

## Электродинамика, антенны и техника СВЧ

DOI 10.66032/2221-2574-2026-1-1-55-66

УДК 621.396.94

### ШИРОКОПОЛОСНАЯ АНТЕННАЯ РЕШЁТКА С КРУГОВОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ ДЛЯ БПЛА

**Гаврилов Валериан Михайлович**

кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники и радиосистем  
ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и  
Николая Григорьевича Столетовых».

**Дементьев Валерий Константинович**

старший преподаватель кафедры радиотехники и радиосистем ФГБОУ ВО «Владимирский  
государственный университет имени Александра Григорьевича  
и Николая Григорьевича Столетовых».

**Корнеева Наталья Николаевна**

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой радиотехники и радиосистем  
ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича  
и Николая Григорьевича Столетовых».

**Самсонова Анастасия Максимовна**

студент кафедры радиотехники и радиосистем ФГБОУ ВО «Владимирский государственный  
университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

Адрес: 600000, Российская Федерация, г. Владимир, ул. Горького, д. 87.

E-mail для связи: [vgavrilov@vlsu.ru](mailto:vgavrilov@vlsu.ru)

**Аннотация:** В работе представлены полученные с помощью программы «CST Suite» результаты компьютерного моделирования и параметрического синтеза широкополосной печатной антенной решётки с круговой поляризацией, предназначенной для работы в составе современных наземных комплексов управления и связи БПЛА. Отличительная особенность антенного устройства – сочетание высокого коэффициента усиления и круговой поляризации с широкой полосой рабочих частот, наличие коробчатого корпуса с радиопрозрачной крышкой, позволяющего эксплуатацию в тяжёлых метеоусловиях. Сравнительная оценка результатов компьютерного моделирования электрических параметров оптимизированной антенной решётки показала хорошее совпадение с результатами экспериментальных исследований: в диапазоне частот 3,4–3,6 ГГц коэффициент усиления более 19 дБ, коэффициент эллиптичности в пределах ширины главного максимума диаграммы направленности более –3,2 дБ, коэффициент стоячей волны менее 1,5.

**Ключевые слова:** печатная антенная решётка, компьютерное моделирование, параметрический синтез, экспериментальное исследование, электрические параметры, комплекс связи, БПЛА.

### Введение

Особенностью боевых действий в специальной военной операции явилось массовое применение нового класса беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) — лёгких разведывательных дронов, коммерческое массовое производство которых расширило разведывательные возможности подразделений, повысило эффективность корректировки огня, точности поражения вооружения, военной техники и личного состава противника [1]. Сегодня этот класс БПЛА

стал важнейшим средством ведения разведки в тактической полосе [2]. Эти же БПЛА могут быть оснащены системами сброса различных средств поражения и использоваться в качестве барражирующие дронов-камикадзе [3, 4]. Широкое применение нового класса БПЛА сделало перемещения людей и техники в тактической полосе зоны боевого соприкосновения возможным лишь в условиях оптического и радиотехнического контроля за воздушной обстановкой, как днём, так и ночью. Достаточная простота и

возможность быстрого изготовления делают этот тип БПЛА массовым, объёмы производства которых могут измеряться сотнями тысяч в год. Учитывая высокий уровень влияния на характер боевых действий в тактическом звене и возможность расширения задач, выполняемых тактическими БПЛА, развитию этих БПЛА в настоящее время уделяется особое внимание.

Результаты анализа опыта боевого применения БПЛА тактического назначения [4–6] служат основой для формирования перспективной структуры новых систем БПЛА.

Важной задачей при разработке перспективных тактических беспилотных комплексов является создание широкополосных наземных пунктов боевого управления и связи БПЛА. Использование широкополосных сигналов в бортовых и наземных системах связи БПЛА позволяет увеличить скорость передачи данных и повысить помехоустойчивость. Для этого требуются антенны с большим коэффициентом усиления, полоса пропускания которых превышает полосу частот, занимаемых спектром широкополосного сигнала. При этом под полосой пропускания антенны понимается диапазон частот, в пределах которого характеристики направленности и согласования сохраняются в допустимых пределах. Сочетание высокой направленности и широкополосности наиболее просто реализуется в антенных решётках с широкополосными излучателями. В этом случае дополнительными требованиями к антенне являются технологичность и простота реализации в условиях современного производства.

#### Описание конструкции и результаты компьютерного моделирования

В работе представлены результаты компьютерного моделирования и параметрического синтеза конструкции широкополосной печатной антенной решётки с круговой поляризацией, предназначенной для работы в составе перспективных широкополосных наземных комплексов управления и связи тактических БПЛА. Анализ требований к новым системам БПЛА [1] позволил сформулировать основные

требования к антенным устройствам наземных комплексов. Так, для работы в диапазоне рабочих частот 3,4–3,6 ГГц коэффициент усиления (КУ) антенны должен быть не менее 19 дБ, коэффициент эллиптичности (КЭ) в пределах ширины главного максимума диаграммы направленности (ДН) не менее –3,2 дБ, ДН должна быть осесимметричной или близкой к ней, коэффициент стоячей волны (КСВ) на 50-омном входе антенны не более 1,5. Высокий КУ позволит увеличить дальность, а в сочетании с осесимметричной ДН — повысит помехозащищённость комплекса. Круговая поляризация позволит снизить влияние помех в наземном пункте связи, обусловленных переотражениями электромагнитного излучения от окружающей естественных и искусственных объектов. Электродинамическое моделирование и параметрический синтез выполнены с помощью программы CST Suite.

По совокупности электрических параметров известные варианты печатных излучателей и антенные решётки на их основе, в частности [7–14], не обеспечивают сочетание требуемых характеристик. В работе представлен планарный излучатель, полностью удовлетворяющий сформулированным требованиям.

На рис. 1 схематично приведена результирующая компьютерная модель конструкции

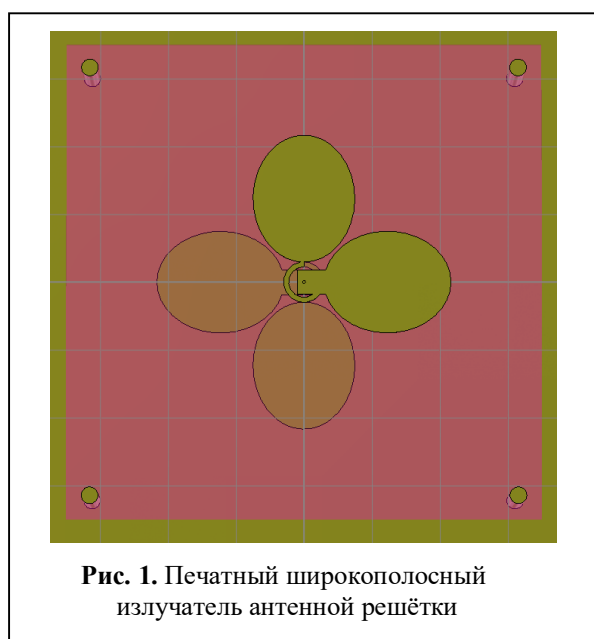


Рис. 1. Печатный широкополосный излучатель антенной решётки

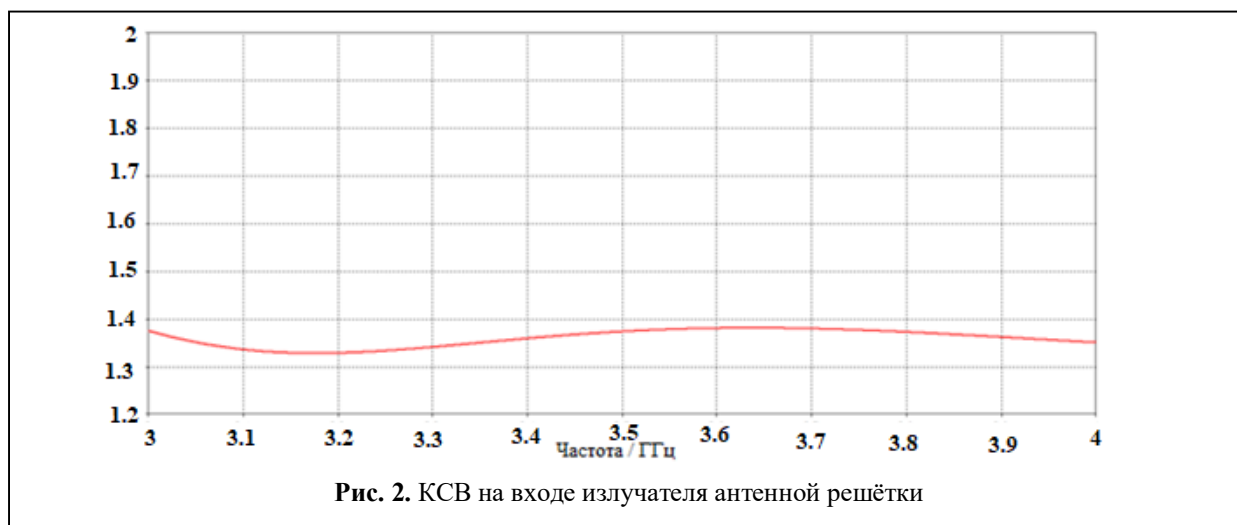


Рис. 2. КСВ на входе излучателя антенной решётки

печатного широкополосного элемента антенной решётки с круговой поляризацией, разработанного на базе перекрёстных диполей. Перекрёстные диполи выполнены в виде эллиптических структур, что обеспечивает широкий рабочий диапазон частот и высокую развязку. Излучатель реализован на материале Rogers4003 с толщиной диэлектрика 0,508 мм и металлизацией 35 мкм. Размер печатной платы излучателя 40×40 мм, высота подвеса печатной платы над экраном 25 мм.

На рис. 2 представлена зависимость КСВ на входе излучателя антенной решётки в диапазоне частот 3–4 ГГц. В рабочем диапазоне 3,4–3,6 ГГц КСВ < 1,4 и имеется значительный запас по согласованию в более широкой полосе частот.

На рис. 3 а в сферической системе координат

представлена пространственная ДН излучателя антенной решётки на нижней частоте рабочей полосы частот 3,4 ГГц. Излучатель имеет коэффициент усиления КУ = 8,1 дБ и осесимметричную ДН, максимум которой ориентирован перпендикулярно излучающему раскрытию антенны. Эффективность излучения элемента составляет – 0,17 дБ, что соответствует КПД 96%. На рис. 3 б, в представлены ДН излучателя в полярной системе координат в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Ширина ДН по половинной мощности в вертикальной и горизонтальной плоскостях соответственно равны:  $\Delta\theta_{0,5}^E = \Delta\theta_{0,5}^H = 90^\circ$ , уровень заднего излучения в обоих случаях (УЗИ<sup>E</sup>, УЗИ<sup>H</sup>) < (–18) дБ. Аналогичные расчёты выполнены на средней и верхней частотах рабочего диапазона.

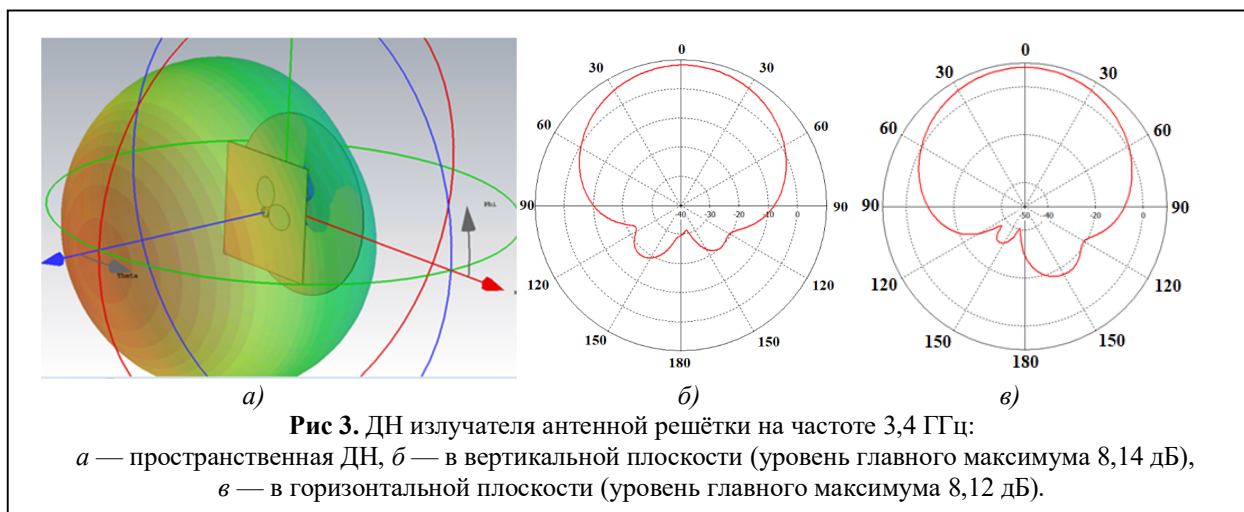


Рис. 3. ДН излучателя антенной решётки на частоте 3,4 ГГц:

а — пространственная ДН, б — в вертикальной плоскости (уровень главного максимума 8,14 дБ), в — в горизонтальной плоскости (уровень главного максимума 8,12 дБ).

На средней частоте рабочего диапазона 3,5 ГГц излучатель имеет коэффициент усиления КУ = 8,2 дБ и осесимметричную ДН с максимумом ориентированным перпендикулярно раскрыву антенны.

Эффективность излучения составляет – 0,16 дБ, что соответствует КПД 96,5%. Ширина ДН по половинной мощности в вертикальной и горизонтальной плоскостях равны:  $\Delta\theta_{0,5}^E = \Delta\theta_{0,5}^H = 90^\circ$ , уровень заднего излучения в вертикальной плоскости (УЗИ<sup>E</sup>) < (–18) дБ, в горизонтальной плоскости (УЗИ<sup>H</sup>) < (–17) дБ.

На верхней частоте рабочего диапазона 3,6 ГГц излучатель имеет коэффициент усиления КУ = 8,1 дБ, главный максимум ДН ориентирован перпендикулярно раскрыву антенны, а ДН имеет осесимметричную форму. Эффективность излучения элемента составляет – 0,15 дБ, что соответствует КПД 97%. Ширина ДН излучателя антенной решётки по половинной мощности в вертикальной и горизонтальной плоскостях равны:  $\Delta\theta_{0,5}^E = \Delta\theta_{0,5}^H = 90^\circ$ , уровень заднего излучения в вертикальной плоскости (УЗИ<sup>E</sup>) < (–18) дБ, в горизонтальной плоскости (УЗИ<sup>H</sup>) < (–17) дБ.

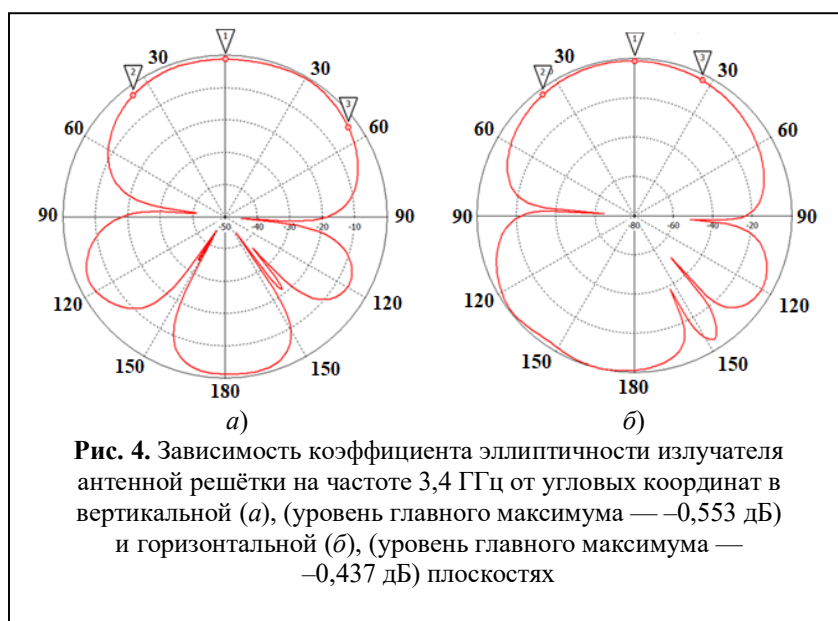
Одной из важнейших характеристик антенн с круговой поляризацией является коэффициент эллиптичности (КЭ). На рис. 4 а, б в полярной системе координат представлены зависимости КЭ излучателя антенной решётки на частоте 3,4 ГГц от угловых координат в вертикальной (а) и горизонтальной (б) плоскостях. Нулевое значение угловой координаты соответствует направлению максимума ДН. Из рис. 4 следует, что на частоте 3,4 ГГц в вертикальной плоскости КЭ излучателя в направлении главного максимума равен –1,35 дБ, а его изменение в пределах ширины ДН по половинной мощ-

ности составляет –3,01–(–3,02) дБ. В горизонтальной плоскости КЭ излучателя в направлении главного максимума так же равен –1,35 дБ, а его изменение в пределах ширины ДН составляет –3,00–(–3,06) дБ. Аналогичные расчёты выполнены на средней и верхней частотах рабочего диапазона.

На частоте 3,5 ГГц в вертикальной плоскости КЭ излучателя в направлении главного максимума ДН равен –1,17 дБ, а его изменение в пределах ширины ДН составляет –2,96–(–3,02) дБ. В горизонтальной плоскости КЭ излучателя в направлении главного максимума так же равен –1,18 дБ, а его изменение в пределах ширины ДН составляет –3,05–(–2,97) дБ.

На частоте 3,6 ГГц в вертикальной плоскости КЭ излучателя в направлении главного максимума равен –1,01 дБ, а его изменение в пределах ширины ДН составляет –3,08–(–3,04) дБ. В горизонтальной плоскости КЭ излучателя в направлении главного максимума так же равен –1,01 дБ, а его изменение в пределах ширины ДН составляет –2,99–(–2,95) дБ.

Синтезированный излучатель был использован при разработке антенной решётки. Коэффициент усиления 19 дБ и ДН, близкая к осесимметричной, были реализованы в 16-и эле-



ментной (4×4 излучателя) антенной решётке, компьютерная модель которой схематично приведена на рис. 5. Конструктивно антенная решётка выполнена в виде двух печатных плат: излучающего раскрыва и распределительного устройства, размещённых над металлическим основанием коробчатого корпуса. Радиопрозрачная крышка корпуса, выполненная из композитного материала, на рисунке не показана. Печатная плата излучающего раскрыва результирующей антенной решётки размерами 240×240 мм реализована на фольгированном материале Rogers4003 толщиной 0,508 мм и металлизацией 35 мкм. Высота подвеса печатной платы над металлическим экраном 25 мм. Микрополосковое распределительное устрой-

ство рис. 6 выполнено на печатной плате размерами 240×240 мм из того же материала и представляет собой структурную схему параллельного типа, состоящую из ненаправленных двухканальных делителей мощности с согласующими трансформаторами в выходных плечах. Металлизированная поверхность печатной платы микрополосковой схемы распределительного устройства используется в качестве отражателя излучающего раскрыва антенной решётки. Соединение входов излучателей антенной решётки с соответствующими микрополосковыми выходами распределительного устройства осуществляется отрезками равной длины коаксиального кабеля RG-405.

Разработанное распределительное устройство обеспечивает синфазное, равно амплитудное возбуждение излучателей антенной решётки. Общий микрополосковый вход распределительного устройства нагружен отрезком коаксиального кабеля RG-405 с оконечным 50-тиомным разъёмом N-типа Huber Suhner SF-24-N-651. 3D модель антенной решётки разработана в системе автоматизированного проектирования SolidWorks. Проектирование печатных плат выполнено в среде Altium Designer.

Ниже представлены результаты электродинамического моделирования и параметрического синтеза результирующей антенной решётки, выполненные с помощью программы CST Suite. На рис. 7 представлена зависимость KCB на входе антенной решётки в

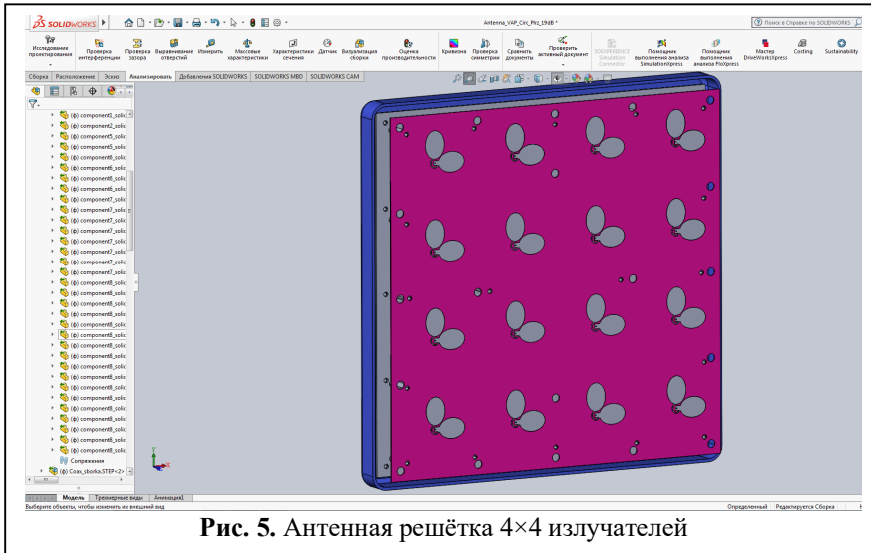


Рис. 5. Антенная решётка 4×4 излучателей

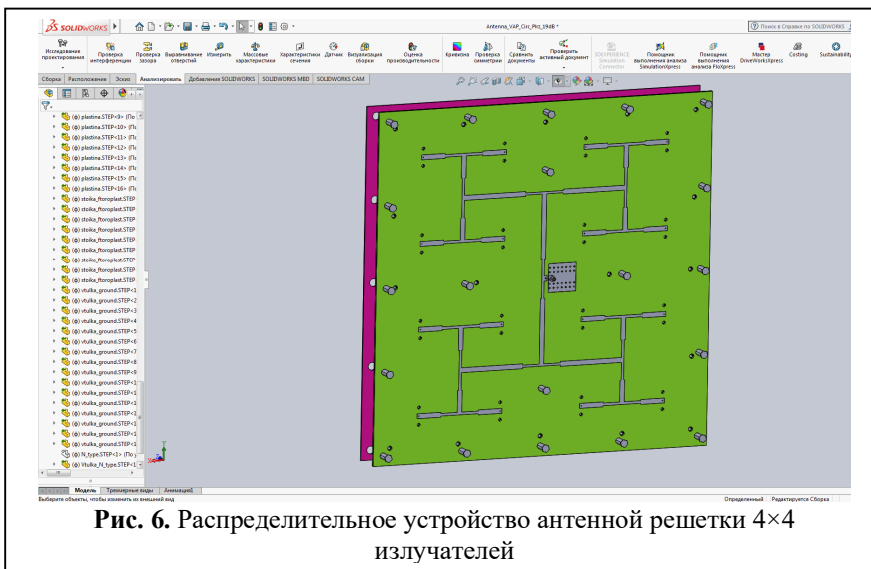


Рис. 6. Распределительное устройство антенной решётки 4×4 излучателей

диапазоне частот 3–4 ГГц. В рабочем диапазоне 3,4–3,6 ГГц КСВ < 1,5 и имеется значительный запас по согласованию в более широкой полосе частот.

На рис. 8 а приведена пространственная ДН 16-и элементной антенной решётки на частоте 3,4 ГГц. Коэффициент усиления антенной решётки равен КУ = 19,5 дБ, ДН имеет осесимметричную форму и её главный максимум ориентирован перпендикулярно излучающему раскрытию. Эффективность излучения антенной решётки составляет –0,17 дБ, что соответствует КПД 96%. На рис. 8 б, в представлены ДН 16-и элементной антенной решётки на частоте 3,4 ГГц в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Ширина ДН по половинной мощности в вертикальной плоскости равна  $\Delta\theta_{0,5}^E = 18,9^\circ$ , уровень боковых лепестков  $УБЛ_1^E = -12,8$  дБ; в горизонтальной плоскости  $\Delta\theta_{0,5}^H = 18,6^\circ$ ,  $УБЛ_1^H = -13$  дБ. Аналогичные расчёты выполнены на средней и верхней частотах рабочего диапазона.

На частоте 3,5 ГГц коэффициент усиления антенной решётки равен КУ = 19,6 дБ, главный максимум ДН ориентирован перпендикулярно



Рис. 7. КСВ на входе антенной решетки 4×4 излучателей

излучающему раскрытию. Эффективность излучения антенной решётки составляет –0,17 дБ, что соответствует КПД 96%. ДН 16-и элементной антенной решётки на частоте 3,5 ГГц в вертикальной и горизонтальной плоскостях характеризуется следующими параметрами. Ширина ДН по половинной мощности в вертикальной плоскости равна  $\Delta\theta_{0,5}^E = 19,5^\circ$ , уровень боковых лепестков  $УБЛ_1^E = -12,9$  дБ; в горизонтальной плоскости  $\Delta\theta_{0,5}^H = 18,1^\circ$ ,  $УБЛ_1^H = -13,2$  дБ.

На частоте 3,6 ГГц коэффициент усиления антенной решётки равен КУ = 19,6 дБ, главный максимум ДН ориентирован перпендикулярно излучающему раскрытию. Эффективность излучения антенной решётки составляет –0,19 дБ, что соответствует КПД 95%. Ширина ДН по половинной мощности в вертикальной плоско-

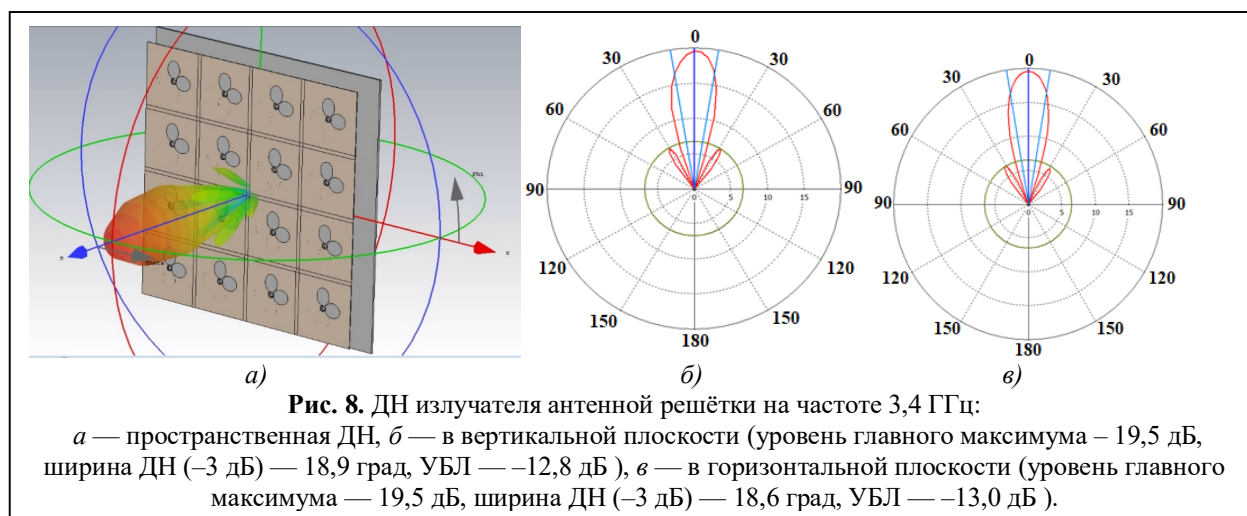


Рис. 8. ДН излучателя антенной решётки на частоте 3,4 ГГц:

а — пространственная ДН, б — в вертикальной плоскости (уровень главного максимума – 19,5 дБ, ширина ДН (–3 дБ) — 18,9 град, УБЛ — –12,8 дБ), в — в горизонтальной плоскости (уровень главного максимума — 19,5 дБ, ширина ДН (–3 дБ) — 18,6 град, УБЛ — –13,0 дБ).

Таблица 1.

Рабочие частоты, ГГц	Параметры						КЭ (в/г), дБ	
	КУ, дБ	$\Delta\theta_{0,5}^E$ , град.	$УБЛ_1^E$ , дБ	$\Delta\theta_{0,5}^H$ , град.	$УБЛ_1^H$ , дБ	КПД, %	$\theta_{\max}$	$\Delta\theta_{0,5}$
3,4	19,5	18,9	-12,8	18,6	-13,0	96	-1,50	-3,15(-2,54)
							-1,50	-1,65(-1,52)
3,5	19,6	19,5	-12,9	18,1	-13,2	96	-1,53	-3,17(-2,31)
							-1,52	-1,65(-1,59)
3,6	19,6	19,8	-12,8	17,6	-13,0	95	-1,60	-3,08(-2,07)
							-1,64	-1,88(-1,71)

сти равна  $\Delta\theta_{0,5}^E = 19,8^\circ$ , уровень боковых лепестков  $УБЛ_1^E = -12,8$  дБ; в горизонтальной плоскости  $\Delta\theta_{0,5}^H = 17,6^\circ$ ,  $УБЛ_1^H = -13,0$  дБ.

На рис. 9 в полярной системе координат представлены зависимости КЭ 16-и элементной антенной решётки на частоте 3,4 ГГц от угловых координат в вертикальной (а) и горизонтальной (б) плоскостях. Нулевое значение угловой координаты соответствует направлению максимума ДН. Из рис. 9 следует, что в вертикальной плоскости КЭ антенной решётки в направлении главного максимума равен -1,50 дБ, а его изменение в пределах ширины ДН по половинной мощности составляет -3,15(-2,54) дБ. В горизонтальной плоскости КЭ антенной решётки в направлении главного максимума так же равен -1,50 дБ, а его изменение в пределах ширины ДН составляет -1,65(-1,52) дБ.

Из аналогичных расчётов, выполненных на средней и верхней частотах рабочего диапазона, следует, что на частоте 3,5 ГГц в вертикальной плоскости КЭ антенной решётки в направлении главного максимума ДН равен -1,53 дБ, а его изменение в пределах ширины ДН составляет -3,17(-2,31) дБ. В горизонтальной плоскости КЭ ан-

тенной решётки в направлении главного максимума равен -1,52 дБ, а его изменение в пределах ширины ДН составляет -1,65(-1,59) дБ. На частоте 3,6 ГГц в вертикальной плоскости коэффициент эллиптичности антенной решётки в направлении главного максимума равен -1,60 дБ, а его изменение в пределах ширины ДН равно -3,08(-2,07) дБ. В горизонтальной плоскости коэффициент эллиптичности антенной решётки в направлении главного максимума -1,64 дБ, а его изменение в пределах ширины ДН -1,88(-1,71) дБ.

Рассчитанные электрические параметры синтезированной 16-и элементной антенной решётки, представлены в таблице 1.

Таким образом, путём параметрического синтеза с последующей оптимизацией, выполненных с помощью программы CST Suite, раз-



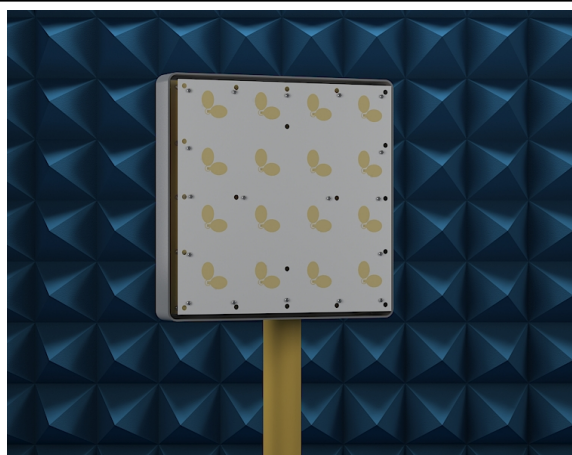


Рис. 10. Фрагмент безэховой камеры с 16-и элементной антенной решёткой

работан вариант широкополосного 16-и элементной (4×4) антенной решётки с высоким КУ, круговой поляризацией и хорошим согласованием в заданном диапазоне частот. Рассчитанная антенная решётка, размещённая в коробчатом корпусе с радиопрозрачной крышкой из стеклопластика, при общих размерах 260×260×50 мм в рабочем диапазоне частот 3,4–3,6 ГГц характеризуется электрическими параметрами:  $K_{СВ} < 1,4$ ,  $KУ = (19,5–19,6)$  дБ,  $\Delta\theta_{0,5}^E = (18,9–19,8)^\circ$ ,  $\Delta\theta_{0,5}^H = (17,6–18,6)^\circ$ ,  $УБЛ_1^E = (-12,8–(-12,9,6))$  дБ,  $УБЛ_1^H = -13,0–(-13,2)$  дБ; КЭ для направлений максимума ДН и по краям главного максимума ДН по половинной мощности, в вертикальной и горизонтальной плоскостях соответственно равны:  $-1,50–(-1,60)$  дБ,  $(-3,08–(-3,17)) – (-2,07–(-2,54))$  дБ;  $-1,50–(-1,64)$  дБ,  $(-1,65–(-1,88)) – (-1,52–(-1,71))$  дБ. При высоком КУ направленные свойства антенного устройства в рабочей полосе частот меняются незначительно, сохраняются близкие параметры ДН в Е- и Н-плоскостях, согласование на входе характеризуется величиной  $K_{СВ} < 1,4$ . Антенная решётка обладает хорошими поляризационными свойствами. Круговая поляризация с  $KЭ \geq -3,17$  дБ в пределах ширины главного максимума ДН по половинной мощности сохраняется во всей рабочей полосе частот. Приведённые электрические параметры позволяют

рассматривать рассчитанную антенную решётку, как оптимальный вариант антенны для современных и перспективных широкополосных систем связи.

### Результаты экспериментальных исследований

Достоверность результатов компьютерного моделирования разработанного антенного устройства подтверждается результатами экспериментальных исследований опытного образца. Детальная конструкция антенной решётки, разработанная на основе схематичной компьютерной модели, сохранила принципиальные особенности, присущие как самой антенне, так и входящим в неё печатным платам излучающего раскрыва и распределительного устройства рис. 5, рис. 6. В процессе технологической реализации печатных плат с целью повышения антикоррозийной устойчивости применялось иммерсионное золочение проводников.

Как и в компьютерной модели, в опытном образце пакетная сборка печатных плат рис. 6 устанавливалась в коробчатом корпусе, состоящем из металлического основания с краевыми бортами и радиопрозрачной крышки, выполненной из стеклопластика ( $\epsilon = 3,5$ ;  $\text{tg}\delta = 0,02$ ) толщиной 2 мм и имеющее внешнее покрытие, устойчивое к солнечной радиации и агрессивным средам. Дополнительные потери, связанные с наличием крышки, не превышали в рабочем диапазоне частот 0,3 дБ. Габаритные размеры корпуса 260×260×50 мм. Экспериментальные исследования антенного устройства проводились в широкополосной безэховой камере рис. 10. Для наглядности антенная решётка показана на рис. 10 без радиопрозрачной крышки.

На рис. 11 приведена экспериментальная зависимость  $K_{СВ}$  на входе 16-и элементной антенной решётки от частоты. В рабочем диапазоне 3,4–3,6 ГГц  $K_{СВ}$  на входе антенны не превышает значения 1,5 и имеется запас по согласованию в более широкой полосе частот, превышающей диапазон 3–4 ГГц. Эксперимен-

тально измеренные параметры, характеризующие направленные свойства антенной решётки от частоты, сведены в таблицу 2. Разработанная 16-и элементная антенная решётка в коробчатом корпусе с радиопрозрачной крышкой из стеклопластика и общими размерами 260×260×50 мм в рабочем диапазоне частот 3,4–3,6 ГГц характеризуется электрическими параметрами: КСВ < 1,5,

КУ = (19,1–19,2) дБ,  $\Delta\theta_{0,5}^E = (19,1 - 19,9)^\circ$ ,

$\Delta\theta_{0,5}^H = (18,0 - 18,9)^\circ$ , УБЛ<sub>1</sub><sup>E</sup> = (–13,0–(–13,3)) дБ,

УБЛ<sub>1</sub><sup>H</sup> = (–13,0 — (–13,5)) дБ. КЭ для направле-

ний максимума ДН и по краям главного максимума ДН по половинной мощности, в вертикальной и горизонтальной плоскостях соответственно равны: –1,7–(–1,8) дБ, (–3,1–(–3,2)) – (–2,5–(–2,8)) дБ; –1,8–(–1,9) дБ, (–1,8–(–2,2)) – (–1,7–(–1,9)) дБ. Из экспериментальных результатов следует: направленные свойства антенного устройства в рабочей полосе частот меняются слабо, величина КСВ не превосходит 1,5; КЭ ≥ –3,2 в пределах ширины главного максимума ДН по половинной мощности сохраняется

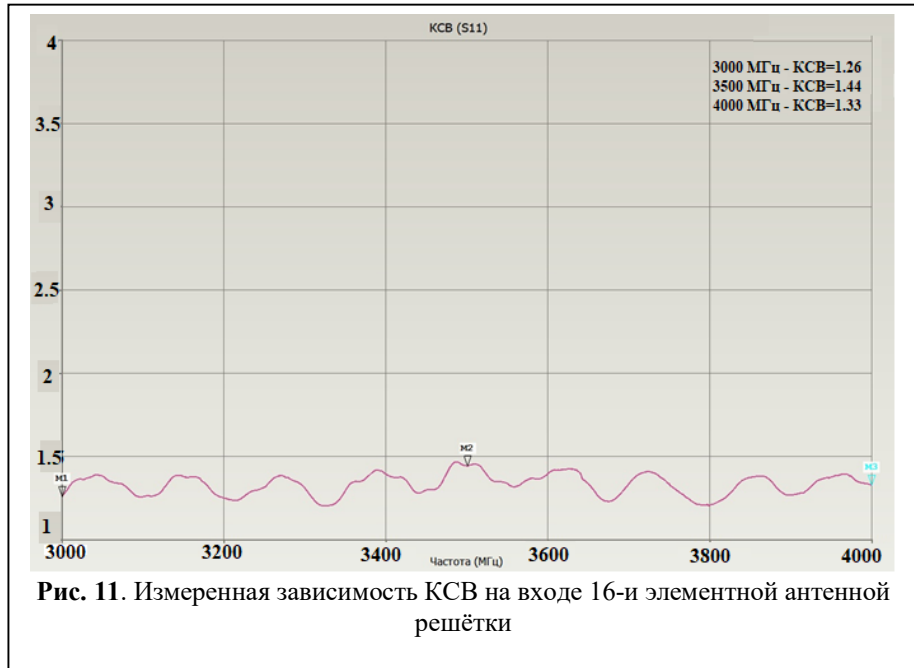


Рис. 11. Измеренная зависимость КСВ на входе 16-и элементной антенной решётки

во всей рабочей полосе частот.

Сравнение результатов, представленных в таблицах 1 и 2, позволяет отметить хорошее совпадение расчётных и экспериментальных результатов.

### Заключение

Отличительная особенность разработанного антенного устройства заключается в сочетании высокого коэффициента усиления и круговой поляризации с широкой полосой рабочих частот. При высоком КУ, превышающем 19 дБ, направленные свойства разработанной широкополосной планарной антенной решётки в рабочей полосе частот 3,4–3,6 ГГц меняются незначительно, сохраняются близкие парамет-

Таблица 2.

Рабочие частоты, ГГц	Параметры						
	КУ, дБ	$\Delta\theta_{0,5}^E$ , град.	УБЛ <sub>1</sub> <sup>E</sup> , дБ	$\Delta\theta_{0,5}^H$ , град.	УБЛ <sub>1</sub> <sup>H</sup> , дБ	КЭ (в/г), дБ	
						$\theta_{\text{макс}}$	$\Delta\theta_{0,5}$
3,4	19,2	19,1	–13,0	18,9	–13,2	–1,7	–3,1–(–2,8)
						–1,8	–1,9–(–1,7)
3,5	19,1	19,9	–13,2	18,5	–13,5	–1,7	–3,2–(–2,6)
						–1,9	–1,8–(–1,9)
3,6	19,1	19,9	–13,3	18,0	–13,0	–1,8	–3,2–(–2,5)
						–1,9	–2,2–(–1,9)

ры ДН в Е- и Н-плоскостях, что является важным свойством для антенн систем связи. Антенная решётка обладает широкополосными поляризационными свойствами. Круговая поляризация в вертикальной и горизонтальной плоскостях с  $KЭ \geq -3,2$  дБ в пределах ширины главного максимума ДН по половинной мощности сохраняется во всей рабочей полосе частот. Антенное устройство характеризуется широкополосным согласованием. В полосе частот, существенно превышающей рабочий диапазон,  $KСВ < 1,5$ . Достоинством антенного устройства является также его технологичность и возможность реализации с использованием технологии изготовления печатных плат. Коробчатый корпус с радиопрозрачной крышкой, выполненной из стеклопластика и имеющий покрытие, устойчивое к солнечной радиации и агрессивным средам, делает возможной эксплуатацию антенного устройства в сложных климатических условиях. Представленные результаты позволяют рассматривать разработанную антенную решётку как оптимальный вариант антенны для современных и перспективных широкополосных систем связи и, в частности, в составе современных наземных комплексов управления и связи БПЛА.

#### Литература

1. Буренок В.М. Формирование новых взглядов на применение беспилотных летательных аппаратов на основе анализа опыта специальной военной операции // Вооружение и экономика. 2024. № 1(67). С. 5–8.
2. Сильников М.В., Карпович А.В., Лазоркин В.И., Вишняков С.М., Пестерев С.Н., Цвятко К.Н. Научно-методическое обоснование способов применения беспилотных летательных аппаратов для разведки и поражения целей: монография. СПб.: НПО Спецматериалов, 2022. 412 с.
3. Баканеев С.А., Сильников М.В., Карпович А.В., Орлов С.А., Чернышев Ю.М. Применение беспилотных летательных аппаратов при управлении огнем

артиллерии. СПб.: Первый ИПХ, 2023. 112 с.

4. Кутахов В.П., Буренок В.М. Перспективы применения и проблемы создания беспилотной авиационной военно-транспортной системы // Вооружение и экономика. 2022. № 2(60). С. 12–22.
5. Аниськин Д.С., Власов С.А., Иванов П.И. [и др.]. Проблема противодействия малогабаритным самонаводящимся беспилотным летательным аппаратам // Боеприпасы XXI век. 2020. № 4. С. 109–117.
6. Логачев В.Г., Минин И.В. Метод стабилизации положения и управления квадрокоптером в пространстве с использованием данных инерциальных и визуальных сенсоров // Фундаментальные исследования. 2015. №11. С. 85–91.
7. Гаврилов В.М., Никитин О.Р., Смирнов Д.С. Анализ ошибок моделирования характеристик многоэлементных радиотехнических систем с радиопрозрачным укрытием // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2024. №2. С. 26–32.
8. Son W.I., Lim W.G. Design of compact quadruple inverted-F antenna with circular polarization for GPS receiver // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2010. Vol. 58, No. 5. Pp. 1503–1510.
9. Nasimuddin Z., Chen N., Qing X. Asymmetric-circular shaped slotted microstrip antennas for circular polarization and RFID applications // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2010. Vol. 58, No. 12. Pp. 3821–3828.
10. Bian L., Guo Y.X., Ong L.C., Shi X.Q. Wideband circularly polarized patch antenna // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2006. Vol. 54, No. 9. Pp. 2682–2686.
11. Zhang C., Liang X. A broadband dual circularly polarized patch antenna with wide beamwidth // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2014. Vol. 13. Pp. 1457–1460.
12. Ramirez R., Flaviis F., Alexopoulos N.G. Single-feed circularly polarized microstrip ring antenna and arrays // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2000. Vol. 48, No. 7. Pp. 1040–1047.
13. Wu J.W., Lu J.H. 2x2 circularly polarized patch antenna arrays with broadband operation // Microwave and Optical Technology Letters. 2003. Vol. 39, No. 5. Pp. 360–363.
14. Chen A., Zhang Y., Chen Z., Cao S. A Ka-band high-gain circularly polarized microstrip antenna array // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2010. Vol. 9. Pp. 1115–1118.

Поступила 11 октября 2025 г.

English

## BROADBAND ANTENNA ARRAY WITH CIRCULAR POLARIZATION FOR UAVS

Valerian Mikhailovich Gavrilov — PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Radio Engineering and Radio Systems, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher

Education “Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs”.

**Valery Konstantinovich Dementiev** — Senior Lecturer, Department of Radio Engineering and Radio Systems, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs”.

**Natalia Nikolayevna Korneeva** — PhD in Engineering, Associate Professor, the Head of Department of Radio Engineering and Radio Systems, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs”.

**Anastasia Maximovna Samsonova** — Student, Department of Radio Engineering and Radio Systems, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs”.

*Address:* 600000, Russian Federation, Vladimir, Gorky St., 87.

*E-mail:* [vgavrilov@vlsu.ru](mailto:vgavrilov@vlsu.ru)

*Abstract:* The special military operation has been characterized by the mass use of a new class of unmanned aerial vehicles (UAVs) – light drones. This class of drones has become an essential tool in various types of combat applications, and their development is currently being given special attention. A critical task in this development is the creation of broadband ground-based combat control and communication points, which require antennas with high gain and wide bandwidth. The distinctive feature of the developed antenna device is the combination of high gain and circular polarization with a wide operating frequency range. With a high gain exceeding 19 dB, the directional properties of the developed broadband planar antenna array in the operating frequency band of 3.4-3.6 GHz change only slightly. Close parameters of the radiation pattern in the E- and H-planes are maintained, which is an important property for antenna systems used in communication. The antenna array exhibits broadband polarization properties. Circular polarization in the vertical and horizontal planes, with an axial ratio of less than 3.2 dB within the width of the main lobe at half power, is maintained throughout the operating frequency band. The antenna device is also characterized by broadband matching, with a VSWR of less than 1.5 across a frequency band significantly exceeding the operating range. An additional advantage of the antenna device is its manufacturability and the possibility of implementation using PCB technology. The box-type housing with a radio-transparent cover made of fiberglass, coated to be resistant to solar radiation and aggressive environments, makes it possible to operate the antenna device in harsh climatic conditions. The presented results suggest that the developed antenna array can be considered an optimal option for modern and advanced broadband communication systems and, in particular, as a component of modern ground-based control and UAV communication complexes

*Keywords:* printed antenna grid, computer modeling, parametric synthesis, experimental study, electrical parameters, communication complex, UAV.

### References

1. *Burenok V.M.* Formation of new views on the use of unmanned aerial vehicles based on the analysis of the experience of a special military operation. *Armament and Economics*. 2024. No. 1(67). Pp. 5–8.
2. *Sylnikov M.V., Karpovich A.V., Lazorkin V.I., Vishnyakov S.M., Pesterev S.N., Tsvyatko K.N.* Scientific and methodological substantiation of methods for using unmanned aerial vehicles for reconnaissance and target engagement: monograph. Saint Petersburg: NPO Spetsmaterialov, 2022. 412 p.
3. *Bakaneev S.A., Sylnikov M.V., Karpovich A.V., Orlov S.A., Chernyshev Yu.M.* The use of unmanned aerial vehicles in artillery fire control. Saint Petersburg: Pervy IPH, 2023. 112 p.
4. *Kutakhov V.P., Burenok V.M.* Prospects for the use and problems of creating an unmanned military transport aviation system. *Armament and Economics*. 2022. No. 2(60). Pp. 12–22.
5. *Aniskin D.S., Vlasov S.A., Ivanov P.I.* [et al.]. The problem of countering small-sized homing unmanned aerial vehicles. *Ammunition XXI century*. 2020. No. 4. Pp. 109–117.
6. *Logachev V.G., Minin I.V.* Method of position stabilization and control of a quadcopter in space using data from inertial and visual sensors. *Fundamental research*. 2015. No. 11. Pp. 85–91.
7. *Gavrilov V.M., Nikitin O.R., Smirnov D.S.* Analysis of errors in modeling the characteristics of multi-element radio systems with a radio-transparent cover. *Radio engineering and telecommunication systems*. 2024. No. 2. Pp. 26–32.
8. *Son W.I., Lim W.G.* Design of compact quadruple inverted-F antenna with circular polarization for GPS receiver. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2010. Vol. 58, No. 5. Pp. 1503–1510.

9. *Nasimuddin Z., Chen N., Qing X.* Asymmetric–circular shaped slotted microstrip antennas for circular polarization and RFID applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2010. Vol. 58, No. 12. Pp. 3821–3828.
10. *Bian L., Guo Y.X., Ong L.C., Shi X.Q.* Wideband circularly polarized patch antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2006. Vol. 54, No. 9. Pp. 2682–2686.
11. *Zhang C., Liang X.* A broadband dual circularly polarized patch antenna with wide beamwidth. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2014. Vol. 13. Pp. 1457–1460.
12. *Ramirez R., Flaviis F., Alexopoulos N.G.* Single–feed circularly polarized microstrip ring antenna and arrays. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2000. Vol. 48, No. 7. Pp. 1040–1047.
13. *Wu J.W., Lu J.H.* 2x2 circularly polarized patch antenna arrays with broadband operation. *Microwave and Optical Technology Letters*. 2003. Vol. 39, No. 5. Pp. 360–363.
14. *Chen A., Zhang Y., Chen Z., Cao S.* A Ka–band high–gain circularly polarized microstrip antenna array. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2010. Vol. 9. Pp. 1115–1118.