

Приближённая методика оценки влияния корпуса носителя на характеристики направленности бортовых антенн малых космических аппаратов

Е.В. Овчинникова¹, П.А. Шмачилин¹, С.Г. Кондратьева¹, А.Г. Генералов²,
Э.В. Гаджиев², О.В. Васильев³

¹ Московский Авиационный Институт (Национальный Исследовательский Университет) (МАИ (НИУ)) Волоколамское шоссе дом 4, E-mail: oea8888@gmail.com

² АО «Научно–исследовательский институт электромеханики» (АО «НИИЭМ»), 143500, Московская область, г. Истра, ул. Панфилова 11, E-mail: otd24@niiem.ru

³ АО Московский ордена трудового красного знамени научно-исследовательский радиотехнический институт (МНИРТИ) г. Москва, 109028, Большой Трёхсвятительский пер., д. 2/1, E-mail: antenna700@mail.ru

В настоящее время наблюдается активный процесс миниатюризации всей космической техники, включая бортовую аппаратуру. Процесс миниатюризации также затронул и бортовые антенно–фидерные устройства. Учитывая ряд особенностей бортовых антенн, возникает актуальная, современная задача по разработке малогабаритной, не выступающей, простой, надёжной и высокотехнологичной антенной системы для класса малых космических аппаратов. Целью данной работы является разработка методики приближённого расчёта характеристик направленности бортовых антенн для класса малых космических аппаратов.

At present, there is an active process of miniaturization of whole space technology, including on-board equipment. On-board antenna-feeder devices also considered the process of miniaturization. Considering number of features of on-board antennas, there is an actual, modern task of developing a small-sized, low-profile, reliable, simple and high-tech antenna system of small spacecrafts. The main purpose of this article is to design the method of approximate calculation of directional characteristics of on-board antenna for small spacecrafts.

Введение

Как известно, корпус космического аппарата (КА), как и его составные части (откидные элементы конструкции, бортовая целевая аппаратура, солнечные батареи, гравитационные штанги и т.д.), в случае слабонаправленных антенны, а в ряде случаев и остронаправленных антенн, активно участвуют в процессе формирования излучённого поля. Следовательно, оказывают заметное влияние, как на входное сопротивление антенны, так и на её направленные свойства. Поэтому необходимо учитывать влияние самого КА на характеристики бортовых антенн при их разработке [1].

Поскольку при заданных габаритно-массовых требованиях масса и место, отводимое для антенно–фидерного устройства (АФУ), весьма ограничены [2], неизбежно возникают трудности с размещением антенн так, чтобы их электродинамическое взаимодействие друг с другом и с участками поверхности объекта, на котором они расположены, были минимальным. Таким образом, данная задача является актуальной для бортовых АФУ КА, особенно на ранней стадии разработки [3].

Основная часть

В настоящее время существуют различные методы расчёта характеристик направленности бортовых антенн КА [4–9].

Из рассмотренных выше методов следует, что необходимо точное определение поля излучения антенны, а, следовательно, и расчёт её характеристик требует решения электродинамической задачи. Данная задача заключается в том, что граничным

условием является равенство нулю касательной составляющей электрического поля ввиду того, что обычно корпус КА изготавливается из хорошо проводящего металла и при решении проводимость металла можно считать равной бесконечности ($\sigma = \infty$).

На практике, в большинстве своём случаев, данная электродинамическая задача не может быть решена. Это объясняется тем, что:

- поверхность КА, как правило, обладает сложной геометрической формой и часто не совпадает по форме с координатными поверхностями ни одной из трёх систем координат, в которых известно решение электродинамической задачи;
- на поверхности КА расположено большое количество бортовой целевой аппаратуры различной формы и конфигурации, наличие которой также усложняет решение электродинамической задачи.

Поэтому порой часто оказывается достаточным приближённое (упрощённое) определение электрических параметров антенны. Например, на раннем этапе проектирования антенной системы КА при выборе типа применяемой антенны и её месторасположения на поверхности КА, важно иметь ориентировочные данные об ожидаемых электрических параметрах бортовой антенны.

Приближённо определить электрические параметры антенн можно опытным или расчётным методами.

Расчётный метод основан на том, что корпус КА может быть с достаточным приближением аппроксимирован поверхностью правильной геометрической формы. Такая замена имеет смысл лишь в том случае, когда для аппроксимирующей поверхности известно решение соответствующей граничной задачи электродинамики.

На выбор аппроксимирующей поверхности могут оказать влияние следующие факторы:

- геометрическая форма корпуса КА;
- расположение излучателя на корпусе КА;
- относительные (в длинах волн) размеры той части корпуса, на которой расположен излучатель;
- сектор углов, в котором определяется поле излучения;
- тип излучателя, его относительные размеры и распределение тока на нём.

Для определения направленных свойств антенной системы необходимо определить влияние проводящей поверхности КА на поле, излучаемое бортовой антенной на поверхности носителя. Можно далее определить зависимости характеристик направленности источника от расстояния между источником и вершиной. При размещении источника на достаточно большом расстоянии от вершины, для которого выполняется условие $R \gg \lambda$, результаты решения дифракционной задачи будут близки к дифракции электромагнитной волны, излучаемой диполем на плоской проводящей поверхности. Кроме того, при большом радиусе кривизны излучение происходит только в полупространстве. Если источник находится вблизи вершины и радиус, на котором происходит дифракция, мал по сравнению с длиной волны, то излучение происходит во всем пространстве.

Учитывая соотношения между размерами КА и излучателя, можно излучатель считать элементарным. Электромагнитное поле, возбуждаемое элементарным излучателем на сферической поверхности должно удовлетворять уравнениям Максвелла, учитывающим ток стороннего источника вблизи источника:

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \vec{H} = j\omega \epsilon \vec{E} + \vec{J}^{\text{э}} \\ \operatorname{rot} \vec{E} = -j\omega \mu \vec{H} - \vec{J}^{\text{м}} \end{cases}, \quad (1)$$

и однородным уравнениям Максвелла, на достаточном удалении от источника:

$$\begin{cases} \text{rot}\vec{H} = j\omega\varepsilon\vec{E} \\ \text{rot}\vec{E} = -j\omega\mu\vec{H} \end{cases} \quad (2)$$

Полученное решение должно также удовлетворять граничным условиям на проводящей поверхности сферы:

$$\begin{aligned} \vec{E}_t &= 0 \\ \vec{H}_n &= 0 \end{aligned}$$

где \vec{E}_t - касательная составляющая вектора напряжённости электрического поля,

\vec{H}_n - нормальная составляющая вектора напряжённости магнитного поля.

Решение также должно удовлетворять условиям излучения. Рассмотрим электромагнитные волны, распространяющиеся при свободных колебаниях проводящей сферы. Для этого введём сферическую систему координат, так, чтобы поверхность $\theta=\gamma$ совпадала с центром сферы, как показано на рис. 1.

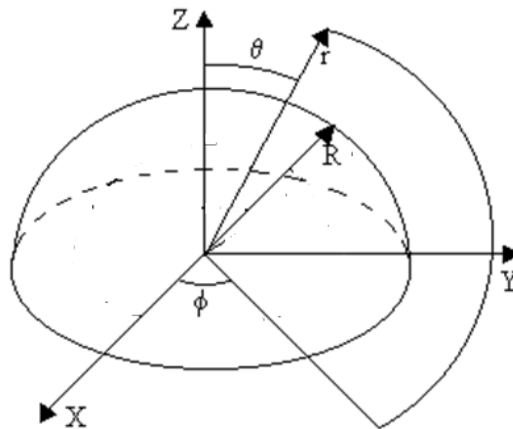


Рис. 1. Проводящая сфера в сферической системе координат.

Электромагнитное поле распределено в пространстве:

$$0 < \theta < \gamma \quad 0 \leq \phi \leq 2\pi.$$

При исследовании электромагнитного поля сферы следует считать, что угол $\gamma < \frac{\pi}{2}$.

При $\gamma = \frac{\pi}{2}$ приходим к простому случаю распространения электромагнитных волн в

полупространстве, ограниченном плоскостью $\theta = \gamma = \frac{\pi}{2}$.

При отсутствии источников уравнения (2) преобразуются в однородные волновые уравнения:

$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0, \quad (3)$$

$$\nabla^2 \vec{H} + k^2 \vec{H} = 0, \quad (4)$$

где $k = \omega^2 \varepsilon \mu$ - волновое число.

Очевидно, что свободные колебания сферы удобно анализировать в сферической системе координат:

$$\left. \begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial \theta} (\sin \theta E_{\phi}) - \frac{\partial}{\partial \phi} (E_{\theta}) &= -j\omega\mu r \sin \theta H_r \\
\frac{\partial E_r}{\partial \phi} - \frac{\partial}{\partial r} (r \sin \theta E_{\phi}) &= -j\omega\mu r \sin \theta H_{\theta} \\
\frac{\partial}{\partial r} (r E_{\theta}) - \frac{\partial E_r}{\partial \theta} &= -j\omega\mu r H_{\phi} \\
\frac{\partial}{\partial \theta} (\sin \theta H_{\phi}) - \frac{\partial H_{\theta}}{\partial \phi} &= j\omega\epsilon r \sin \theta E_r \\
\frac{\partial H_r}{\partial \phi} - \frac{\partial}{\partial r} (r \sin \theta H_{\phi}) &= j\omega\epsilon r \sin \theta E_{\theta} \\
\frac{\partial}{\partial r} (r H_{\theta}) - \frac{\partial H_r}{\partial \theta} &= j\omega\epsilon r E_{\phi}
\end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Уравнение (3) принимает вид:

$$\begin{aligned}
&\left(\frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{\cos \theta}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} \right) E_r - \\
&-\frac{2}{r^2} E_r - \frac{2}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (\sin \theta E_{\theta}) - \frac{2}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \phi} (E_{\phi}) + k^2 E_r = 0 \\
&\left(\frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{\cos \theta}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} \right) E_{\theta} - \\
&-\frac{E_{\theta}}{r^2 \sin^2 \theta} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial E_r}{\partial \theta} - \frac{2 \cos \theta}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial}{\partial \phi} (E_{\phi}) + k^2 E_{\theta} = 0 \\
&\left(\frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{\cos \theta}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} \right) E_{\phi} - \\
&-\frac{E_{\phi}}{r^2 \sin^2 \theta} + \frac{2}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial E_r}{\partial \phi} + \frac{2 \cos \theta}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial}{\partial \phi} (E_{\theta}) + k^2 E_{\phi} = 0
\end{aligned} \quad (6)$$

Аналогично записываются выражения для компонент вектора напряжённости магнитного поля (4). Компоненты электромагнитного поля определяются интегрированием волновых уравнений (3), (4).

В [7] показано, что однородные уравнения Максвелла (2) допускают решения в виде электрических и магнитных волн, причём все шесть компонент поля $E_r, E_{\theta}, E_{\phi}, H_r, H_{\theta}, H_{\phi}$, входящие в эти уравнения, можно выразить через вспомогательные функции U и V , удовлетворяющие волновому уравнению (или уравнению, приводящему к волновому). Как известно [10,11], соотношения, связывающие компоненты поля со вспомогательной функцией будут легко разрешимы, если выполняются условия Бромвича, т.е. коэффициент Ламе компоненты разделения волн на электрические и магнитные должен быть $h = 1$. Поэтому для сферической системы координат в качестве компоненты разделения можно выбрать продольную (угломестную) компоненту, используя замену переменной [11], чтобы удовлетворить условию Бромвича, но удобнее выбрать радиальную компоненту без замены переменной.

Таким образом, электрические волны имеют только электрическую радиальную компоненту, а магнитные – только магнитную радиальную компоненту. Рассмотрим поле электрических волн, примем $H_r = 0$. Тогда система уравнений (5) примет вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \theta} (\sin \theta E_\phi) - \frac{\partial}{\partial \phi} (E_\theta) &= 0 \\ \frac{\partial E_r}{\partial \phi} - \frac{\partial}{\partial r} (r \sin \theta E_\phi) &= -j\omega\mu r \sin \theta H_\theta \\ \frac{\partial}{\partial r} (r E_\theta) - \frac{\partial E_r}{\partial \theta} &= -j\omega\mu r H_\phi \\ \frac{\partial}{\partial \theta} (\sin \theta H_\phi) - \frac{\partial H_\theta}{\partial \phi} &= j\omega\epsilon r \sin \theta E_r \\ -\frac{\partial}{\partial r} (r H_\phi) &= j\omega\epsilon r E_\theta \\ \frac{\partial}{\partial r} (r H_\theta) &= j\omega\epsilon r E_\phi \end{aligned} \right\} . \quad (7)$$

Аналогично можно рассмотреть поле магнитных волн. Примем $E_r = 0$. Тогда система уравнений (5) примет вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \theta} (\sin \theta E_\phi) - \frac{\partial}{\partial \phi} (E_\theta) &= -j\omega\mu r \sin \theta H_r \\ \frac{\partial}{\partial r} (r \sin \theta E_\phi) &= j\omega\mu r \sin \theta H_\theta \\ \frac{\partial}{\partial r} (r E_\theta) &= -j\omega\mu r H_\phi \\ \frac{\partial}{\partial \theta} (\sin \theta H_\phi) &= \frac{\partial H_\theta}{\partial \phi} \\ \frac{\partial H_r}{\partial \phi} - \frac{\partial}{\partial r} (r \sin \theta H_\phi) &= j\omega\epsilon r \sin \theta E_\theta \\ \frac{\partial}{\partial r} (r H_\theta) - \frac{\partial H_r}{\partial \theta} &= j\omega\epsilon r E_\phi \end{aligned} \right\} . \quad (8)$$

Используя алгоритм [11] для решения системы уравнений (7) и (8) удобно ввести вспомогательную функцию U и V :

$$E_\phi = \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial U'}{\partial \phi}, \quad E_\theta = \frac{1}{r} \frac{\partial U'}{\partial \theta}, \quad (9)$$

$$H_\phi = \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial V'}{\partial \phi}, \quad H_\theta = \frac{1}{r} \frac{\partial V'}{\partial \theta} \quad (10)$$

где $U' = \frac{\partial U}{\partial r}$, $V' = \frac{\partial V}{\partial r}$.

Более подробно проведённые вычисления представлены в [12].

Достоверность полученных результатов может быть подтверждена сравнением их с аналогичными характеристиками, полученными при компьютерном моделировании излучателя, размещенного на поверхности КА [13]. На рис. 2 приведена зависимость угломестной компоненты поля от пространственных координат, рассчитанная с

помощью приведенной выше методики, а на рис. 3 сечение этой зависимости плоскостью XOZ ($\phi=0$).

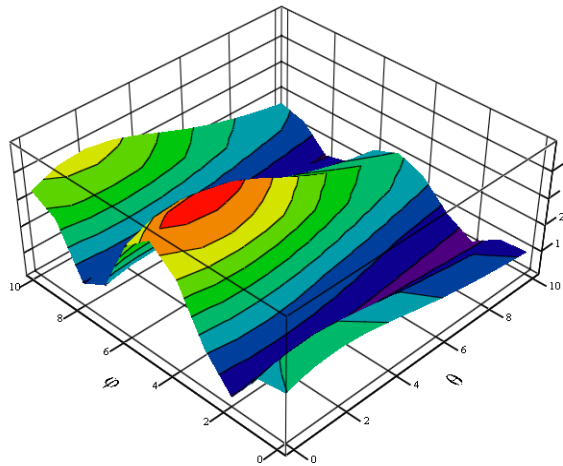


Рис. 2. Зависимость угломерной компоненты поля от пространственных координат

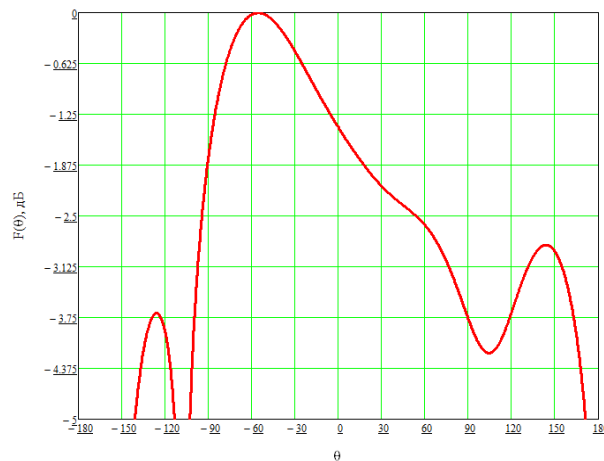


Рис. 3. Диаграмма направленности элементарного излучателя, полученная путем математического моделирования

В настоящий момент наблюдается активный процесс миниатюризации космической техники, в том числе и бортовых антенных систем [14]. В [15,16] рассмотрены пути построения антенных систем и предложено применение микрополосковых (печатных) антенн (МПА) в качестве бортовых антенн для класса малых КА. На рис. 4 представлена разработанная МПА на рабочей частоте 435 МГц для применения в составе сверхмалого КА серии «CubeSat».



Рис. 4. Фото макета КА «CubeSat» с образцом МПА

На территории антенного полигона «Научно–исследовательский институт электромеханики» (АО «НИИЭМ») были проведены измерения характеристик направленности исследуемого образца бортовой антенны.

На рис. 5 представлено сравнение диаграммы направленности бортовой антенны, полученной при применении предложенной в данной работе методики приближённого расчёта (см. рис. 3), и измеренной диаграммы направленности бортовой антенны сверхмалого КА «CubeSat» (см. рис. 4).

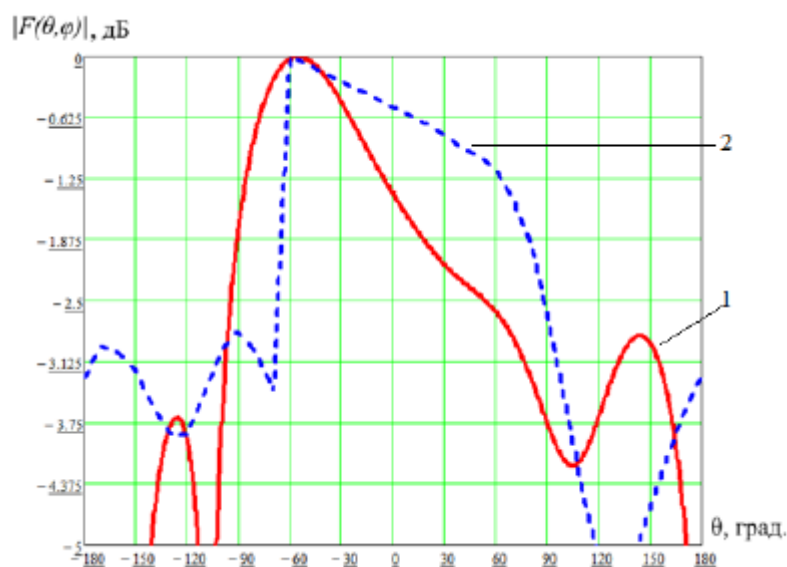


Рис. 5. Диаграмма направленности бортовой антенны: 1 – теоретическая; 2 – экспериментальная

Заключение

Асимметричная форма диаграммы направленности объясняется неравномерностью распределения тока по элементарному вибратору, связанной с размещением излучателя на выпуклой поверхности. Структура поля собственных волн элементарного излучателя зависит от его ориентации относительно полюса сферы, а также от радиуса сферы. Так как одним из предъявляемых требований к классу малых КА является уменьшение массогабаритных размеров бортовой антенной системы, то в данном разделе решена задача об излучении элементарного излучателя, размещённого на сфере малого радиуса. Поэтому кривизна поверхности внесла существенные изменения в диаграмме направленности элемента.

Основной лепесток (широкая часть диаграммы направленности) формируется как у обычного печатного излучателя, а именно излучением щелью (см. рис. 5). Боковой лепесток связан с вытеканием краевых токов на боковой поверхности, размеры которой составляют порядка $\lambda/4$, что и проявляется в формировании бокового лепестка.

В соответствии с теорией антенн [17], диаграмма направленности при изгибе плеча вибратора расширяется и приобретает асимметричную форму. Полученные результаты полностью соответствуют теории антенн.

Таким образом, предложенная методика позволяет на ранней стадии разработки бортовой антенной системы малых КА оценить влияние поверхности носителя на характеристики направленности [12,18].

Литература

1. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Исследование влияния корпуса космического аппарата на характеристики направленности бортовых антенн // Материалы конф. «Иосифьяновские чтения 2015». 2015. С. 61–63.
2. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Особенности бортовых антенно-фидерных устройств космических аппаратов // Сб. тезисов науч.-технич. семинара «Перспективы развития антенно-фидерных устройств летательных аппаратов». Истра: ОАО «НИИЭМ». 2013. С. 55–58.
3. Овчинникова Е.В., Шмачилин П.А., Кондратьева С.Г., Гаджиев Э.В. Исследование характеристик направленности бортовых антенн космических аппаратов на ранней стадии разработки. Электросвязь. 2016. № 7. С. 56–59.
4. Потехин А.И. Некоторые задачи дифракции электромагнитных волн. М.: Сов. радио. 1948.
5. Фок В.А. Проблемы дифракции и распространения электромагнитных волн. М.: Сов. радио. 1970.
6. Марков Г.Т., Чаплин А.Ф. Возбуждение электромагнитных волн. М.: Радио и связь. 1983.
7. Вайнштейн Л.А. Электромагнитные волны. М.: Сов. радио. 1957.
8. Васильев Е.Н. Возбуждение тел вращения. М.: Радио и связь. 1987.
9. Уфимцев П.Я. Основы физической теории дифракции. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. 2009.
10. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров. М.: Наука. 1964.
11. Гуревич А.Г. Полые резонаторы и волноводы. М.: Сов. радио. 1952.
12. Овчинникова Е.В., Шмачилин П.А., Кондратьева С.Г., Гаджиев Э.В. Методика приближённого расчёта характеристик направленности бортовых микрополосковых антенн малых космических аппаратов. Успехи современной радиоэлектроники. 2016. № 8. С. 15–27.
13. Гаджиев Э.В., Овчинникова Е.В., Шмачилин П.А. Исследование характеристик направленности бортовых антенн космических аппаратов на ранней стадии разработки путём компьютерного моделирования. В сборнике: Гагаринские чтения – 2016 Сборник тезисов докладов XLII Международной научной молодёжной конференции. В 4-х томах. 2016. С. 509–510.
14. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Миниатюризация бортовых антенно-фидерных устройств космических аппаратов. В книге: Перспективы развития антенно-фидерных устройств летательных аппаратов Материалы научно-технического семинара. 2013. С. 51–54.
15. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Пути построения малогабаритных, невыступающих бортовых антенных систем малых космических аппаратов. В сборнике: Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред Научный совет РАН по распространению радиоволн. 2014. С. 114–118.
16. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Антенны для малых космических аппаратов. В сборнике: Материалы круглого стола "Создание малых космических аппаратов. Актуальные проблемы и пути их решения" В рамках конференции "Иосифьяновские чтения". 2016. С. 190–197.
17. Воскресенский Д.И., В.Л. Гостюхин, Максимов В.М., Пономарёв Л.И. Устройства СВЧ и антенны. М.: Радиотехника. 2008.
18. Гаджиев Э.В., Кондратьева С.Г., Овчинникова Е.В. Математическое моделирование бортовых антенн космических аппаратов с учётом дифракции. В сборнике: Гагаринские чтения – 2016 Сборник тезисов докладов XLII Международной научной молодёжной конференции. В 4-х томах. 2016. С. 499–500.