

УДК 621.396.67

## Антенная решетка с печатными излучателями для БПЛА

М.А. Жексенов, В.А. Печурин, А.С. Волченков

### Аннотация

Разработана компактная 8-элементная антенная решетка (АР) с круговой поляризацией электромагнитного поля, предназначенная для приема отраженного от земли сигнала, излучаемого системами ГЛОНАСС и GPS в диапазоне частот L1. На антенном полотне сформировано две линейки излучателей по четыре элемента в каждой. Центры излучателей располагаются в треугольной координатной сетке. Диаграммо-образующая схема (ДОС) АР состоит из восьмиканального синфазного делителя мощности Уилкинсона (СДМУ), восьми квадратурных делителей мощности (КДМ) и коаксиальных кабелей, соединяющих выходы СДМУ и КДМ. На входе ДОС установлен малошумящий усилитель и полосно-пропускающий фильтр. Измерения показали следующие значения основных параметров антенной решетки: коэффициент усиления по мощности (КУ) при круговой поляризации поля падающей волны 14,7 дБ, уровень боковых лепестков ДН не более минус 12 дБ.

Ключевые слова: антенная решетка; печатный излучатель; диаграммо-образующая схема; делители-сумматоры мощности.

### Введение

Целью данной работы является создание действующего макета антенной решетки (АР), предназначенной для приема сигналов, излучаемых системами ГЛОНАСС и GPS в диапазоне частот L1 и отраженных объектами, расположенными на поверхности земли, для последующего формирования их радиолокационного изображения путем цифрового синтеза апертуры в системах РСА [1—3]. Особенность проектируемой АР состоит в том, что она предназначена для установки на малом беспилотном летательном аппарате (БПЛА), а вследствие этого должна обладать малыми массой и габаритными размерами, а также конформностью ее конструкции с фюзеляжем БПЛА. Поэтому в качестве базового типа антенной системы выбрана планарная решетка, состоящая из печатных излучателей. Проектированию антенных решеток посвящено множество монографий [4—10], а также оригинальных статей в периодической печати и докладов на конференциях. В данной работе эти материалы использованы при проектировании действующего макета АР.

## 1. Блок-схема антенной решетки и конструктивные параметры ее элементов

Схема построения антенной решетки представлена на рис.1. В ней имеется 8 печатных излучателей (ПИ) и диаграммо-образующая схема (ДОС), в состав которой, в свою очередь, входят 8 квадратурных делителей-сумматоров мощности (КДСМ) и один восьмиканальный синфазный делитель мощности Уилкинсона (СДМУ). На входе ДОС установлены полосно-пропускающий фильтр (ППФ) и малошумящий усилитель (МШУ). Внешний вид антенной решетки представлен на рис.2.

Излучатели имеют форму квадратов со стороной 68 мм, изготовлены на стеклотекстолитовых платах толщиной 2 мм, также имеющих квадратную форму с размерами сторон 100 мм, рис.3 а) Платы излучателей по своим краям закрепляются над рефлектором АР, имеющим форму параллелограмма, при помощи стоек цилиндрической формы с диаметром 8 мм и высотой 3 мм. Центры излучателей располагаются на раскрыве антенны в треугольной координатной сетке и стороны квадратов повернуты под углом  $45^\circ$  к краям отражающего полотна, загнутого на концах. Сформировано две линейки излучателей по четыре элемента в каждой. Расстояния между центрами излучателей вдоль азимутальной и угломестной осей составляют 110 мм и 90 мм, соответственно. Размеры сторон параллелограмма, форму которого имеет рефлектор, составляют 880 мм и 379 мм, а угол в основании  $45^\circ$ , толщина рефлектора, изготовленного из алюминиевого сплава, 1.5 мм.

Излучатели возбуждаются в двух ортогональных осях, пересекающих центры излучателей и параллельных сторонам квадратов. Положение точек возбуждения определено путем моделирования на ЭВМ с последующим экспериментальным уточнением.

Сигналы, возбуждающие излучатели в ортогональных плоскостях, приходят с трехдецибелльных КДСМ, элементы 1 - 8 рис. 2 б). Апробированы две схемы КДСМ, на шлейфных квадратурных мостах (ШКМ) [11], рис. 4 а), и на связанных коаксиальных линиях передачи изготавливаемых фирмой SAGELABS (США) [12] , рис.4 б). Сигналы на КДСМ поступают с выходов восьмиканального синфазного делителя мощности, построенного по бинарной схеме на основе двухканальных СДМУ, и изготовленного на фольгированном диэлектрике RT/Duroid 6010LM с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r=10,2$  и толщиной 1,27 мм, рис.3 б), это элемент 10 на рис. 2б. Размеры платы делителя  $100 \times 100$  мм. Развязывающие навесные резисторы имеют номинальные значения сопротивлений 100 Ом.

Выходы восьмиканального делителя мощности и входы квадратурных мостов соединяются с помощью коаксиальных кабелей.

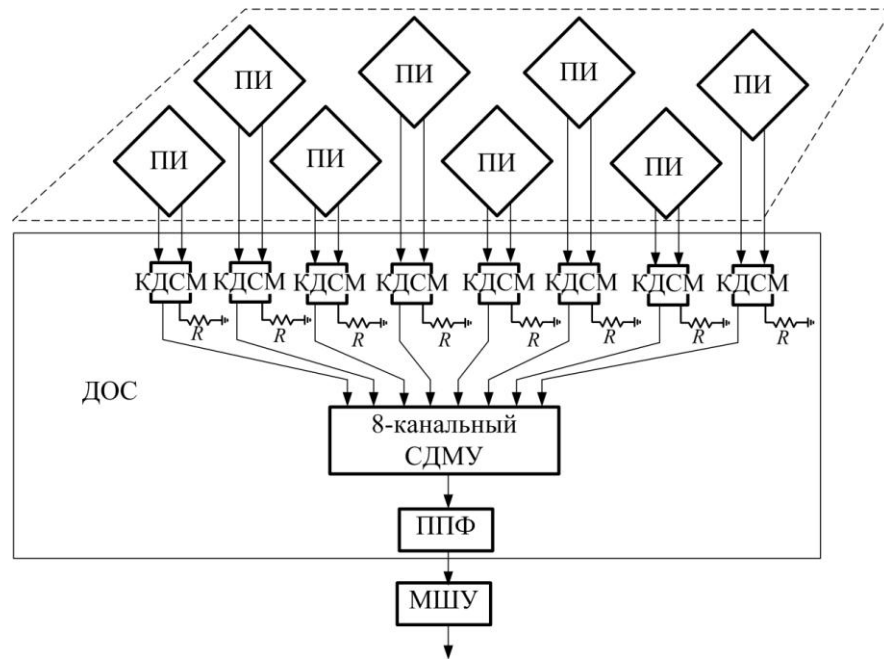
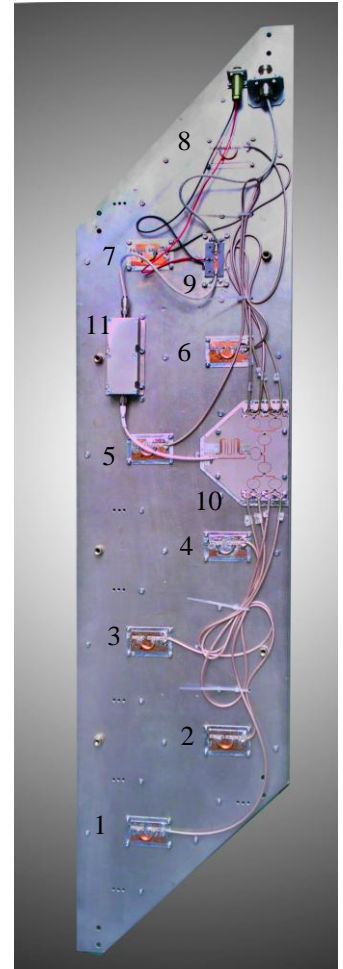


Рис.1. Схема антенной решетки



а)



б)

Рис.2. Фотография антенной решетки в двух видах, со стороны излучателей а), со стороны диаграммо-образующей схемы б)

На общем входе ДОС установлен трехрезонаторный полосно-пропускающий фильтр на связанных микрополосковых линиях в виде полуволновых противонаправленных шпилек. Фильтр изготовлен на одной подложке с 8-канальным делителем мощности. На входе ДОС установлен малошумящий усилитель мощности (МШУ) с коэффициентами усиления и шума, равными 16 дБ и 1,5 дБ, соответственно, элемент 11 на рис. 2 б). Питание МШУ осуществляется с помощью специального фильтра, элемент 9 на рис. 2 б). Излучатели АР и ДОС с фильтром и МШУ закрепляются на разных сторонах рефлектора. Выходы ДОС подключаются к излучателям с помощью индуктивных штырей цилиндрической формы диаметром 0,5 мм и длиной 7,8 мм. Масса АР 1,7 кг.

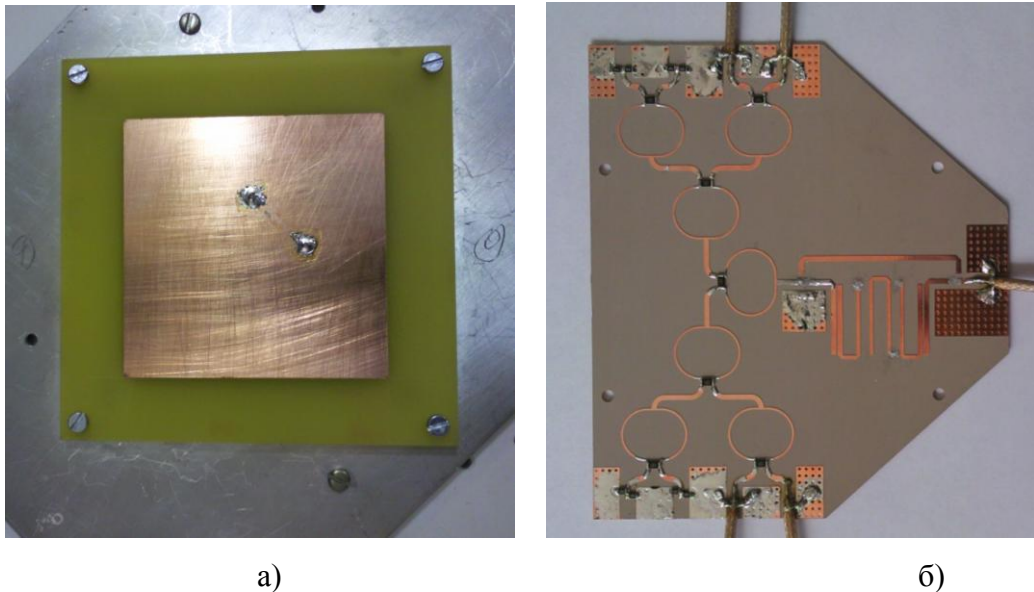


Рис.3. Печатный излучатель а), плата восьмиканального синфазного делителя мощности, построенного по бинарной схеме, и полосно-пропускающий фильтр

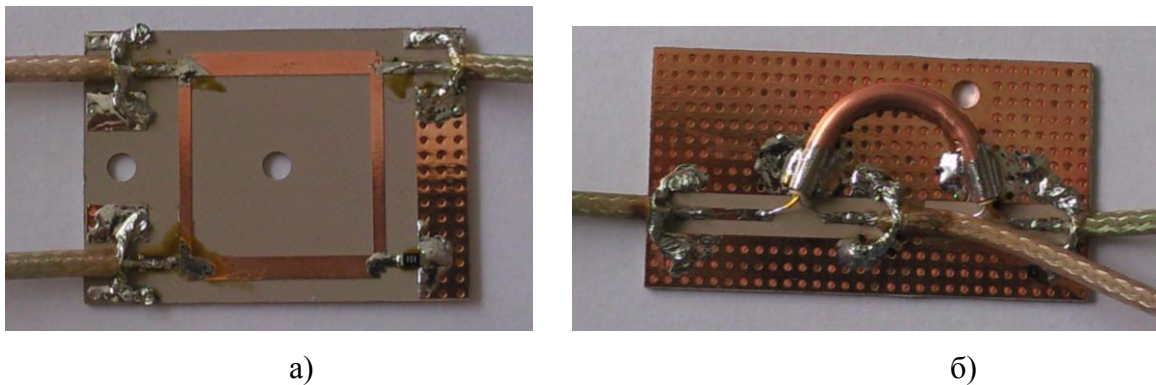


Рис.4. Шлейфный квадратурный делитель мощности а), 3 дБ делитель мощности на связанных коаксиальных линиях передачи WIRELINE, изготавливаемых фирмой SAGELABS (США)

## 2. Моделирование элементов АР на ЭВМ

### Одиночный печатный излучатель

Моделирование характеристик печатного излучателя проводилось с помощью программного комплекса HFSS [13]. На рис. 5 а) изображены топологии находящихся по разные стороны от общего металлического основания ПИ и ШКМ, представленные в окне 3D-конструктора комплекса HFSS. Отметим, что вначале проведена отдельная отработка характеристик ПИ и ШКМ, а затем выполнено их совместное моделирование с помощью пакета HFSS, учитывающее как взаимное влияние этих элементов, так и влияние соединительных индуктивных стержней.

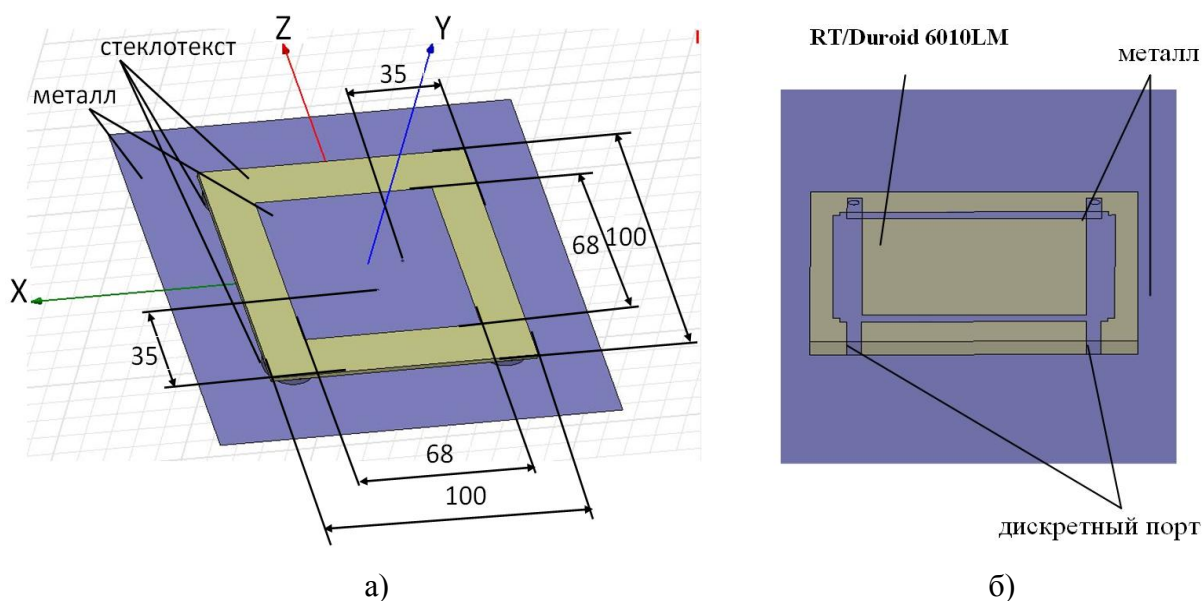


Рис.5. Печатный излучатель а), ШКМ б)

Расчетная характеристика диаграммы направленности (ДН) излучателя в дальней зоне на центральной частоте рабочего диапазона  $f_c = 1.587$  ГГц для левой поляризации поля изображена на рис. 6 а). Максимальное значение коэффициента направленного действия КНД (в направлении, перпендикулярном плоскости ПИ) составляет  $D_{\max} \approx 7.7$  дБ. Ширина ДН по уровню половинной мощности оказывается, примерно, равной  $65^\circ$ , рис. 6 б).

На рис. 7 а) представлена зависимость коэффициента эллиптичности от угла наблюдения. В плоскости  $\varphi = 90^\circ$ , или в плоскости YZ согласно рис. 8 а), в диапазоне углов  $\theta = 0^\circ \dots 156^\circ$ , а в плоскости  $\theta = 90^\circ$  (или в плоскости XY) - в диапазоне  $\varphi = 31^\circ \dots 180^\circ$  коэффициент эллиптичности  $k < 2$ . Таким образом, в широком диапазоне углов обеспечивается, сравнительно, малый уровень коэффициента эллиптичности. В полосе от 1.56 до 1.62 ГГц имеет место хорошее согласование по входу КДСМ, а именно  $S_{11} < -25$  дБ, рис 7 б). Развязка каналов ШКМ  $S_{12} < -10$  дБ.

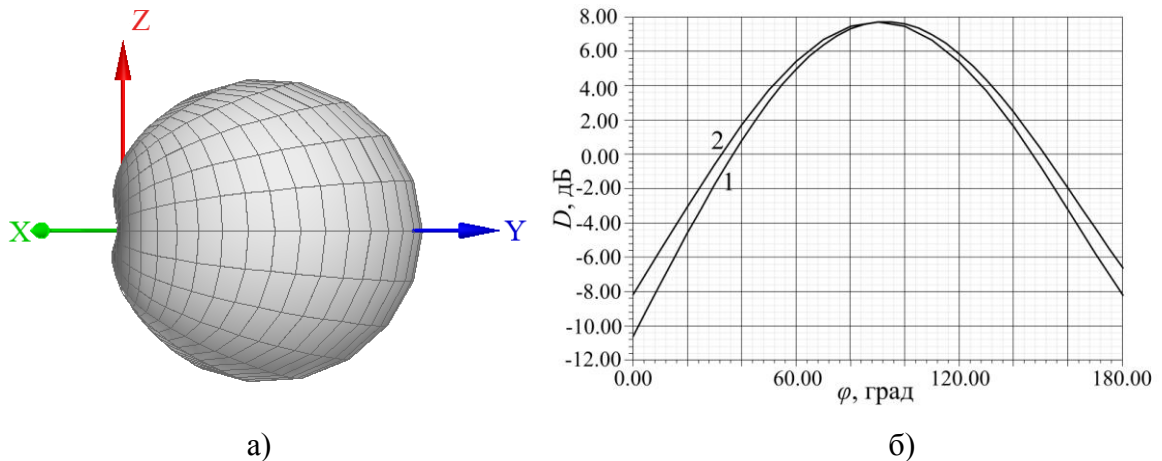


Рис.6. Пространственная ДН ПИ а), зависимость КНД от угла  $\varphi$  при  $\theta = 90^\circ$  (кривая 1) и от угла  $\theta$  при  $\varphi = 90^\circ$  (кривая 2) в сферической системе координат б)

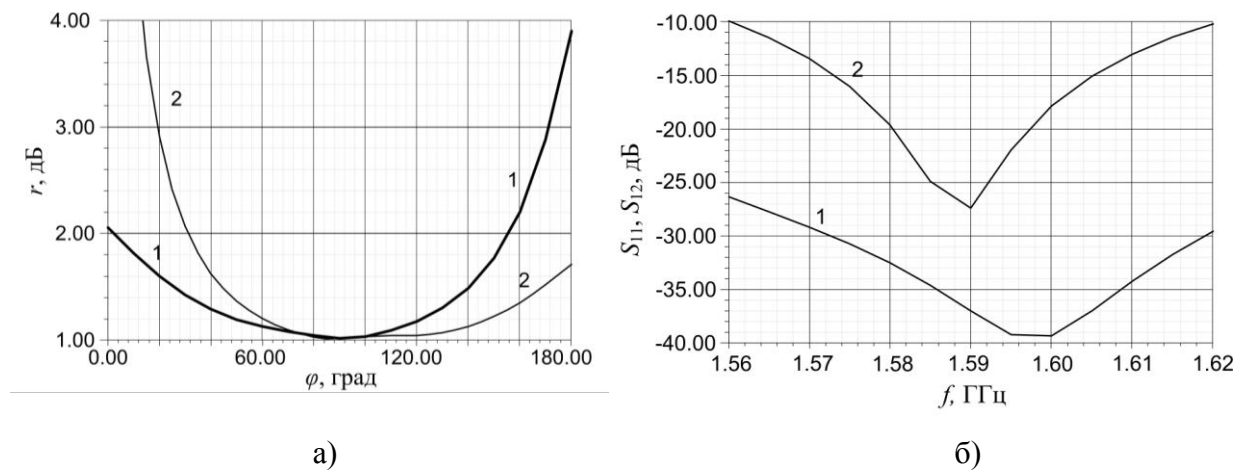


Рис.7. Зависимость модуля коэффициента эллиптичности от угла  $\theta$  при  $\varphi = 90^\circ$  (кривая 1) и от угла  $\varphi$  при  $\theta = 90^\circ$  (кривая 2) в сферической системе координат а), зависимость параметров  $S_{11}$  (кривая 1) и  $S_{12}$  (кривая 2) от частоты б)

Расчет характеристик ПИ с помощью программного комплекса HFSS проведен в диапазоне частот 1.56-1.62 ГГц с шагом 5 МГц (всего 13 точек) при количестве адаптивных проходов, равном 7, и занял 9 минут 45 секунд машинного времени на ЭВМ с частотой процессора, равной 3 ГГц и ОЗУ с объемом 2 ГГб.

### Антенная решетка

При решении напрямую задачи анализа параметров антенной решетки с помощью метода конечных элементов, примененного в пакете HFSS, пришлось бы использовать большой объем оперативной памяти ЭВМ и затратить много времени на проведение вычислений. Данная трудность обходится следующим путем, предусмотренным в комплексе HFSS. Вначале анализируются электродинамические характеристики фрагмента антенны, состоящего из двух печатных элементов, который на рис. 8 выделен пунктирной линией. Общая диаграмма направленности АР определяется путем умножения ДН фрагмента на множитель решетки, состоящей из 4-х одинаковых фрагментов [5]. Для выполнения этой операции в меню комплекса HFSS «radiation -> antenna array setup» необходимо задать 4 элемента решетки «number of cells = 4» вдоль орта  $[1,0,0]$ , рис. 8.

Характеристики дальнего поля определялись на частоте  $f_c$ , указанной выше. **Ширина ДН в плоскости  $\theta = 90^\circ$ , или в плоскости XY согласно рис. 8, по половинной мощности составляет примерно  $11^\circ$ . В плоскости  $\varphi = 90^\circ$  (YZ) –  $46^\circ$ , рис. 9 а).** Таким образом, АР имеет диаграмму направленности веерного типа. Максимальное значение КНД для волны левой поляризации  $D_{\max} \approx 16.7$ . В плоскости  $\varphi = 90^\circ$  коэффициент эллиптичности  $k < 2$  в диапазоне углов  $\theta = 29^\circ \dots 137^\circ$ , а в плоскости  $\theta = 90^\circ$  - в диапазоне  $\varphi = 37^\circ \dots 143^\circ$ , рис. 9 б.

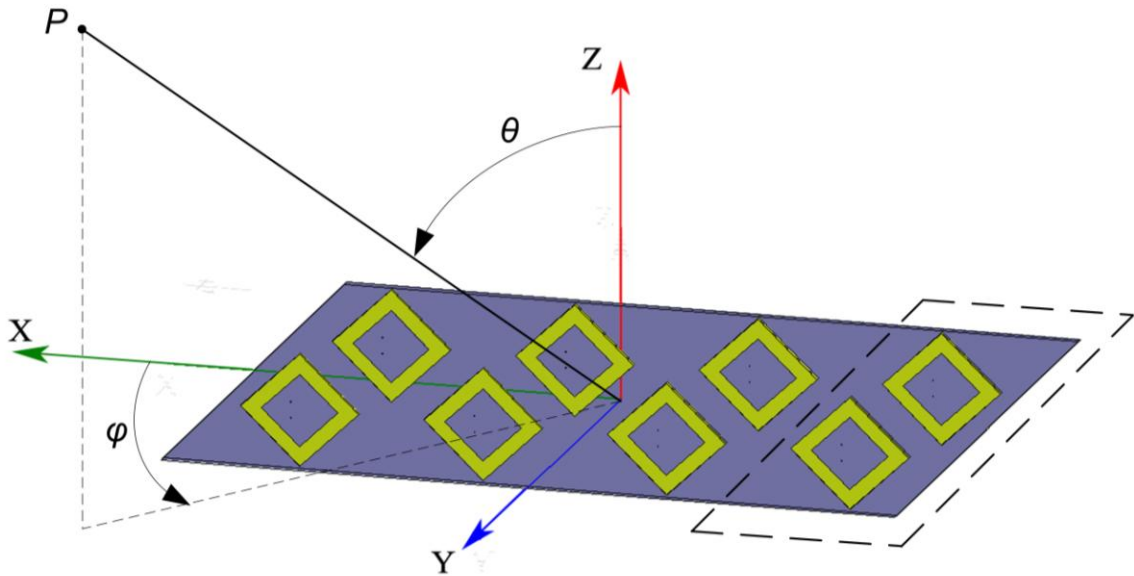


Рис. 8. Трехмерный вид AP

Расчет характеристик AP с помощью симулятора HFSS в диапазоне частот 1.56 – 1.62 ГГц с шагом 5 МГц (всего 13 точек) при числе адаптивных проходов, равном 7, занял 10 минут 38 секунд машинного времени.

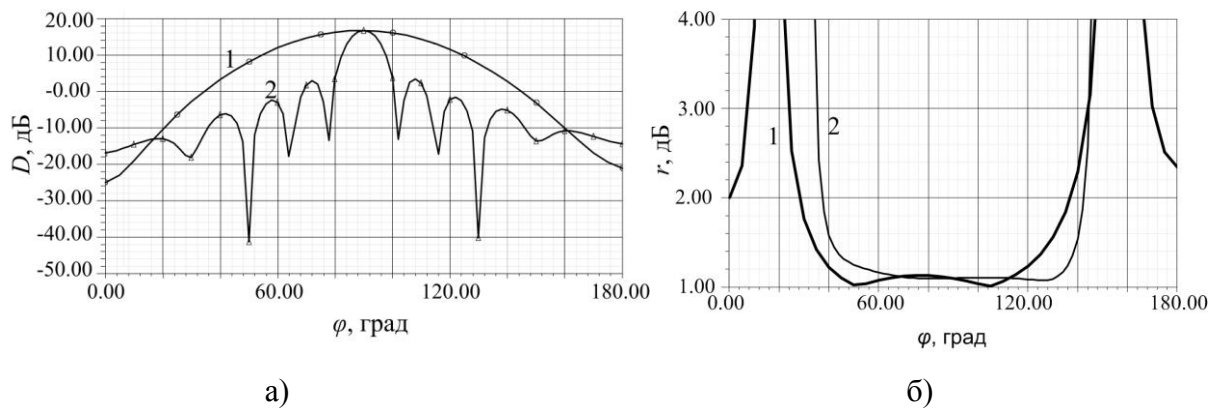


Рис. 9. Зависимость КНД решетки от углов  $\theta$  при  $\varphi = 90^\circ$  (кривая 1) и  $\varphi$  при  $\theta = 90^\circ$  (кривая 2) в сферической системе координат а), зависимость модуля коэффициента эллиптичности от углов  $\theta$  при  $\varphi = 90^\circ$  (кривая 1) и  $\varphi$  при  $\theta = 90^\circ$ , кривая 2, б)

### Диаграммо-образующая схема

Опишем результаты моделирования отдельных элементов диаграммо-образующей схемы. Топология 8-канального делителя мощности, построенного по бинарной схеме на основе СДМУ, представлена на рис.10 а). Характеристики делителя моделировались с помощью программного комплекса Microwave Office (MWO) [14], они изображены на рис.10



б). Элементы топологии оптимизировались с целью минимизации коэффициента отражения со стороны общего входа делителя мощности с применением модуля EMSight электродинамического моделирования, входящего в комплекс MWO. Видим, что спроектированный СДМУ обладает хорошими параметрами, поскольку имеет место равномерное деление мощности между каналами, а в полосе рабочих частот коэффициенты отражения от входов и развязки между ними не превышают минус 20 дБ.

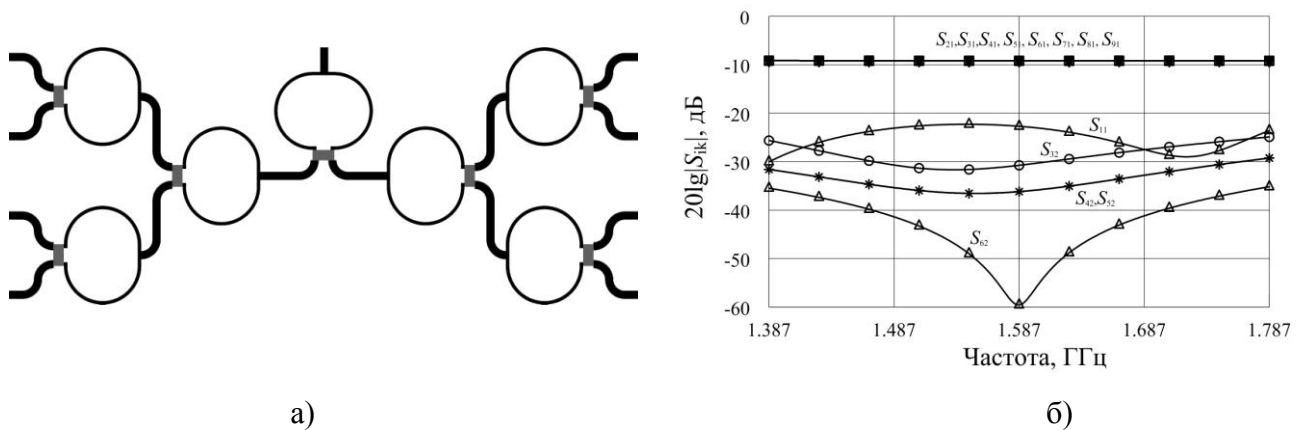
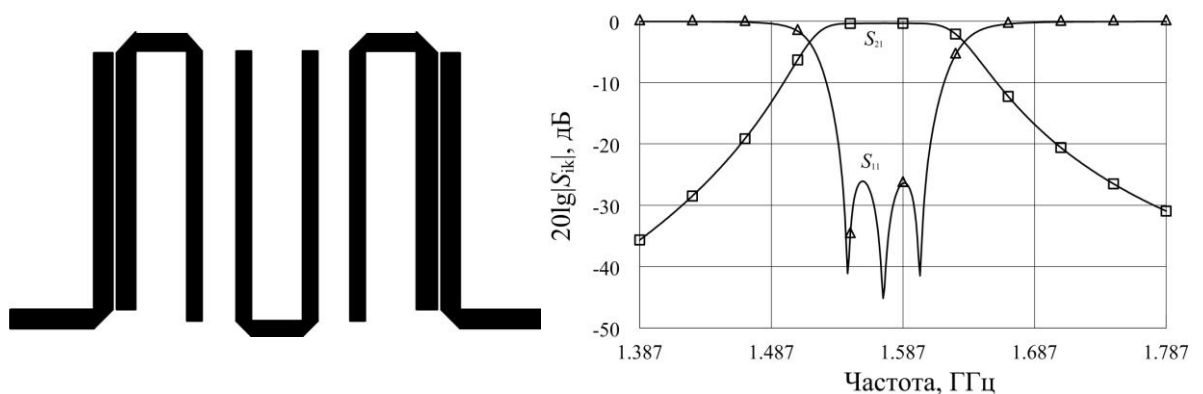


Рис.10. Топология 8-канального синфазного делителя мощности а), частотные зависимости элементов его матрицы рассеяния б)

Топология полосно-пропускающего фильтра и зависимости коэффициентов его матрицы рассеяния  $S_{11}$  и  $S_{21}$ , выраженные в децибелах, приведены на рис.11. Фильтр построен на связанных микрополосковых линиях на основе противонаправленных резонаторов шпилечного типа с трансформаторной связью на входах. Минимальный зазор между микрополосковыми линиями составляет 0,22 мм. Для настройки фильтра проведена оптимизация размеров его топологических элементов с помощью программных комплексов MWO и Zeland. Видим, что полученные в результате электродинамического моделирования размеры топологических элементов обеспечивают хорошие параметры фильтра в полосе рабочих частот.



а) б)

Рис.11. Топология ППФ а) и его частотные характеристики б)

При проектировании ДОС проведено моделирование и макетная отработка 3 дБ квадратурных делителей-сумматоров мощности двух типов, а именно, микрополоскового шлейфного моста, рис.4 а), и делителя на связанных коаксиальных линиях типа WIRELINE, выпускаемых фирмой SAGELABS, США, рис.4 б). В результате был остановлен выбор на второй из этих схем, поскольку она характеризуется меньшими габаритными размерами и обладает существенно большей шириной полосы рабочих частот (октава против 10,5%). Параметры макета делителя в рабочей полосе частот разработанной антенной решетки приведены на рис. 12. Измерения характеристик проводились с помощью векторного анализатора цепей E8358A. Видим, что устройство имеет хорошие параметры.

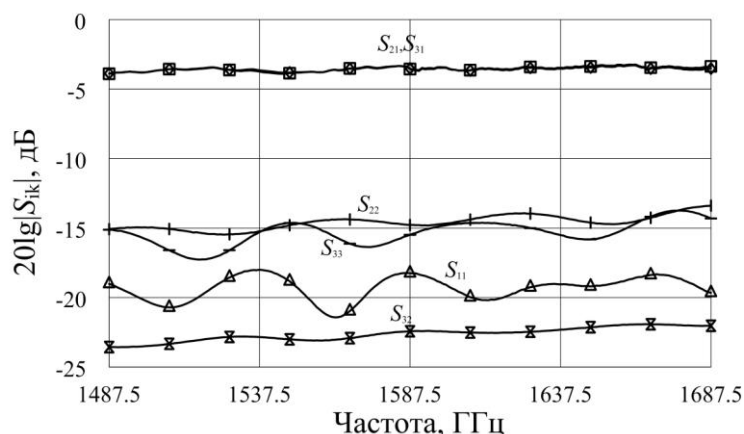


Рис.12. Измеренные характеристики КДСМ на связанных линиях типа WIRELINE

### 3. Результаты экспериментального исследования характеристик антенной решетки

На рис. 13 приведены результаты экспериментального измерения ДН антенной решетки на частоте  $f_c$  при линейной (горизонтальной относительно земли) поляризации падающего поля. Для сравнения полученных результатов с расчетными данными на этот же график нанесены кривые нормированной ДН, которые построены с помощью пакета HFSS. Даны угловые зависимости КНД в плоскостях XY и YZ. Видно, что характер изменения экспериментальных кривых соответствует результатам моделирования, проведенного с использованием пакета HFSS. Ширина ДН по половинной мощности (-3 дБ) равна  $11^\circ$  в плоскости XY и  $46^\circ$  в плоскости в плоскости YZ.

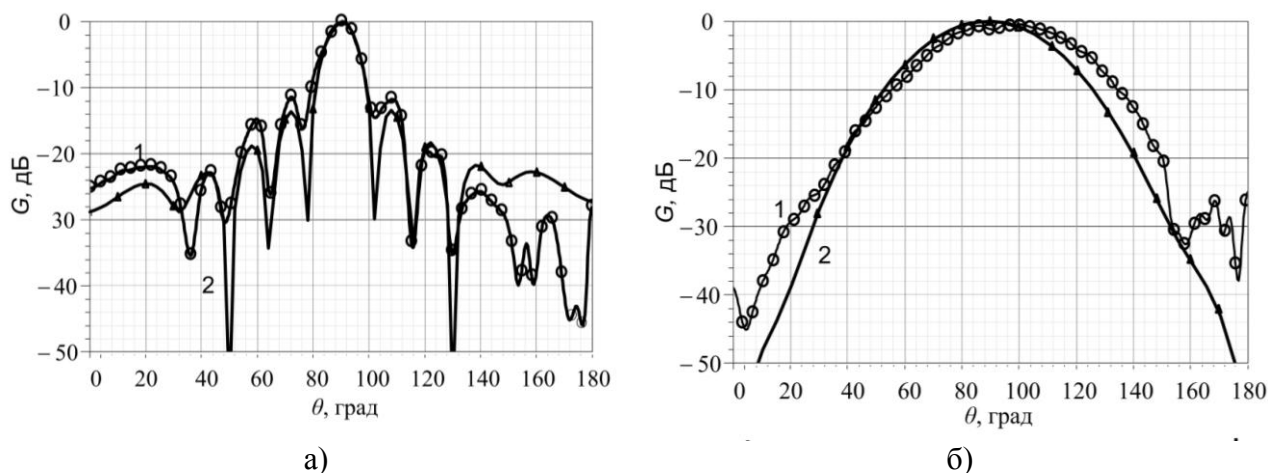


Рис.13. Сравнение эксперимента (кривая 1) с результатами расчета, выполненного с помощью симулятора HFSS (кривая 2): в плоскости XY а), в плоскости YZ б)

Расчетное значение КНД антенны по круговой поляризации в направлении максимума ДН, полученное с помощью программного комплекса HFSS, составляет  $D_{\max} = 16.7$  дБ, тогда как экспериментальные измерения дают величину коэффициента усиления (КУ) AP  $G_{\max} = 14,7$  дБ. Таким образом, делаем заключение о том, что суммарные потери на рассеяние мощности и отражение в тракте и диаграммо-образующей схеме составляют 2 дБ.

#### 4. Выводы

Спроектирована 8-элементная антенная решетка с круговой поляризацией электромагнитного поля, предназначенная для приема отраженного от земли сигнала систем ГЛОНАСС и GPS в диапазоне частот L1. Проведено моделирование параметров ее элементов на ЭВМ с помощью программных комплексов HFSS и Microwave Office. Изготовлены и измерены характеристики, как отдельных элементов решетки, так и антенной решетки в целом. Эксперимент показал хорошее совпадение его результатов с расчетными данными. Антенная решетка подготовлена к установке ее на БПЛА и проведению натурных испытаний в составе действующей аппаратуры.

#### Библиографический список

1. Ксендзук А.В. Синтез апертуры с использованием навигационной системы ГЛОНАСС // Успехи современной радиоэлектроники, 2003, №11, с.44 — 54.
2. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Теоретические основы построения радиолокационных систем дистанционного зондирования Земли. – М.: ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, 2009. – 360 с.

3. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / Под ред. *В.Т. Горяинова*. – М.: Радио и связь, 1988. — 304 с.
4. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток: Учебное пособие для вузов / Под ред. *Д.И. Воскресенского*. — М.: Радиотехника, 2003. — 632 с.
5. *Марков Г.Т., Сазонов Д.М.* Антенны. Учебник для радиотехнических специальностей вузов. М.: Энергия, 1975. — 528 с.
6. *Balanis C.A.* Antenna theory: analysis and design, N.-Y.: John Wiley&Sons, 1997. — 941 pp.
7. *Кюн Р.* Микроволновые антенны: Пер. с нем.. — М.: Судостроение, 1967. — 518 с.
8. Сканирующие антенные системы СВЧ. В 3 Т. Пер. с англ. / Под ред. *Р.К. Хансена*. — М.: Сов. Радио, 1968. Т.2. 468 с.
9. Антенные решетки. Методы расчета и проектирования. Обзор зарубежных работ. Под ред. *Л.С. Бененсона*. — М.: Сов. Радио, 1966. — 368 с.
10. Garg R., Bhartia P., Bahl I., Ittipiboon A. Microstrip Antenna Design Handbook. Boston•London: Artech House, 2001. — 845 pp.
11. *Печурин В.А., Петров А.С.* Делители-сумматоры мощности СВЧ диапазона// Успехи современной радиоэлектроники, 2010, №2, с. 5-42.
12. *Печурин В.А., Петров А.С.* Квадратурные делители-сумматоры среднего и высокого уровня мощности для диапазона УКВ// Успехи современной радиоэлектроники, 2009, №10, с.59 — 62.
13. Курушин А.А. Расчет антенн и СВЧ структур с помощью HFSS Ansoft. – М.: ЗАО НПП «РОДНИК», 2009.- 256 с.
14. Разевиг В.Д., Потапов Ю.В., Курушин А.А. Проектирование СВЧ – устройств с помощью Microwave Office. – М.: СОЛОН – Пресс. -496 с.

### **Сведения об авторах**

1. Жексенов Марат Андреевич, инженер 1 кат. ОАО НПК НИИ дальней радиосвязи. : 117292, г. Москва, ул. Кржижановского, д. 5, корп.1, кв. 4. тел.:+8-906-782-90-00; e-mail: [nautilus\\_05@inbox.ru](mailto:nautilus_05@inbox.ru)

2. Печурин Владимир Андреевич, инженер 1 кат. ОАО НПК НИИ дальней радиосвязи, 109559, г. Москва, Тихорецкий бульвар, д. 4, корп. 1, кв. 283, тел.: 8-916-104-82-23, e-mail: [pe4urin.v@yandex.ru](mailto:pe4urin.v@yandex.ru)
  
3. Волченков Андрей Сергеевич, техник ОАО НПК НИИ дальней радиосвязи, . Москва, ул. Твардовского, д. 5, , корп. 2 , кв. 153, тел: 8-906-741-67-16. e-mail: [leftbox12@mail.ru](mailto:leftbox12@mail.ru)