



Научная статья

УДК 621.396.6

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=188275>

EDN: <https://www.elibrary.ru/QXEOLX>

АНТЕННА ЭЛЛИПТИЧЕСКОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ С ШИРОКОЙ ДИАГРАММОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ ДЛЯ СИНХРОНИЗАЦИИ РАДИОЛОКАТОРОВ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ

Д.Н. Мартынов, А.А. Василевский, С.В. Павлов[✉], К.К. Башмаков

Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Пульсар»,
г. Москва, Россия

✉ stepan_cosmo@mail.ru

Цитирование: Мартынов Д.Н., Василевский А.А., Павлов С.В., Башмаков К.К. / Антенна эллиптической поляризации с широкой диаграммой направленности для синхронизации радиолокаторов с синтезированной апертурой // Труды МАИ: электрон. журнал. № 148. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=188275>

Аннотация. При дистанционном зондировании Земли в режиме тандемной бистатической съемки требуется синхронизация двух космических аппаратов. При этом они могут находиться в произвольном положении относительно друг друга. Следовательно, необходимо использовать антенны с эллиптической поляризацией и широкой диаграммой направленности. Целью работы является проектирование антенны круговой поляризации с широкой диаграммой направленности (порядка 180 градусов) в S-диапазоне частот.

Проведен перенос рабочей частоты антенны из X-диапазона в S-диапазон с последующей модернизацией полученной конструкции. Произведено проектирование антенны с последующим электродинамическим расчётом в системе автоматического проектирования CST Microwave Studio. Измерены радиотехнические параметры изготовленной антенны. Проведено сравнение радиотехнических характеристик электродинамической модели и изготовленной антенны.

Получены результаты, свидетельствующие о возможности создания антенны эллиптической поляризации с широкой диаграммой направленности в S-диапазоне. Произведено сравнение электродинамической модели и изготовленной антенны. Сравнение показало соизмеримость рассчитанных и измеренных радиотехнических характеристик антенны.

Ключевые слова: широкая диаграмма направленности; антенны космических аппаратов; эллиптическая поляризация; резонатор; метод электродинамического подобия; электродинамическое моделирование; радиолокатор с синтезированной апертурой; бистатический режим; метод «вышки»; измерение радиотехнических характеристик; метод двух антенн.

WIDE BEAM ELLIPTICAL POLARIZATION ANTENNA FOR SYNCHRONIZING SYNTHETIC APERTURE RADARS

D.N. Martynov, A.A. Vasilevsky, S.V. Pavlov✉, K.K. Bashmakov

Joint Stock Company "Scientific Production Enterprise "Pulsar", Moscow, Russia

✉ stepan_cosmo@mail.ru

Citation: Martynov D.N., Vasilevsky A.A., Pavlov S.V., Bashmakov K.K. Wide beam elliptical polarization antenna for synchronizing synthetic aperture radars // Trudy MAI. 2026. No. 148. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=188275>

Abstract. Tandem bistatic remote sensing of the Earth requires synchronization of two spacecraft. They can be in arbitrary positions relative to each other. Therefore, it is necessary to use antennas with elliptical polarization and a wide radiation pattern. The objective of this study is to design a circularly polarized antenna with a wide radiation pattern (approximately 180 degrees) in the S-band.

The antenna's operating frequency was transferred from the X-band to the S-band, followed by a design upgrade. The antenna was designed and subsequently electrostatically calculated using the CST Microwave Studio automated design system. The radiotechnical parameters of the manufactured antenna were measured. The radiotechnical characteristics of the electrodynamic model and the manufactured antenna were compared.

The obtained results indicate the feasibility of creating an elliptically polarized antenna with a wide radiation pattern in the S-band. A comparison of the electrodynamic model and the manufactured antenna was made. The comparison showed the commensurability of the calculated and measured radiotechnical characteristics of the antenna.

Keywords: wide beam pattern; spacecraft antennas; elliptical polarization; resonator; electrodynamic similarity method; electrodynamic modeling; synthetic aperture radar; bistatic mode; tower method; measurement of radio technical characteristics; two-antenna method.

Введение

Развитию радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) с возможностью бистатического режима съемки способствовала реализация миссии шаттла Endeavour с радаром Shuttle Radar Topography Mission на борту [1]. В ходе данной миссии за 11 суток была осуществлена съемка 80% суши в интерферометрическом режиме С и Х диапазонов частот [2]. На данный момент множество группировок космических аппаратов с системами РСА имеют возможность реализации съемки в бистатическом режиме. Например, к таким системам относятся Cosmo-SkyMed, Tandem-X и многие другие. Механизм данного режима съемки заключается в получении комплексного радиолокационного изображения [3] двумя системами РСА, расположенными на определенном расстоянии, называемом радиолокационной базой. При этом каждое комплексное радиолокационное изображение обладает свойством внутренней когерентности, но не являются взаимно когерентными. Данное обстоятельство не позволяет достичь максимальной эффективности интерферометрической съемки [4]. Для достижения когерентности требуется использовать специальные антенны и специальную аппаратуру [5, 6]. Когерентность двух изображений достигается путем синхронизации обеих РСА.

В данной работе разрабатывается антенна для передачи синхросигнала с одного космического аппарата на другой. К этой антенне предъявляются требования по поляризации и ширине диаграммы направленности. Покрытие

диаграммами направленности всех возможных направлений требуется из условия, что космические аппараты при работе могут находиться в произвольном положении относительно друг друга. По этой же причине возникает необходимость использования антенн эллиптической поляризации. Требования к ширине диаграммы направленности антенны возникают из условия расположения на борту двух антенн. Так же к антенне предъявляются требования по массогабаритным и радиотехническим характеристикам. Требования к антенне сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Требования к антенне

Предъявляемое требование	Значение
Центральная частота	2100 МГц
Рабочая полоса частот	2100 ± 25МГц
Коэффициент усиления	не менее минус 1 дБ в рабочей полосе частот
Поляризация	эллиптическая (коэффициенты эллиптичности не более 15 дБ)
Коэффициент стоячей волны	не более 1,5 в рабочей полосе частот
Масса	не более 0,6 кг
Габариты	Не более 250 мм по всем осям

Процесс разработки начинается с поиска прототипа антенны и построения ее электродинамической модели.

Метод электродинамического подобия

Метод электродинамического подобия заключается в линейности основных уравнений электродинамики – уравнений Максвелла с учетом материальных уравнений (уравнение 1).

$$\begin{aligned}
 \operatorname{rot} H &= \frac{dD}{dt} + j \\
 \operatorname{rot} E &= -\frac{dB}{dt} \\
 \operatorname{div} D &= p \\
 \operatorname{div} B &= 0 \\
 j &= \sigma E + j_{cm} \\
 D &= \varepsilon \varepsilon_0 E \\
 B &= \mu \mu_0 H
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где H – напряженность магнитного поля;

E – напряженность электрического поля;

D – электрическая индукция;

B – магнитная индукция

j – сила тока;

ρ – плотность заряда.

Данный метод используется для исследования характеристик электромагнитных систем на моделях, которые в некотором масштабе являются подобием реальных систем. При изменении некоторых параметров поля и среды в определенном соотношении характеристики излучения остаются без изменения [7].

Метод электродинамического моделирования

Моделирование проводится в системе автоматического проектирования (САПР) CST Microwave Studio методом конечных разностей во временной области. CST Microwave Studio мощный комплекс, предназначенный для трехмерного моделирования объектов разнообразной формы. Одной из важных особенностей данной САПР является возможность полной параметризации модели, проектируемой структуры [8].

Суть метода конечных разностей во временной области заключается в решение системы уравнений Максвелла через конечно-разностные схемы для каждого дискрета пространства. Вывод конечно-разностных схем рассмотрены в статьях [9, 10]. Конечно-разностная схема записывается как система уравнений для электрического (система уравнений 2) и магнитного (система уравнений 3) полей.

$$\begin{cases} E_x[i, j, k]_{n+1} = E_x[i, j, k]_n + \frac{\Delta t}{\epsilon \epsilon_0} \left(\frac{H_z[i, j, k] - H_z[i, j-1, k]}{\Delta y} - \frac{H_y[i, j, k] - H_y[i, j, k-1]}{\Delta z} \right) \\ E_y[i, j, k]_{n+1} = E_y[i, j, k]_n - \frac{\Delta t}{\epsilon \epsilon_0} \left(\frac{H_x[i, j, k] - H_x[i, j, k-1]}{\Delta z} - \frac{H_z[i, j, k] - H_z[i-1, j, k]}{\Delta x} \right) \\ E_z[i, j, k]_{n+1} = E_z[i, j, k]_n + \frac{\Delta t}{\epsilon \epsilon_0} \left(\frac{H_y[i, j, k] - H_y[i-1, j, k]}{\Delta x} - \frac{H_x[i, j, k] - H_x[i, j-1, k]}{\Delta y} \right) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} H_x[i, j, k] += -\frac{\Delta t}{\mu\mu_0} \left(\frac{E_z[i, j+1, k] - E_z[i, j, k]}{\Delta y} - \frac{E_y[i, j, k+1] - E_y[i, j, k]}{\Delta z} \right) \\ H_y[i, j, k] += -\frac{\Delta t}{\mu\mu_0} \left(\frac{E_x[i, j, k+1] - E_x[i, j, k]}{\Delta z} - \frac{E_z[i+1, j, k] - E_z[i, j, k]}{\Delta x} \right), \\ H_z[i, j, k] += -\frac{\Delta t}{\mu\mu_0} \left(\frac{E_y[i+1, j, k] - E_y[i, j, k]}{\Delta x} - \frac{E_x[i, j+1, k] - E_x[i, j, k]}{\Delta y} \right) \end{cases}, \quad (3)$$

где i, j, k – номер дискрета по осям OX, OY, OZ ;

Δt – дискрет по времени;

$\Delta x, \Delta y, \Delta z$ – дискреты пространства по осям OX, OY, OZ ;

ϵ, ϵ_0 – относительная и абсолютная диэлектрическая проницаемость;

μ, μ_0 – относительная и абсолютная магнитная проницаемость;

Данная схема применяется к каждому дискрету пространства, называемого ячейкой Yee (рисунок 1).

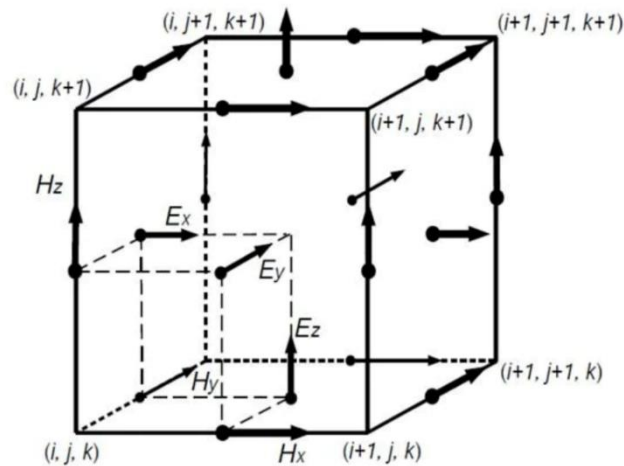


Рисунок 1 – ячейка Yee

Конечно-разностные уравнения позволяют определить электрическое и магнитное поля в данный момент времени на основании известных значений полей в предыдущий момент времени и при заданных начальных условиях.

Данный метод позволяет распараллелить выполняемые задачи и перенаправить часть вычислений на графический процессор, что ускоряет время расчетов в разы.

Методы измерения радиотехнических характеристик

Коэффициент усиления (КУ) антенны характеризует ее способность концентрировать излучаемую мощность в заданном направлении по сравнению с

изотропным излучателем. Метод двух антенн применяется для измерения КУ без использования эталонной антенны с известными параметрами.

При абсолютных методах измерения используется уравнение связи между двумя антеннами с согласованной поляризацией, расположенными в дальней зоне друг друга. В наиболее простом случае для системы двух антенн мощность P_{Π} , поступающая в согласованную нагрузку приемной антенны (на вход приемного устройства), вычисляется по формуле (4).

$$P_{\Pi} = P_{\Gamma} \cdot G_1 \cdot G_2 \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2, \quad (4)$$

где P_{Γ} – мощность, поступающая на вход излучающей антенны с выхода генератора;

λ – длина волны;

R – расстояние между антеннами;

G_1 и G_2 – коэффициенты усиления излучающей и приемной антенн соответственно.

Уравнение (4) является эталонным для определения КУ. Если обе антенны идентичны и их КУ можно считать одинаковыми, то их КУ в логарифмической форме записываются в соответствии с формулой (5).

$$G_1 = G_2 = \frac{1}{2} \left(20 \lg \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) - 10 \lg \left(\frac{P_{\Gamma}}{P_{\Pi}} \right) \right), \quad (5)$$

Процедура, с помощью которой можно вычислить коэффициенты усиления антенн заключается в том, что сначала измеряется длина волны, расстояние между антеннами и отношение мощностей P_{Γ}/P_{Π} , потом вычисляется G_1 . Существенным недостатком такого метода является необходимость использования для высокоточных измерений двух идентичных антенн, что не всегда является возможным. Наилучшие результаты с использованием метода двух антенн можно получить для антенн простой конструкции, когда коэффициент полезного действия антенны не будет значительно изменяться от

изделия к изделию при имеющемся качестве изготовления. Контроль качества изготовления антенн и их идентичности частично может осуществляться измерением параметров согласования по входу антенны [11].

Диаграмма направленности (ДН) антенны характеризует пространственное распределение излучаемой мощности и является одной из основных ее характеристик. Для корректного измерения ДН необходимо соблюдение условия дальней зоны, которое определяется формулой (6).

$$R \geq \frac{2D^2}{\lambda}, \quad (6)$$

где R – расстояние от антенны до точки измерения;

D – максимальный линейный размер антенны;

λ – длина волны.

Измерение ДН антенны проводилось в дальней зоне методом «вышки». Метод измерений с использованием поля излучения вспомогательной антенны в дальней зоне является наиболее традиционным и широко распространенным в антенной практике. Он применяется преимущественно для тестирования антенн, установленных на опорно-поворотных устройствах (ОПУ). При этом измеряемая и измерительная антенны располагаются на значительном расстоянии друг от друга и на такой высоте, которая гарантирует прямую видимость и отсутствие препятствий вблизи линии связи. Взаимное расположение выбирается с целью минимизации влияния отражений от земли, причём одна или обе антенны монтируются на мачтах или вышках. Именно эта особенность монтажа позволяет условно называть данный подход методом «вышки» (рисунок 2) благодаря характерному использованию высотных конструкций для размещения антенн в дальней зоне.

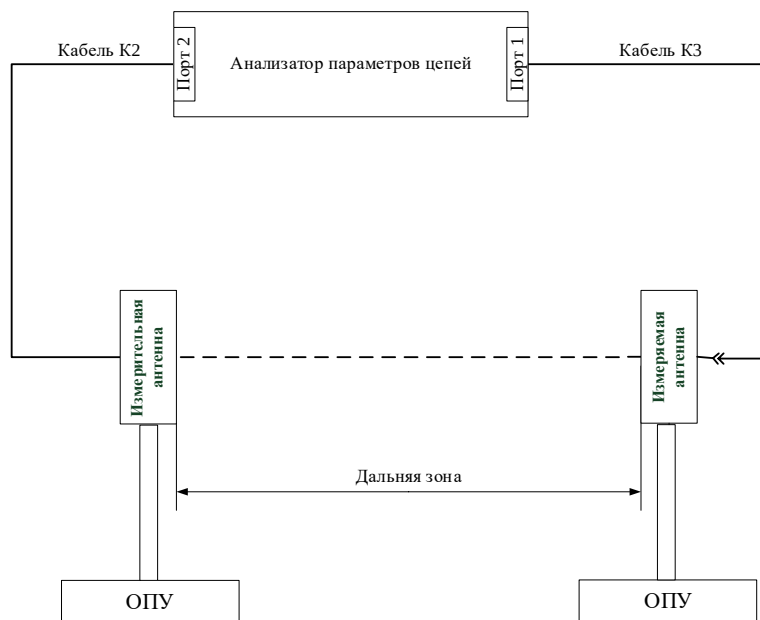


Рисунок 2 – Схема стенда измерений диаграммы направленности антенны методом «вышки» в дальней зоне

При измерении ДН измеряемую антенну визируют на измерительную антенну. Последовательно перемещая ее по двум координатам, а зачастую, если измерительная антенна не имеет жесткой привязки к местности, поворачивая и ее, определяют некоторый характерный уровень ДН, например, главный максимум. Затем, изменяя угловое положение измеряемой антенны, в той или иной плоскости, промеряют плоское сечение ее объемной характеристики направленности, то есть ДН в данном сечении. Для уменьшения погрешности за счет параллакса желательно устанавливать антенну на поворотном устройстве так, чтобы все его оси или, по крайней мере, ось, нормальная к плоскости измеряемого сечения диаграммы, проходили через фазовый центр. Особенно это важно при измерении фазовых ДН. В противном случае надо вводить поправки на перемещение в пространстве фазового центра антенны. При измерении азимутальных сечений диаграмм при фиксированных углах места влияние земли, местных предметов и атмосферы значительно снижается. Поэтому желательно, чтобы при измерении в другой главной плоскости диаграммы исследуемая антенна была развернута на 90° вокруг электрической оси. При линейной или эллиптической поляризации должна быть соответственно развернута и вспомогательная антенна.

Коэффициент стоячей волны (КСВ) характеризует степень согласования

антенны с фидерной линией и определяется по формуле (7).

$$КСВ = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|}, \quad (7)$$

где Γ – коэффициент отражения.

Методика измерения КСВ с использованием векторного анализатора цепей (ВАЦ):

— ВАЦ калибруется однопортовой калибровкой в рабочем диапазоне частот (короткое замыкание, холостой ход, согласованная нагрузка);

— антенна подключается к порту ВАЦ через фидерную линию (коаксиальный кабель);

— ВАЦ измеряет коэффициент отражения S_{11} , который равен Γ ;

— КСВ вычисляется автоматически или по формуле (7).

На рисунке 3 показана антенна в «мини» безэховой камере, где происходит измерение коэффициента отражения S_{11} .

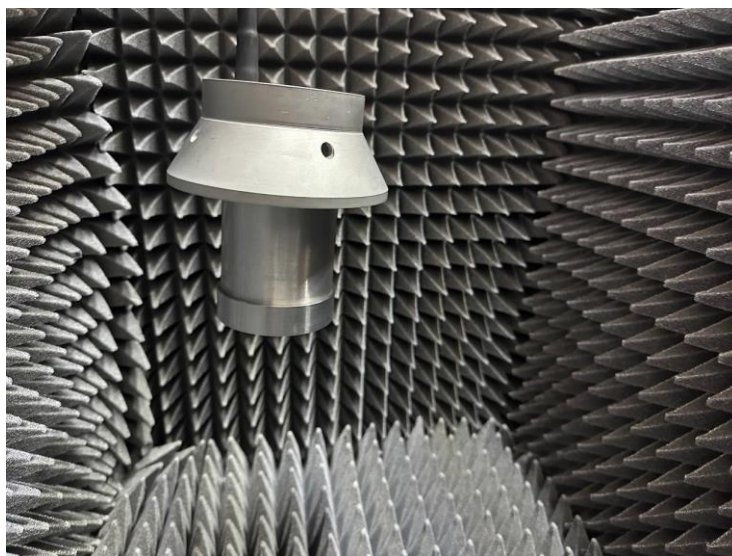


Рисунок 3 – Антенна в «мини» безэховой камере

Схема измерения коэффициента отражения показана на рисунке 4.



Рисунок 4 – Схема измерения коэффициента отражения

Результаты электродинамического моделирования

В патенте [12] описана антенна, удовлетворяющая по требованиям поляризации и ширины ДН. По описанию, ширина ДН составляет более 180 градусов, поляризация эллиптическая. Рабочая частота данной антенны 8,2 ГГц.

В патенте параметры антенны приведены в некотором диапазоне значений, выраженных в длине волны. По этим данным были определены размеры для моделирования антенны (рисунок 5), представленные в таблице 2.

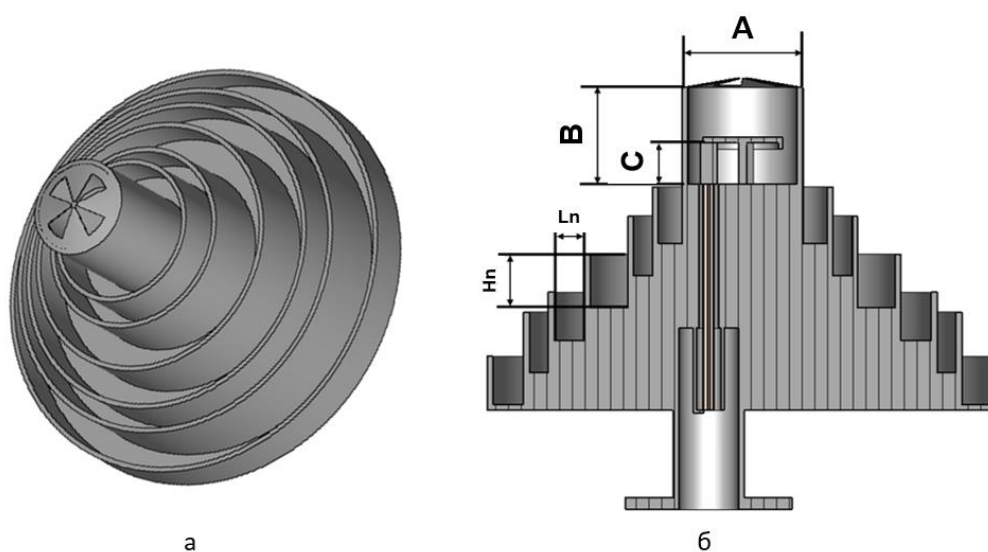


Рисунок 5 – Модель антенны, представленной в патенте: а) изометрическое изображение; б) изображение в разрезе.

Таблица 2

Значения параметров антенны из патента		
Обозначение параметра	Диапазон размера в длине волны, λ	Размер для моделирования*, мм
A	0,48 – 0,51	18,3
B	0,45 – 0,5	18,3
C	<0,22	8
Ln	0,07 – 0,17	2,5 – 6,2
Hn	0,21 – 0,28	7,6 – 10,2

* – значения округлены для возможности изготовления антенны

Радиотехнические характеристики моделируемой антенны представлены на рисунке 6.

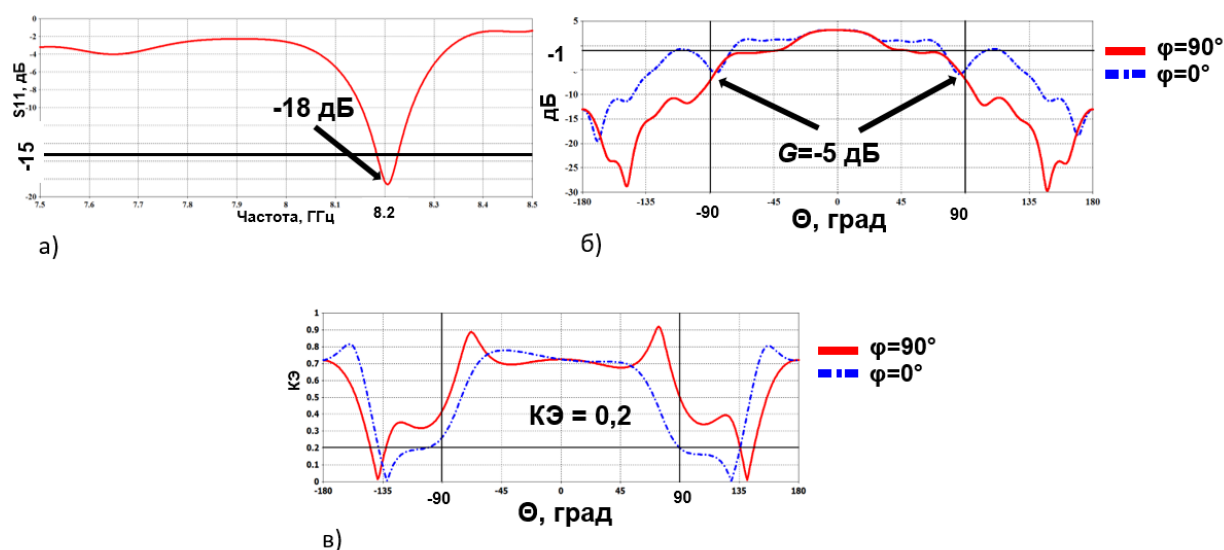


Рисунок 6 – Характеристики антенны в X-диапазоне: а) коэффициент отражения; б) коэффициент усиления в сечениях $\varphi = 0$ и $\varphi = 90$ градусов; в) коэффициент эллиптичности в сечениях $\varphi = 0$ и $\varphi = 90$ градусов

Результаты электродинамического моделирования сходятся с представленными в патенте результатами.

Теперь необходимо перенести рабочую частоту с 8,2 ГГц на частоту 2,1 ГГц. Для этого будем пропорционально изменять все размеры антенны. Размеры для моделирования антенны представлены в таблице 3.

Таблица 3

Значения параметров антенны S-диапазона

Обозначение параметра	Диапазон размера в длине волны, λ	Размер для моделирования*, мм
A	0,48 – 0,51	71
B	0,45 – 0,5	71
C	<0,22	31
Ln	0,07 – 0,17	10-24
Нn	0,21 – 0,28	30-40

* – значения округлены для возможности изготовления антенны

Радиотехнические характеристики антенны, моделируемой для S-диапазона частот, представлены на рисунке 7.

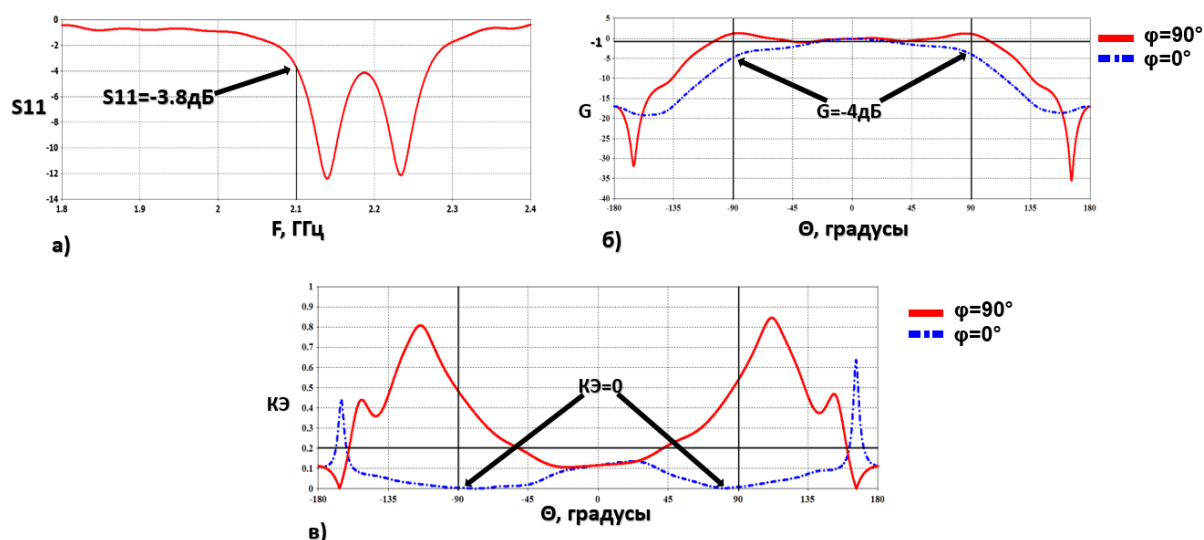


Рисунок 7 – Характеристики антенны в S-диапазоне: а) коэффициент отражения; б) коэффициент усиления в сечениях $\varphi = 0$ и $\varphi = 90$ градусов; в) коэффициент эллиптичности в сечениях $\varphi = 0$ и $\varphi = 90$ градусов.

На рисунке 7а видно, что коэффициент отражения на требуемой частоте больше минус 4 дБ, что не подходит для антенны по требуемым значениям.

Анализ данных выявил необходимость оптимизации характеристик антенны:

- коэффициента стоячей волны по напряжению;
- амплитудной диаграммы направленности;
- поляризационной диаграммы направленности.

Для этого нужно согласовать резонатор на рабочую частоту, далее добавить согласующий элемент – рефлектор для оптимизации поляризационных диаграмм направленности и возможности размещения ответной части крепежа – кронштейна и затем доработать конструкция.

Рассмотрим характеристики резонатора в отсутствии рефлектора (рисунок 8).

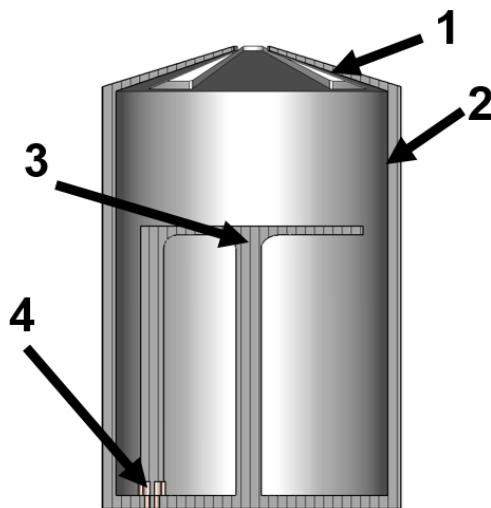


Рисунок 8 – Резонатор в разрезе: 1 – крышка, 2 – круглый волновод, 3 – поляризатор, 4 – втулка

Радиотехнические характеристики резонатора приведены на рисунке 9.

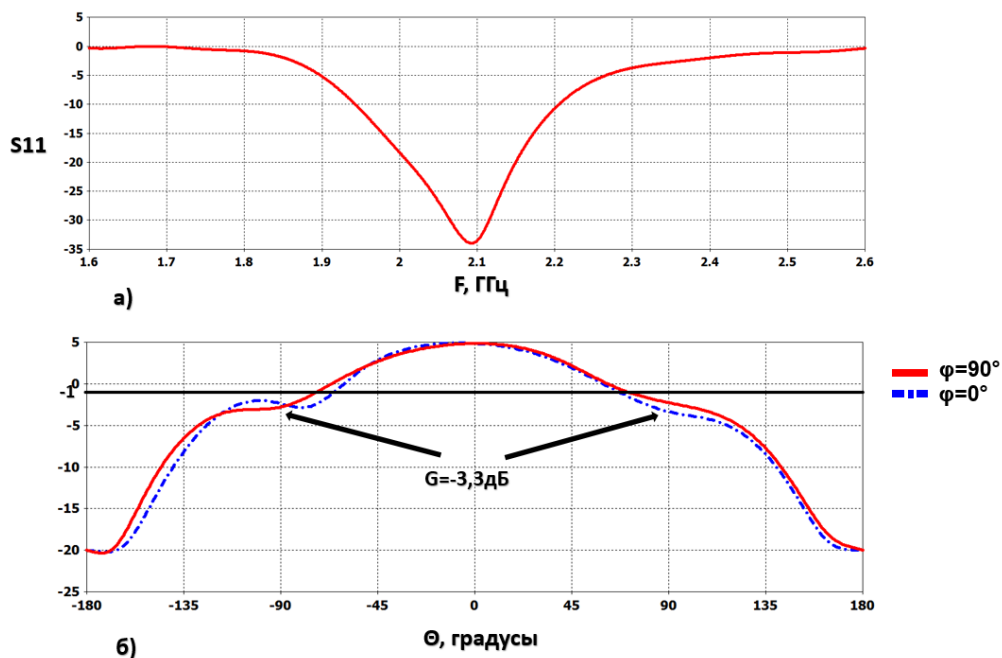


Рисунок 9 – Характеристики резонатора: а) коэффициент отражения;
б) коэффициент усиления

На рисунке 9а видно, что коэффициент отражения на требуемой частоте менее минус 30 дБ, что подходит для антенны по требуемым значениям.

Для улучшения диаграммы направленности рассмотрим различные варианты рефлекторов:

- конический рефлектор вниз
- диск
- конический рефлектор вверх.

Два вида рефлекторов, а именно: конический вниз и диск, привели к ухудшению коэффициента усиления и поляризации антенны в требуемом диапазоне углов. Характеристики резонатора с различными рефлекторами приведены на рисунке 10.

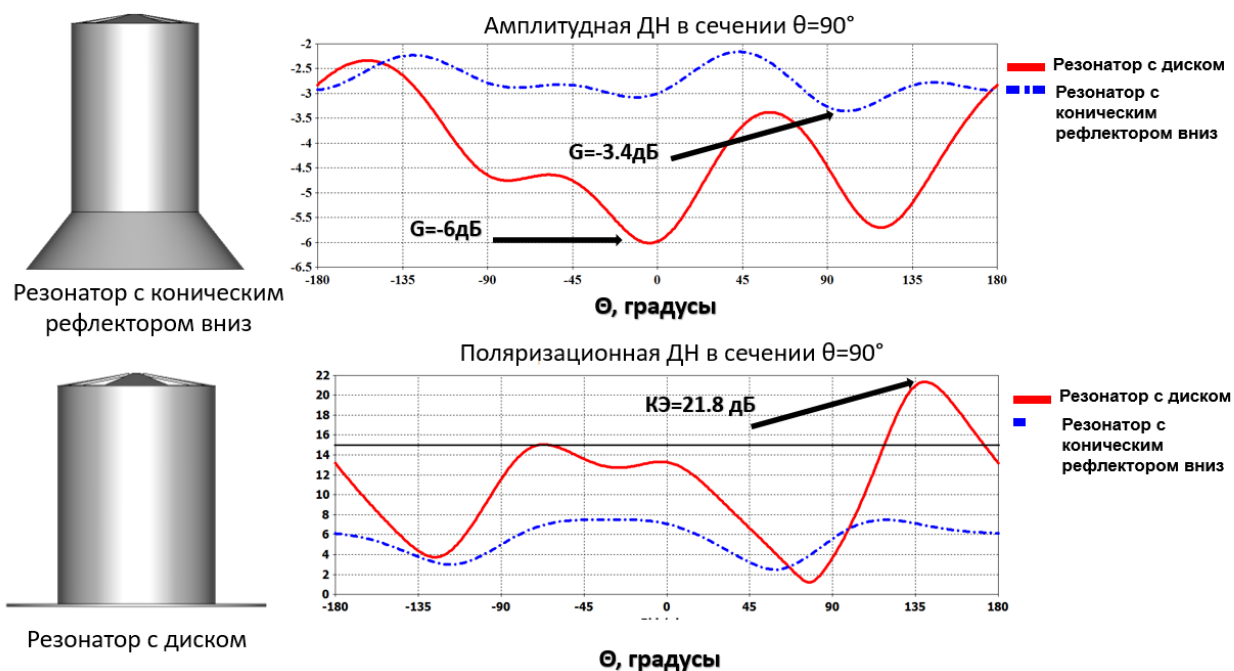


Рисунок 10 – Коэффициент усиления и поляризация резонатора с различными рефлекторами

Лучшим вариантом оказался резонатор с коническим рефлектором вверх (рисунок 11). Его характеристики приведены на рисунке 12. Расчет и описание данной антенны приводится в статье [13].

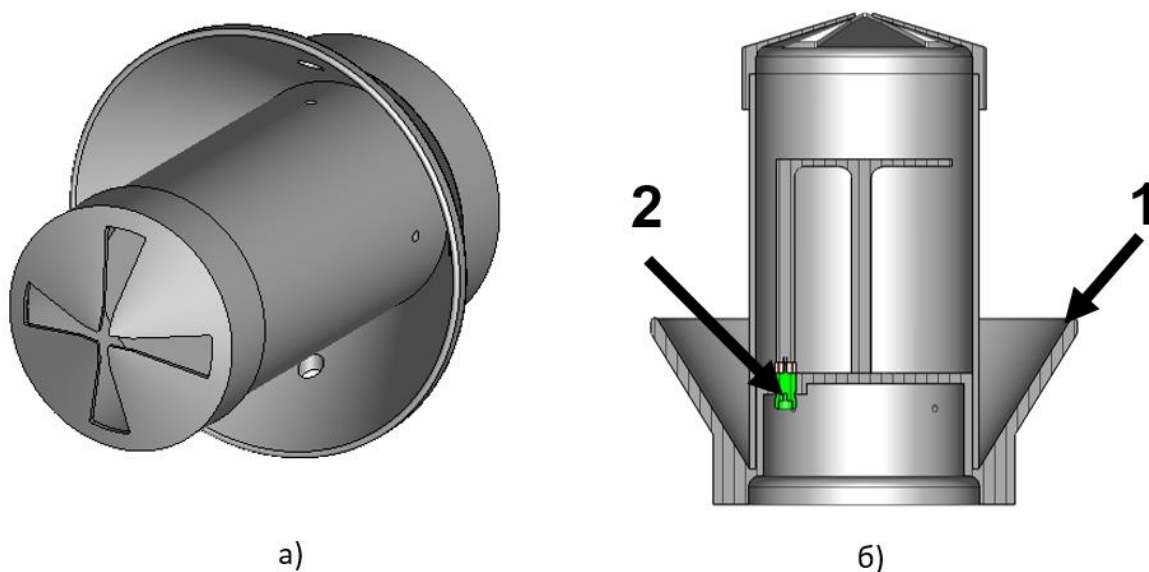


Рисунок 11 – Антенна с коническим рефлектором вверх: а) изометрическое изображение; б) антенна в разрезе: 1 – основание, 2 – разъем

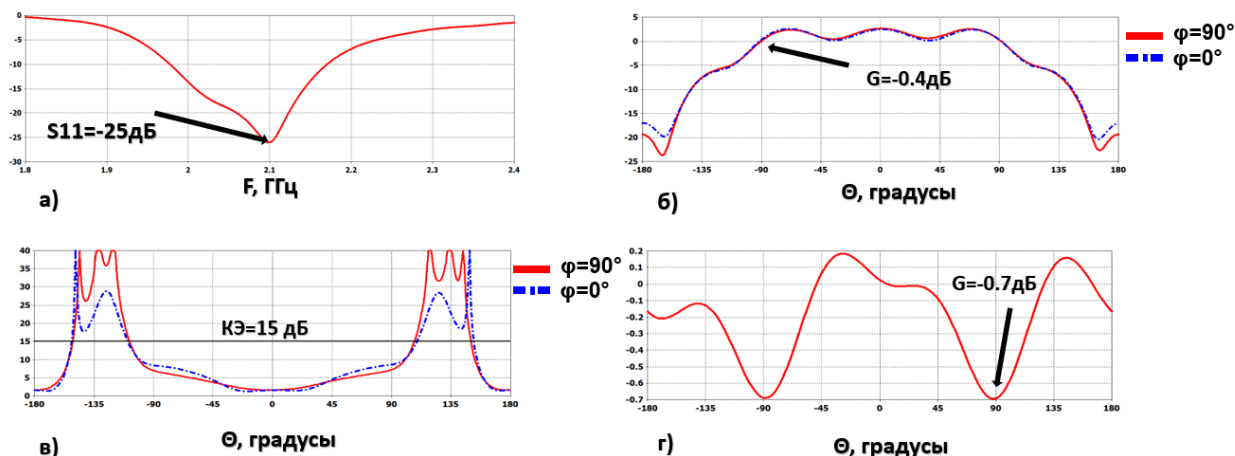


Рисунок 12 – Характеристики резонатора с коническим рефлектором вверх: а) коэффициент отражения; б) коэффициент усиления в сечениях $\varphi = 0$ и $\varphi = 90$ градусов; коэффициент эллиптичности в сечениях $\varphi = 0$ и $\varphi = 90$ градусов; коэффициент усиления в сечении $\Theta = 90$ градусов

Рисунок 12 показывает, что антенна, представленная на рисунке 11, удовлетворяет заданным требованиям.

Следующим этапом является производство антенны для сравнения рассчитанных и реальных радиотехнических характеристик антенны. Изготовленная антенна показана на рисунке 13. Сравнение рассчитанных и измеренных характеристик представлены на рисунках 14 и 15.

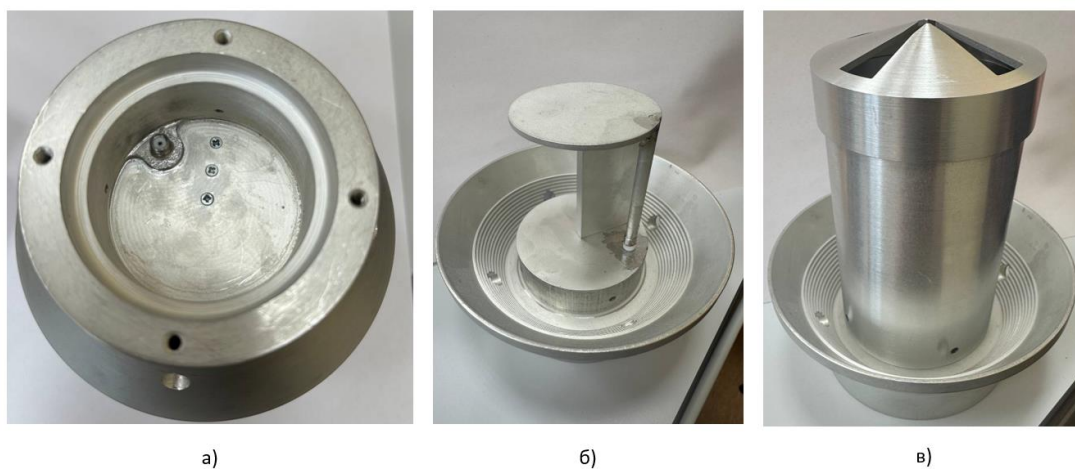


Рисунок 13 – Вид изготовленной антенны: а) со стороны разъёма; б) без волновода и крышки; в) в сборе

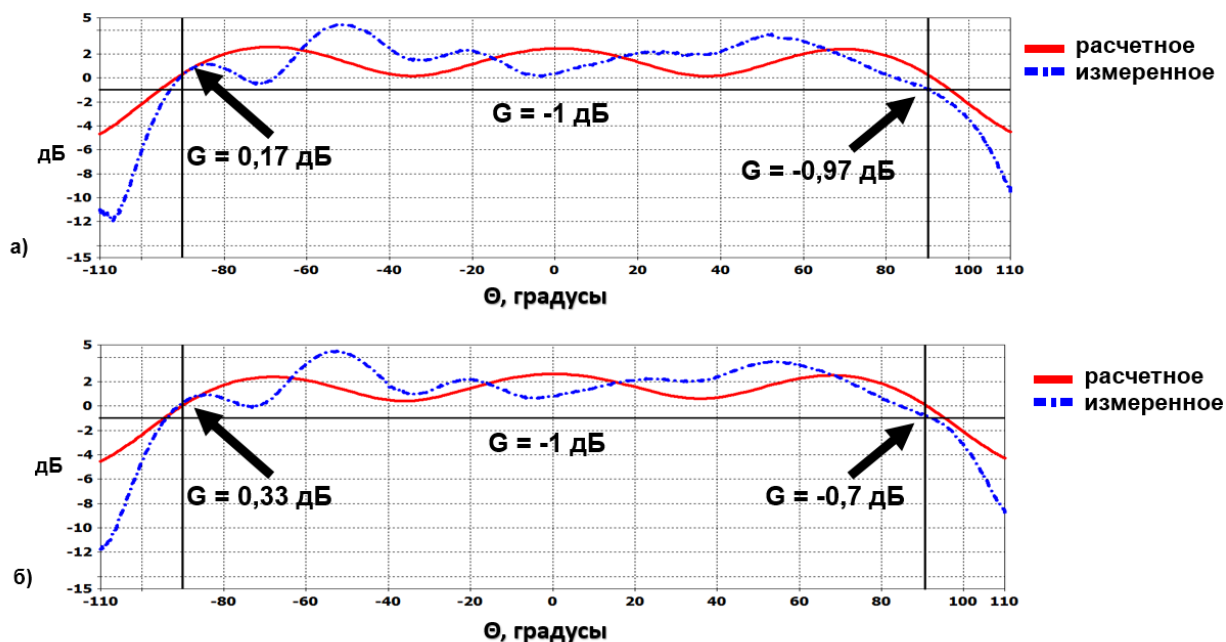
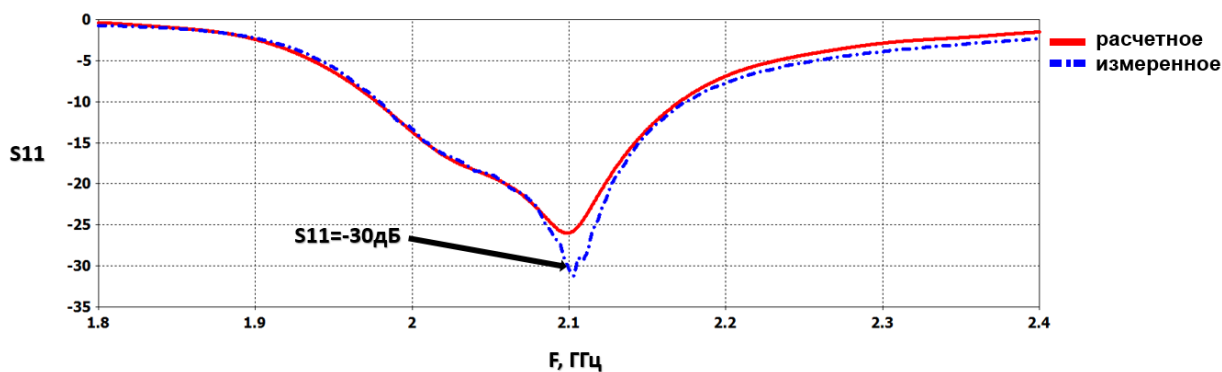


Рисунок 14 – Коэффициент усиления антенны в сечениях: а) $\varphi = 0$ градусов; б) $\varphi = 90$ градусов



По рисункам 14 и 15 заметно, что рассчитанные и измеренные характеристики сходятся с некоторой точностью. Также измеренные характеристики удовлетворяют требуемым значениям.

Был проведен перенос рабочей частоты антенны, представленной в патенте. Полученная в результате применения метода электродинамического подобия антенна не удовлетворяет техническим требованиям. Поэтому было принято решение о исследовании радиотехнических характеристик электродинамической модели резонатора и различных форм рефлекторов. Из предложенных рефлекторов в рамки заявленных требований к радиотехническим характеристикам подходит только конический рефлектор вверх.

По электродинамической модели была произведена антенна. Проведено сравнение радиотехнических характеристик электродинамической модели и

изготовленной антенны. Результаты модели и изготовленной антенны различаются незначительно и можно сделать вывод об адекватности электродинамической модели антенны.

При модернизации конструкции антенны также были уменьшены массогабаритные характеристики антенны. Масса готового образца антенны составляет 524 грамма, а размеры по ширине, длине и высоте составляют 120, 120 и 138 мм соответственно.

Результаты данной работы были обсуждены на научном семинаре ВИНТИ РАН [14], где получили положительную оценку.

Заключение

Разработанная антенна, обладающая эллиптической поляризацией и широкой диаграммой направленности, представляет собой оптимальное техническое решение для обеспечения надежной радиолинии синхронизации в перспективных системах РСА космического базирования.

Применение эллиптической (в частности, близкой к круговой) поляризации принципиально важно для тандемных бистатических систем. В условиях космического полета взаимная ориентация двух космических аппаратов и их бортовых антенн не может быть идеально стабильной и предсказуемой. В отличие от линейной поляризации, эллиптическая поляризация устраняет необходимость в прецизионном поддержании углового положения антенн относительно друг друга, исключая потери сигнала из-за поляризационной рассогласованности. Это гарантирует стабильный уровень принимаемого синхросигнала независимо от изменения углов крена, рыскания и тангажа ведущего и ведомого космического аппарата с РСА на борту.

Широкая диаграмма направленности антенны решает проблему поиска и захвата сигнала в условиях ограниченной точности взаимной ориентации аппаратов. На этапе вхождения в связь и в процессе штатной съемки ведомый космический аппарат может находиться в широком секторе углов относительно ведущего. Широкая ДН обеспечивает устойчивый канал передачи синхросигнала без применения сложных и энергозатратных электромеханических систем

наведения, что критически важно для микроспутниковых платформ и аппаратов с жестким лимитом энергопотребления.

Совокупность описанных свойств позволяет эффективно реализовать тандемный бистатический режим съемки. Передача высокостабильного синхросигнала через такую антенну обеспечивает когерентность обработки отраженных зондирующих сигналов, принятых двумя разнесенными в пространстве космическими аппаратами. Это, в свою очередь, является ключевым условием для получения качественных интерферометрических данных, например, для построения цифровых моделей рельефа местности или обнаружения смещений земной поверхности.

Разработанная антенна не просто выполняет функцию передачи синхросигнала, а снимает основные аппаратные ограничения бистатической схемы, повышая отказоустойчивость системы и упрощая конструкцию космических аппаратов. Ее применение открывает возможности для создания распределенных космических систем РСА с гибкой пространственной конфигурацией.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Список источников

1. Павлов С. В. Построение радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны для систем дистанционного зондирования Земли космического базирования: зарубежный опыт // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2025. Т. 208. № 5. С. 21–35.
2. Зенин К. А. Разработка модели оценки пространственного разрешения космического радиолокатора синтезированной апертуры // Труды МАИ. 2017. № 96. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=85931>

3. Гаврилов К.Ю., Каменский К.В., Малютина О.А. Моделирование траекторного сигнала в радаре с синтезированием апертуры на основе оптических изображений земной поверхности // Труды МАИ. 2021. № 118. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=158252>. DOI: 10.34759/trd-2021-118-12
4. Вербa, В.С. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / В.С. Вербa, Л.Б. Неронский, И.Г. Осипов, В.Э. Турук; под ред. В.С. Вербa. – М.: Радиотехника, 2010 – 680 с.
5. Груздов, В.В. Новые технологии дистанционного зондирования Земли из космоса / В.В. Груздов, Ю.В. Колковский, А.В. Криштопов, А.И. Кудря.– Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2018. – 482 с. ISBN 978-5-94836-502-2
6. Занин К. А. / Разработка модели основных параметров космического радиолокационного бистатического интерферометра // Труды МАИ. – 2018. - № 102. – С. 21.
7. А.Г. Генералов, Э.В. Гаджиев, М.Р. Салихов / Применение антенного изделия при проектировании бортовых антенно-фидерных устройств // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2020. Т. 174. №1. С. 43-51.
8. Овчинникова Е.В., Шмачилин П.А., Кондратьева С.Г., Гаджиев Э.В., Павлов С.В., Чекулов В.Р. Обзор систем автоматического проектирования // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2024. Т. 198. № 1. С. 39-46.
9. Овчинникова Е.В., Шмачилин П.А., Кондратьева С.Г., Гаджиев Э.В., Павлов С.В., Чекулов В.Р. Обзор численных методов решения задач электродинамики // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2024. Т. 198. № 1. С. 17-25.
10. Овчинникова Е.В., Шмачилин П.А., Кондратьева С.Г., Гаджиев Э.В., Павлов С.В. Применение метода конечных разностей во временной области для расчета направленных свойств двумерных излучающих структур // Труды МАИ. 2024. № 137. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=181880>
11. Л.Н. Захарьев, А.А. Леманский, В.И. Турчин и др., под редакцией Н.М. Цейтлина «Методы измерения характеристик антенн СВЧ». – М.: Радио и связь, 1985.

12. Пат. 2680110 С1 Российская Федерация, МПКН 01Q 1/28. Антенна эллиптической поляризации: / В.П. Бычков, Ю.А. Гуревич, П.И. Гусев; заявитель Российская Федерация, от имени которой выступает Государственная корпорация по космической деятельности «Роскосмос». – № 2018119352; заявл. 25.05.2018; опубл. 15.02.2019, Бюл. № 5.

13. Шмачилин П.А., Василевский А.А., Павлов С.В., Башмаков К.К. / Антенна передачи синхросигнала для реализации бистатического режима съемки радиолокаторов с синтезированной апертурой космического базирования // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. 2025. № 3 (278). с. 31-41

14. Электронный ресурс. <https://www.viniti.ru/tpost/998zlxj5m1-v-vinitiran-sostoyalsya-nauchnii-semina> (Дата обращения: 15.12.2025).

References

1. Pavlov S. V. Construction of synthetic antenna aperture radars for space-based earth remote sensing systems: foreign experience // Electromechanical matters. VNIIEМ studies. 2025. Vol. 208. № 5. P. 21–35.

2. Zenin K. A. Development of a model for assessing the spatial resolution of a space-based synthetic aperture radar // Trudy MAI. 2017. No. 96. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=85931> DOI: 10.34759/trd-2021-118-12

3. Gavrilov K.Yu., Kamenskii K.V., Malyutina O.A. Trudy MAI, 2021, no. 118. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=158252>. DOI: 10.34759/trd-2021-118-12

4. Verba V.S., Neronsky L.B., Osipov I.G., Turuk V.E. Space-based radar systems for land survey. Moscow, Journal Radioengineering, 2010, 680 p.

5. Gruzlov V.V., Kolkovsky Yu.V., Kristopov A.V., Kudrya A.I. New technologies of remote sensing of the Earth from space. Moscow, TEKHNOСFERA, 2018, 482 p.

6. Zanina K. A. / Development of a model of the main parameters of a space radar bistatic interferometer // Trudy MAI. - 2018. - No. 102. - P. 21.

7. A. G. Generalov, E. V. Gadzhiev, M. R. Salikhov / Application of an antenna product in the design of on-board antenna-feeder devices // Electromechanical matters. VNIIEМ studies. 2020. Vol. 174. No. 1. P. 43-51.

8. Ovchinnikova E.V., Shmachilin P.A., Kondratieva S.G., Gadzhiev E.V., Pavlov S.V., Chekulov V.R. Review of automated design systems. Questions of Electromechanics. Proceedings of VNIIEМ. – 2024. – V. 198. – No. 1. – P. 39-46.
9. Ovchinnikova E.V., Shmachilin P. A., Kondratieva S.G., Gadzhiev E.V., Pavlov S.V., Chekulov V.R. Review of numerical methods for solving electrodynamics problems. Electromechanical matters. VNIIEМ studies, 2024, vol. 198. – no. 1, pp. 17-25.
10. Elena V. Ovchinnikova, Pavel A. Shmachilin, Svetlana G. Kondratyeva, Elchin V. Gadzhiev, Stepan V. Pavlov. Application of the finite-difference time-domain method to the analysis of the directional properties of two-dimensional radiating structures. Trudy MAI, 2024, no. 137. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=181880>
11. L.N. Zakhariev, A.A. Lemansky, V.I. Turchin, et al., edited by N.M. Zeitlin, "Methods for Measuring Microwave Antenna Characteristics." Moscow: Radio and Communications, 1985.
12. Patent 2680110 C1 Russian Federation, IPC H 01Q1/28. Elliptical polarization antenna. V.P. Bychkov, Yu.A. Gurevich, P.I. Guseev.
13. P.A. Shmachilin, A.A. Vasilevsky, S.V. Pavlov, K.K. Bashmakov / Antenna for transmission Sync signal to implementing a bistatic imaging mode of space-based synthetic aperture radars// Electronic engineering. Series 2. Semiconductor devices. Issue 3 (274) 2025, pp. 31-41
14. Electronic resource. <https://www.viniti.ru/tpost/998zlxj5m1-v-viniti-ran-sostoyalsya-nauchnii-semina> (date of access: 15.12.2025).

Информация об авторах

Дмитрий Николаевич Мартынов, начальник отделения, АО «НПП «Пульсар», г. Москва, Россия.

Андрей Александрович Василевский, начальник отдела, АО «НПП «Пульсар», г. Москва, Россия.

Степан Владимирович Павлов, инженер 3 категории, АО «НПП «Пульсар», г. Москва, Россия.

Кирилл Константинович Башмаков, инженер 3 категории, аспирант АО «НПП «Пульсар», г. Москва, Россия.

Information about the authors

Dmitiy N. Martynov, head of division, S&PE Pulsar JSC, Moscow, Russia.

Andrey A. Vasilevsky, head of department, S&PE Pulsar JSC, Moscow, Russia.

Stepan V. Pavlov, 3rd category engineer, S&PE Pulsar JSC, Moscow, Russia.

Kirill K. Bashmakov, 3rd category engineer, postgraduate student S&PE Pulsar JSC, Moscow, Russia.

Получено 06 марта 2026 ● Принято к публикации 06 июня 2026 ● Опубликовано 25 июня 2026

Received 06 March 2026 ● Accepted 06 June 2026 ● Published 25 June 2026
