V.M. Popel, Y.D. Romanenko, Y.V. Ponomarenko, S.N. Moroz, The International Conf. Ultrawideband and ultrashort impulse signals, 6-10 September, 2010, Sevastopol, Ukraine, - p. 233-235.

*Овсяніков В.В., Мороз С.М. Радіотехнічні характеристики плазмових та металічних антен, встановлених на літальних і космічних апаратах. Досліджені РТ характеристики плазмових і металічних антен (КСХН, ДС, КП, ККД) в програмному середовищі FEKO компанії EMSS, встановлених на ЛА і КА та їх фрагментах. Це дозволило проводити на більш високому рівні об'ємне моделювання складних віпромінюючих структур. Наведені порівняльні характеристики антен, виконаних з металу та холодної плазми газового розряду. Вперше виявлені дводіапазонні властивості плазмових антен, встановлених на кінцічному фрагменті ЛА. Досліджено вплив парів ртуті, що зазвичай вводяться в плазмові антени для полегшення створення газового розряду, які в різній мірі змінюють провідність середовища плазмової антени. В результаті виконаних розрахунків з'ясовано ступінь впливу конфігурації та розмірів мобільних об'єктів на внутрішні та зовнішні параметри плазмових і металічних антен в декількох найбільш вживаних мікрохвильових діапазонах. Підтверджено, що плазмові антени, встановлені на мобільних об'єктах складної форми мають в два-три рази ширший частотний діапазон по КСХН і ДС, в порівнянні з металічними антенами.*

**Ключові слова:** *радіотехнічні характеристики антен, EMSS FEKO, літальний апарат, космічний апарат, плазмова антена, питома провідність холодної плазми, провідність парів ртуті, дводіапазонні властивості плазмових антен.*

*Овсяников В.В., Мороз С.Н. Радиотехнические характеристики плазменных и металлических антен, установленных на летательных и космических аппаратах. Исследованы РТ характеристики плазменных и металлических антен (КСВН, ДН, КУ, КПД) в программной среде FEKO компании EMSS, установленных на ЛА и КА и их фрагментах. Это позволило проводить на более высоком уровне объемное моделирование сложных излучающих структур. Приведены сравнительные характеристики антен, выполненных из металла и холодной плазмы газового разряда. Впервые обнаружены двухдиапазонные свойства плазменных антен, установленных на коническом фрагменте ЛА. Исследовано влияние паров ртути, вводимых обычно в плазменные антенны для облегчения создания газового разряда, которые в разной степени изменяют проводимость среды плазменной антенны. В результате выполненных расчетов выяснена степень влияния конфигурации и размеров мобильных объектов на внут-*

ренние и внешние параметры плазменных и металлических антенн в нескольких наиболее применяемых микроволновых диапазонах. Подтверждено, что плазменные антенны, установленные на мобильных объектах сложной формы имеют в два-три раза шире частотный диапазон по КСВН и ДН, по сравнению с металлическими антеннами.

**Ключевые слова:** радиотехнические характеристики антенн, EMSS FEKO, летательный аппарат, космический аппарат, плазменная антенна, металлическая антенна, удельная проводимость холодной плазмы, проводимость паров ртути, двухдиапазонные свойства плазменных антенн.

Ovsyanikov V.V., Moroz S.M. **Radio-technical characteristics of plasma and metal antennas mounted on aircrafts and spacecrafts.** RT characteristics of plasma and metal antennas (VSWR, RP, gain, efficiency) installed on aircrafts and spacecrafts and their fragments in the software environment EMSS FEKO are investigated. It became possible to carry out higher-level 3D modeling of complex radiating structures. Comparative characteristics of the antennas, made of metal and gas-discharge cold plasma are shown. For the first time detected dual-band properties of plasma antennas mounted on a conical fragment of the aircraft. The influence of mercury vapor, usually introduced into the plasma antennas to facilitate the creation of a gas discharge, which to varying degrees modify the conductivity of the medium of the plasma antenna is investigated. As a result of the calculations elucidate the degree of influence configuration and size of mobile objects to internal and external parameters of the plasma and metal antennas in some of the most important microwave bands. Confirmed that the plasma antenna, mounted on mobile objects of complex configuration have a two to three times wider frequency range for VSWR and RP, compared to metal antennas.

**Key words:** Radio-technical characteristics of antenna, EMSS FEKO, spacecraft, aircraft, plasma antenna, metal antenna, conductivity of cold plasma, conductivity of mercury vapor, dual-band properties of plasma antennas.