

А. А. ОВОДЕНКО, В. Н. КРАСЮК, А. Р. БЕСТУГИН, М. Б. РЫЖИКОВ

РАДИОЗАМЕТНОСТЬ АНТЕННЫХ ОКОН ГИПЕРЗВУКОВЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Рассматривается возможность применения конформных и плоских микрополосковых антенных решеток для гиперзвуковых летательных аппаратов. Предложены варианты их конструктивного исполнения для решения задачи по снижению радиозаметности в сантиметровом диапазоне длин волн.

Ключевые слова: гиперзвуковой летательный аппарат, микрополосковая антенная решетка, диаграмма направленности, эффективная площадь рассеяния.

Создание эффективной многоцелевой авиационно-космической системы требует разработки многоцелевых гиперзвуковых самолетов и ракет, имеющих малые габариты и вес. Задача минимизации массогабаритных параметров гиперзвукового летательного аппарата (ГЛА) без потери эффективности работы его радиотехнических систем требует использования антенн, которые не занимают значительного пространства внутри корпуса планера, располагаясь непосредственно у его поверхности под слоем теплозащитного покрытия (ТЗП). Современные ГЛА должны не только летать по баллистической траектории с гиперзвуковой скоростью, но и иметь возможность произвольно изменять свою траекторию полета. Полет по сложной траектории способствует возможности преодоления систем противоракетной обороны (ПРО), если приняты соответствующие меры по снижению радиозаметности планера [1]. Наличие радиопрозрачных антенных окон на поверхности ГЛА при полете по сложной траектории на определенных ракурсах приводит к появлению сильного отражения радиолокационных сигналов от антенн, которое может свести на нет меры, принимаемые по снижению заметности планера в целом [2]. Это приводит к необходимости создания антенн с малой эффективной площадью рассеяния (ЭПР).

Следует отметить, что, согласно работе [3], микрополосковые антенны (МПА) обладают малыми габаритами и весом, по сравнению с другими антеннами, и могут быть расположены на выпуклых поверхностях, что делает их привлекательными для использования в качестве бортовых антенн ГЛА.

В настоящей работе рассматривается возможность использования микрополосковых антенных решеток (АР) для ГЛА с учетом требований к снижению их радиозаметности.

При длительном полете ГЛА в атмосфере на гиперзвуковых скоростях вдоль его поверхности устанавливается определенное неравномерное распределение температуры, которое представлено на рис. 1 [4]. Данное распределение построено при условии полета гиперзвукового самолета продолжительностью более 7 секунд на высоте 27 000 метров со скоростью, соответствующей $M = 8$ (M — число Маха, равное отношению скорости ГЛА к

скорости звука). Наибольшие значения температуры достигаются у поверхности носового обтекателя. Так, например, у поверхности конического обтекателя из керамики с толщиной стенки в 5 мм [5] при полете длительностью свыше 4 с со скоростью, соответствующей $M = 7$, на высоте 600 м температура достигает 1935 °С.

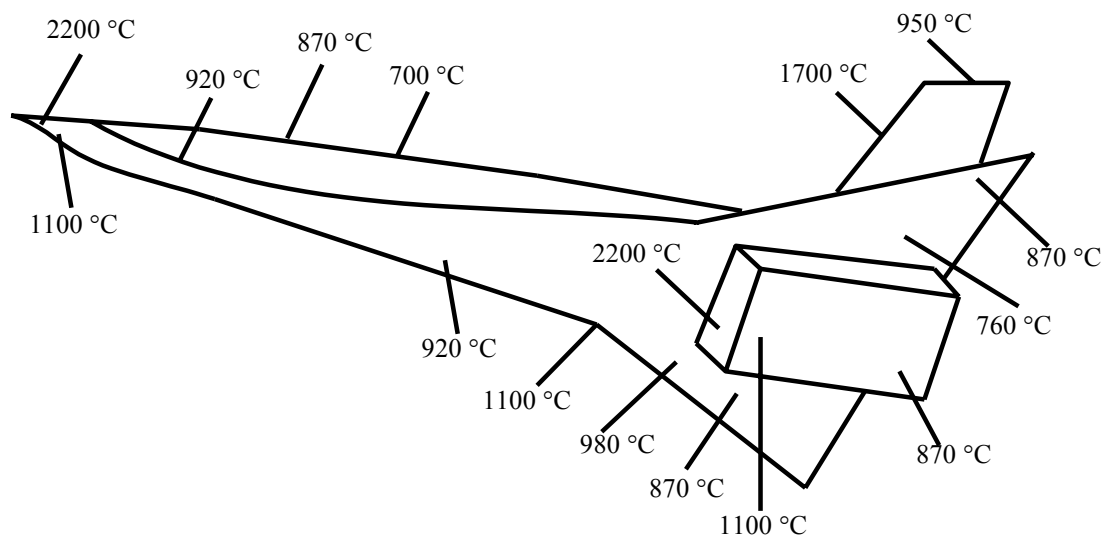


Рис. 1

Расположить микрополосковые АР непосредственно на поверхности ГЛА нельзя по двум причинам. Из-за слишком высоких значений температуры у поверхности антенны, зависящих от высоты и скорости полета, изменяются во времени параметры диэлектрической подложки: значение диэлектрической проницаемости и толщина, что приводит к соответствующему изменению резонансных свойств. Даже небольшое отклонение резонансной частоты излучателя от требуемого значения ведет к существенному падению коэффициента усиления антенны и ухудшению условий ее согласования с передатчиком и приемником [3]. Кроме этого, при различных условиях полета у поверхности антенны возникает неравномерное температурное распределение. Такое распределение изменяет условия излучения отдельных излучателей в решетке, что приводит к искажению амплитудно-фазового распределения, а в результате — к отклонению направления визирования основного луча диаграммы направленности (ДН) антенны, изменению ее формы и уровней боковых лепестков (УБЛ), к уменьшению коэффициента усиления антенны.

Таким образом, микрополосковые антенны для ГЛА должны располагаться под слоем ТЗП. Согласно работе [5], температура в антенном отсеке на порядок меньше температуры у поверхности ТЗП. Это означает, что под носовым обтекателем температура может достигать 200—300 °С. В антенных отсеках, располагаемых сверху или снизу ГЛА, диапазон изменения температур составит 70—120 °С.

Стабилизация параметров излучения и рассеяния для микрополосковых антенн, располагаемых на ГЛА под ТЗП, требует использования специальных диэлектрических материалов при изготовлении подложки. Для данных материалов необходимо, чтобы значения их диэлектрической проницаемости ϵ и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta_\epsilon$ слабо возрастали при нагреве до 300 °С. К таким материалам относятся: окись алюминия, окись бериллия, нитрид бора, окись кремния. В указанном диапазоне изменения температур они имеют близкий к нулю тангенс угла диэлектрических потерь и практически неизменное значение диэлектрической проницаемости, которые начинают возрастать при температуре свыше 400 °С [5].

При применении указанных материалов для микрополосковых антенн возможно достичь снижения уровня их радиолокационной заметности в сантиметровом диапазоне длин волн. Для уменьшения ЭПР антенных решеток, располагаемых под носовым обтекателем, ре-

комендуется формировать их на выпуклой, например полусферической, поверхности. При таком размещении возникает проблема реализации остронаправленного сканирования в АР, которая может быть разрешена за счет использования соответствующего амплитудно-фазового распределения. Сканирование в такой конформной антенне может быть реализовано посредством электронной перекоммутации излучателей с подсканированием в секторе углов между ними за счет изменения фазового распределения [6].

Рассмотрим подробнее проблему формирования направленного излучения в микрополосковой сферической АР. Возьмем в качестве материала для диэлектрической подложки окись кремния со значением диэлектрической проницаемости $\epsilon \approx 2,3$ и с малым тангенсом углов потерь $\text{tg}\delta_\epsilon < 0,001$. При реализации АР с длиной волны излучения $\lambda = 3,1$ см получаем следующие параметры микрополосковых дисковых излучателей: радиус излучателя $r_{\text{и}} = 0,0057$ м, толщина подложки $d = 0,001$ м. Коэффициент потерь на формирование поверхностных волн для указанной дисковой антенны составляет около 0,5 %, подложка излучателя считается электрически тонкой [3], но при этом сечения ДН излучателя в главных плоскостях различаются. В меридиональной плоскости для одиночного излучателя получаем ширину ДН по уровню спада напряженности до значения 0,7, равную приблизительно 50° , а в экваториальной — около 40° .

На рис. 2 представлена система координат для расчета характеристик излучения сферической решетки.

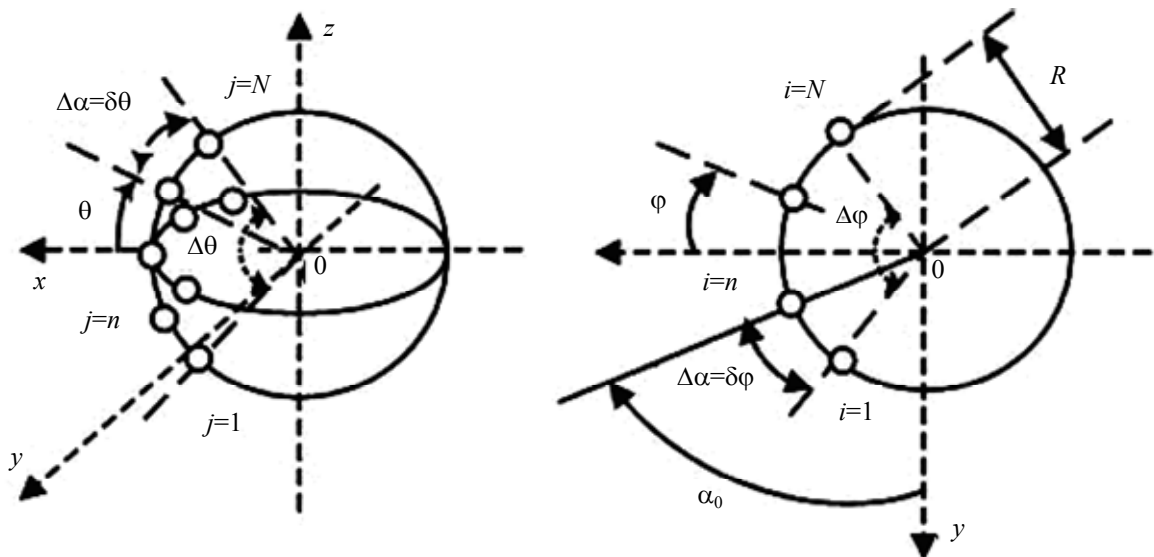


Рис. 2

В данной системе координат соблюдаются следующие соотношения: $x = R \cos \theta \cos \varphi$, $y = -R \cos \theta \sin \varphi$, $z = R \sin \theta$. Рассмотрим условия формирования остронаправленной ДН. Угловые направления на излучатели антенной решетки определяются по соотношениям

$$\varphi_i = \left(\frac{-N-1}{2} + i \right) \Delta\alpha; \quad \theta_j = \left(\frac{-N-1}{2} + j \right) \Delta\alpha,$$

в которых: $i = 1, 2, \dots, N$, $j = 1, 2, \dots, N$, а N — ближайшее целое к $N^* \approx \Delta\varphi / \Delta\alpha$. Координаты излучателей в декартовой системе координат: $x_{ij} = R \cos \theta_j \cos \varphi_i$, $y_{ij} = -R \cos \theta_j \sin \varphi_i$, $z_j = R \sin \theta_j$. Для ускорения вычислительного процесса при расчете ДН была взята сфера небольшого размера с малым количеством излучателей. Излучатели в ней были расположены друг относительно друга с угловым шагом $\Delta\alpha = \delta\varphi = \delta\theta = 8^\circ$. Выбор шага должен быть таким, чтобы $N_{\text{max}} = 360^\circ / \Delta\alpha$ — максимально возможное число излучателей в экваториальном сечении (y_0x) решетки было целым. При расстоянии между микрополосковыми излучателями, большим

$\lambda/2$, появляются дифракционные максимумы. При меньшем расстоянии коэффициент развязки между отдельными излучателями может уменьшиться настолько, что придется учитывать взаимное влияние излучателей как по поверхностным, так и по пространственным волнам (это, например, необходимо при построении такой АР из вибраторных излучателей). Были выбраны следующие параметры сферической решетки: угол формирующего раскрыва $\Delta\varphi = \Delta\theta = 80^\circ$, радиус сферической АР $R = 0,105$ м. Площадь формирующего раскрыва АР составила $S = \pi R^2 \sin^2(\Delta\varphi/2)$, а соответствующий радиус эквивалентного круглого раскрыва $R_3 = (S/\pi)^{1/2} = 0,084$ м.

Чтобы максимум ДН был ориентирован в направлении $\varphi = \theta = 0$, необходимо создать следующее фазовое распределение на излучателях:

$$\psi_{ij} = \psi(\theta_j, \varphi_i) = -\frac{2\pi}{\lambda} R \sin|\theta_j| |\sin|\varphi_i||.$$

Для расчета ДН сферической АР $F_{c.p.}$ необходимо учесть разность фаз, возникающую между излучателями за счет разности хода лучей в заданном направлении θ, φ . Будем вычислять ДН аналогично тому, как это было сделано в работе [3], представив ее в следующем виде:

$$F_{c.p.}(\theta, \varphi) = \left| \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N F_{ij}(\theta, \varphi) I_{ij} Mn_{ij}(\theta, \varphi) \right|,$$

где $F_{ij}(\theta, \varphi)$ — значение ДН одиночного микрополоскового излучателя в направлении (θ, φ) ; $Mn_{ij}(\theta, \varphi)$ — множитель, учитывающий влияние фазовых соотношений в сферической АР; I_{ij} — значение амплитуды тока на излучателе.

Множитель $Mn_{ij}(\theta, \varphi)$ для сферической АР можно рассчитать по формуле

$$Mn_{ij}(\theta, \varphi) = \exp\left(-j^* \frac{2\pi}{\lambda} R \left[-\cos\theta \sin\varphi \cos\theta_j \sin\varphi_i + \sin\theta_j \sin\theta\right]\right),$$

где j^* — мнимая единица.

Произвольное направление (θ, φ) , задаваемое в системе координат сферической решетки, можно связать с угловыми координатами ζ и μ системы координат излучателя $x_i y_i z_i$ для расчета значений ДН ij -го излучателя. Поскольку система координат $x_i y_i z_i$ получается из системы координат $x y z$ за счет последовательного поворота последней сначала на угол θ_j вокруг оси y , а затем на угол φ_i вокруг повернутой оси z , то модули углов ζ и μ для ij -го излучателя определяются следующим образом:

$$\mu_{ij} = \left| \arcsin\left(-\sin\theta_j \cos\varphi_i \cos\theta \cos\varphi + \sin\theta_j \sin\varphi_i \cos\theta \sin\varphi + \cos\theta_j \sin\theta\right) \right|,$$

$$y_i = -(\sin\varphi_i \cos\theta \cos\varphi + \cos\varphi_i \cos\theta \sin\varphi),$$

$$x_i = (\cos\theta_j \cos\varphi_i \cos\theta \cos\varphi + \sin\theta_j \sin\theta - \sin\varphi_i \cos\theta_j \cos\theta \sin\varphi),$$

$$\zeta_{ij} = \begin{cases} \left| \arctg \frac{y_i}{x_i} \right|, & \text{если } x_i \neq 0, \\ \frac{\pi}{2}, & \text{если } x_i = 0. \end{cases}$$

Тогда значение ДН одиночного дискового микрополоскового излучателя в направлении (θ, φ)

$$F_{ij}(\theta, \varphi) = \left| \frac{2J_1\left(\frac{2\pi}{\lambda} r_n \sin|\zeta_{ij}|\right) \cos|\zeta_{ij}| \left(\frac{2\pi}{\lambda} d\right)^{-1} \left(\frac{2\pi}{\lambda} r_n \sin|\zeta_{ij}|\right)^{-1}}{j^* \cos|\zeta_{ij}| + \sqrt{\varepsilon - (\sin|\zeta_{ij}|)^2} \operatorname{ctg}\left(\sqrt{\varepsilon - (\sin|\zeta_{ij}|)^2} \frac{2\pi}{\lambda}\right)} \right| \times$$

$$\times \left| J_1'\left(\frac{2\pi}{\lambda} r_n \sin|\mu_{ij}|\right) \frac{2\varepsilon \cos|\mu_{ij}| \left(\frac{2\pi}{\lambda} d\right)^{-1} \left(\sqrt{\varepsilon - (\sin|\mu_{ij}|)^2}\right)^{-1}}{j^* \sqrt{\varepsilon - (\sin|\mu_{ij}|)^2} + \varepsilon \cos|\mu_{ij}| \operatorname{ctg}\left(\sqrt{\varepsilon - (\sin|\mu_{ij}|)^2} \frac{2\pi}{\lambda}\right)} \right|,$$

J_1 и J_1' — функция Бесселя первого порядка и ее производная.

На рис. 3 и 4 представлены сечения ДН в экваториальной и меридиональной плоскостях соответственно, полученные при условии использования модифицированного амплитудного распределения токов Дольфа—Чебышева при заданном УБЛ в экваториальной плоскости –30 дБ [7]. Как следует из приведенных графиков, в меридиональной плоскости значение УБЛ выше из-за большей ширины ДН одиночного микрополоскового излучателя в его меридиональной плоскости.

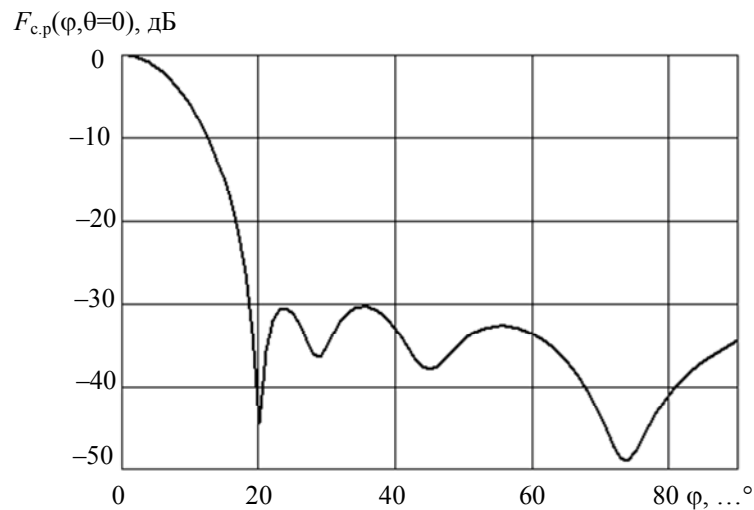


Рис. 3

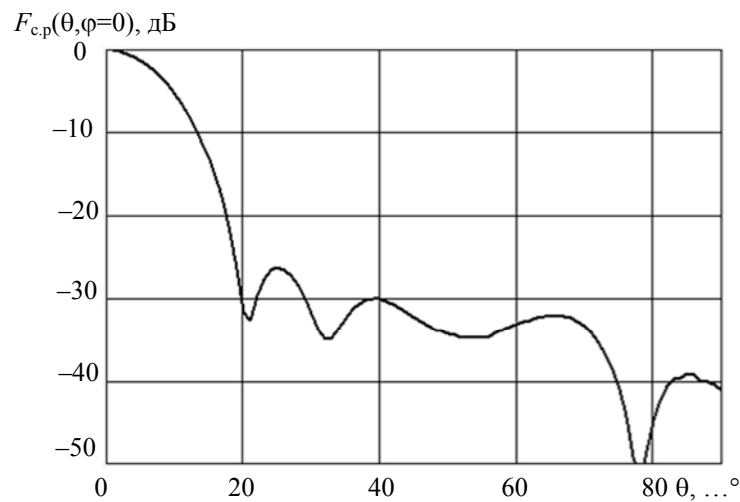


Рис. 4

Для расчета отношения ЭПР микрополосковой сферической АР (при условии использования излучателей с электрически тонкой подложкой) к ЭПР плоской дисковой антенной решетки, формирующей аналогичную ДН, можно использовать приближенную формулу [8]:

$$Um = \frac{\lambda^2}{R^2}.$$

Так, при создании сферической антенной решетки с $R=0,5$ м при облучении с $\lambda=3$ см получаем, что ЭПР конформной антенны на 24,4 дБ меньше, чем ЭПР аналогичной плоской антенной решетки.

В случае использования плоских микрополосковых решеток в антенных отсеках, располагаемых сверху и снизу ГЛА, возможно достичь уменьшения их ЭПР за счет соответствующего выбора параметров диэлектрической подложки. Согласно статье [9], максимальная ЭПР плоской микрополосковой антенной решетки определяется вполне точно через сумму полей рассеяния, формирующихся от сетки одиночных излучателей и от основы, представляющей собой металлический экран с диэлектрической подложкой. При этом вклад рассеяния от основы в ЭПР антенны на порядок больше, чем вклад рассеяния от излучателей. Максимальная ЭПР квадратной основы со стороной a определяется через соотношения, приведенные в [9], по формуле

$$\sigma_{\max} = \frac{4\pi a^4}{\lambda^2} \left| \frac{(\sin(\gamma d))^2 - (\varepsilon - 1)(\cos(\gamma d))^2 - 2j^* \sin(\gamma d)\cos(\gamma d)}{(\sin(\gamma d))^2 + (\varepsilon - 1)(\cos(\gamma d))^2} \right|^2,$$

где $\gamma = 2\pi\sqrt{\varepsilon - 1}/\lambda$.

Подобрав значение диэлектрической проницаемости, можно уменьшить ЭПР плоской микрополосковой антенной решетки. При использовании подложки толщиной $d=0,0015$ с $\varepsilon=2,31$ (окись кремния) ЭПР основы примерно в 1,5 раза больше, чем при использовании подложки с $\varepsilon=8,5$ (окись алюминия) [5]. Однако использование диэлектрической подложки из окиси алюминия приведет к распространению поверхностных волн. Согласно графикам, представленным в работе [3], потери на излучение увеличатся в 1,4 раза. При этом для сохранения идентичной резонансной частоты излучения дисковых излучателей их радиус должен уменьшиться в 2,3 раза по сравнению с применением окиси кремния.

Таким образом, в настоящей статье показано, что для снижения радиозаметности ГЛА можно рекомендовать под носовым обтекателем использовать конформные усеченные сферические АР с электрическим сканированием пространства. Их ЭПР значительно ниже, чем у плоских антенных решеток с аналогичными ДН. При этом следует уделять особое внимание значениям уровней бокового излучения, поскольку при высоком УБЛ и полете на малой высоте большое влияние на работу радиотехнических систем могут оказывать помехи, обусловленные переотражениями от земной поверхности. При снижении ЭПР плоских микрополосковых АР посредством выбора параметров диэлектрической подложки необходимо учитывать возможный рост потерь вследствие возникновения поверхностных волн, который приводит к снижению коэффициента усиления антенной системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ганин С. М., Карпенко А. В., Колногоров В. В., Петров Г. Ф. Беспилотные летательные аппараты. СПб: „Невский Бастион“, 1999.
2. Львова Л. А. Радиолокационная заметность летательных аппаратов. Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2003.
3. Панченко Б. А., Нефедов Е. И. Микрополосковые антенны. М.: Радио и Связь, 1986.
4. Дмитриев В. Г., Бюшгенс Г. С. О работах ЦАГИ: 1970—2000 гг. и перспективы. М.: ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского, 2001.

5. Красюк В. Н., Михайлов В. Ф. Бортовые антенны гиперзвуковых летательных аппаратов. СПб: СПГААП, 1994.
6. Оводенко А. А., Красюк В. Н., Рыжиков М. Б. Синтез микрополосковой цилиндрической антенной решетки с электронным секторно-круговым обзором // Оборонная техника. 2005. № 6. С. 12—17.
7. Красюк В. Н., Бестугин А. Р., Рыжиков М. Б. Коммутационная сферическая антенная решетка из излучателей с несимметричной диаграммой направленности // Вопросы радиоэлектроники. Сер. „Общетехнические науки“. 2009. № 3. С. 5—13.
8. Красюк В. Н., Рыжиков М. Б. Эффективная площадь рассеяния конформной цилиндрической антенной решетки при применении микрополосковых излучателей разной формы // Проблемы транспорта. 2005. № 11. С. 62—67.
9. Рыжиков М. Б. Сравнение ЭПР микрополосковых антенных решеток с излучателями прямоугольной и дисковой формы // Тр. Первой Всеросс. науч.-техн. конф. „Радиовысотометрия-2004“. Каменск-Уральский, 2004. С. 52—56.

Сведения об авторах

- Анатолий Аркадьевич Оводенко** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; ректор;
E-mail: zlata@aanet.ru
- Владимир Николаевич Красюк** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра антенн и эксплуатации РЭА; зав. кафедрой; E-mail: zlata@aanet.ru
- Александр Роальдович Бестугин** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, факультет радиотехники, электроники и связи; декан; E-mail: zlata@aanet.ru
- Максим Борисович Рыжиков** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра антенн и эксплуатации РЭА; E-mail: maxrmb@rambler.ru

Рекомендована ГУАП

Поступила в редакцию
04.04.11 г.