

НАДЗЕМНАЯ РАДИОЛИНИЯ СВЯЗИ С РЕТРАНСЛЯТОРАМИ НА 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

техник 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

Аннотация: В настоящее время особый интерес представляют исследования организации надземной радиосвязи с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Новым шагом в развитии технологии радиосвязи стало применение БПЛА-ретрансляторов, позволяющих оперативно предоставлять возможность надёжной, высокоэффективной, помехозащищённой радиосвязи требуемого качества в условиях, когда другие средства связи использовать невозможно или нецелесообразно. С помощью программы «FEKO», «CST Suite» проведено компьютерное моделирование надземной линии связи с ретрансляторами, размещёнными на зависших над земной поверхностью квадрокоптерах. Рассчитаны зависимости напряжённости электрического поля от расстояния, формируемые ретранслятором одного квадрокоптера в зависимости от высоты зависания, и соответствующая мощность на выходе приёмной антенны другого. Расчёты выполнены для средней частоты рабочего диапазона (3.5 ГГц) при мощности излучения 350 мВт. Установлена зависимость дальности связи и скорости передачи информации с высотой зависания квадрокоптера. Представлены характеристики современной системы кинематики квадрокоптера в реальном времени, подтверждающие возможность реализации надземной оперативно развёртываемой линии связи с помощью зависших на определённой высоте БПЛА.

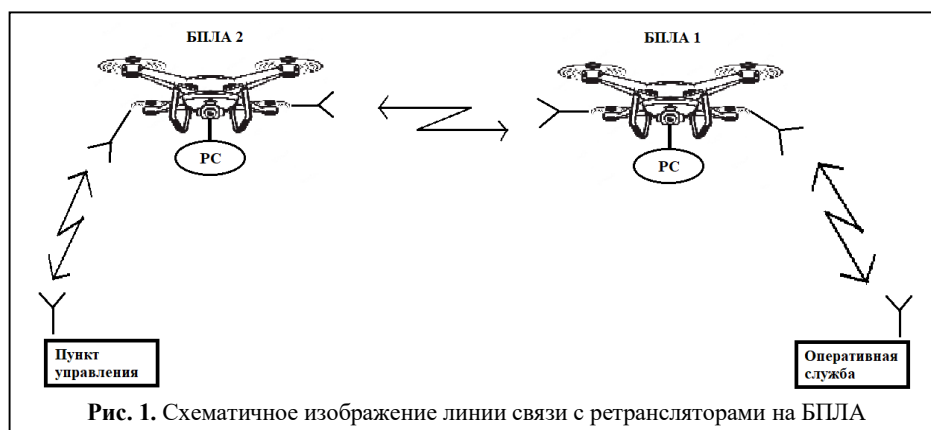
Ключевые слова: надземная линия связи, беспилотный летательный аппарат (БПЛА), квадрокоптер, компьютерное моделирование, распределение напряжённости электрического поля, мощность на выходе приёмной антенны, системы кинематики в реальном времени.

Введение

Применение беспилотных летательных аппаратов вертолётного типа в различных сферах (гражданской и военной) позволяет повысить точность получаемых данных. Этот же класс БПЛА при размещении на нём малогабаритных активных ретрансляторов может стать эффективным средством быстро развёртываемых надземных радиолиний для связи оперативных служб между собой на большие расстояния. Применение БПЛА-ретрансляторов позволяет оперативно предоставлять возможность связи в условиях, когда другие средства связи использовать невозможно или нецелесообразно [1–8].

На рис. 1 приведён вариант использования БПЛА для ретрансляции сигнала (РС) на радиоли-

нии пункта управления и связи с оперативным подразделением. Лёгкие квадрокоптеры с малогабаритными ретрансляторами весом меньше 400 г. особенно удобны для обеспечения и поддержки радиосвязи в условиях быстро изменяющейся боевой обстановки. Запуск и введение в рабочий режим БПЛА-ретрансляторов не превышает 5 минут, время работы в автономном режиме до 6 часов.

**Рис. 1.** Схематичное изображение линии связи с ретрансляторами на БПЛА

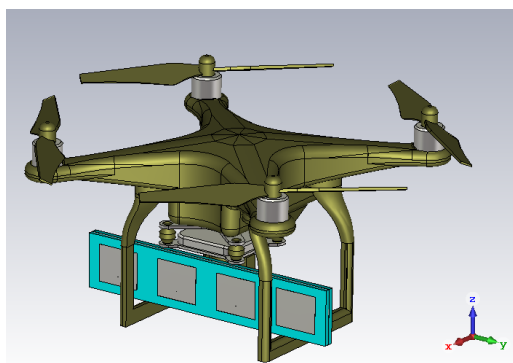


Рис. 2. Квадрокоптер с антенной решёткой

При проектировании радиотрассы важными характеристиками являются напряжённость поля вблизи приёмной антенны и мощность сигнала на выходе приёмной антенны. Последний параметр используется при оценке достаточной чувствительности приёмника.

В статье рассмотрен расчёт указанных характеристик для наземной радиотрассы с двумя ретрансляторами, размещёнными на БПЛА. Результаты носят оценочный характер, поэтому для упрощения задача полагалась детерминированной при следующих исходных данных: мощность излучения 350 мВт; средняя частота рабочего диапазона 3,5 ГГц; направленные передающая и приёмная антенны с коэффициентом усиления 13 дБ; подстилающая плоская земная поверхность характеризуется электродинамическими параметрами $\epsilon = 15$, $\text{tg } \delta = 0,06$; высота подвеса антенны 100–800 м; протяжённость радиотрассы до 100 км.

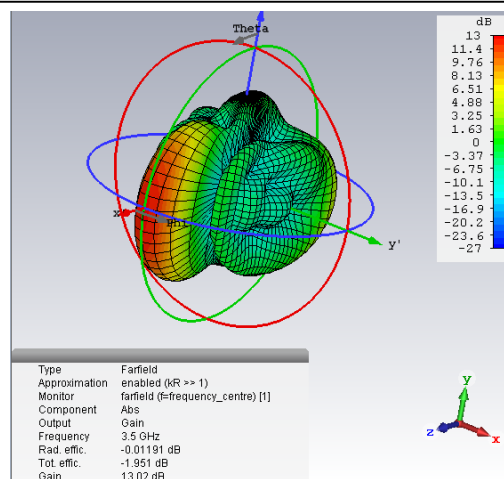
Во всех задачах БПЛА полагались «зависшими» на определенной равной высоте над земной поверхностью при заданном расстоянии между ними. Главные максимумы диаграммы направленности антенны — соосные и встречно-ориентированные.

Решение поставленной задачи реализовано с помощью программы электродинамического моделирования FEKO [9, 10]. Главной особенностью программы FEKO является сочетание базового метода моментов с приближёнными аналитическими методами: методом физической оптики и геометрической теории дифракции. Такое сочетание позволяет преодолеть главный недостаток программы компьютерного моделирования высокочастотных структур: большие затраты ресурсов при моделировании объектов с размерами много больше длины волны. Это позволило, используя результаты расчёта диаграммы направленности антенны, выполненные в программе CST Suite, решить задачу распределения электромагнитного поля на протяжённой наземной трассе [11].

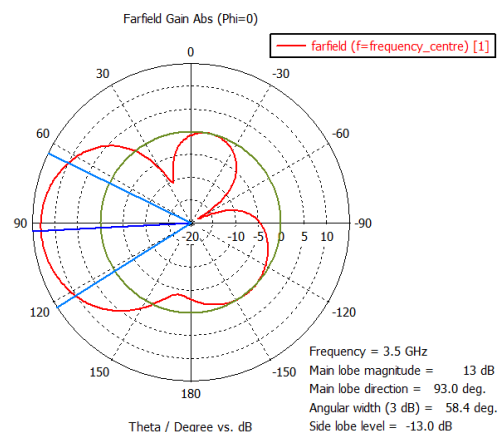
Направленные свойства антенны БПЛА

В качестве БПА использовались квадрокоптеры (рис. 2) с устанавливаемыми на них линейными печатными антенными решётками. Габариты антенной решётки: 265x53x10 мм. На рис 3, а) приведена пространственная ДН антенной решётки в свободном пространстве на частоте 3,5 ГГц, а на

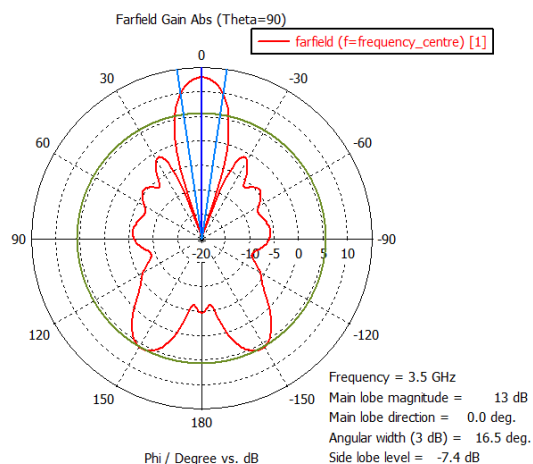
рис. 3 б), в) её сечения в горизонтальной (Н) и вертикальной (Е) плоскостях. Коэффициент усиления (КУ) антенной решётки на частоте 3,5 ГГц равен КУ = 13,0 дБ. Ширина главного максимума ДН по половинной мощности в горизонтальной плоскости $\Delta\theta_{0.5}^H = 16,5^\circ$, в вертикальной плоскости $\Delta\theta_{0.5}^E = 58,4^\circ$. Максимальный уровень боко-



а) пространственная ДН

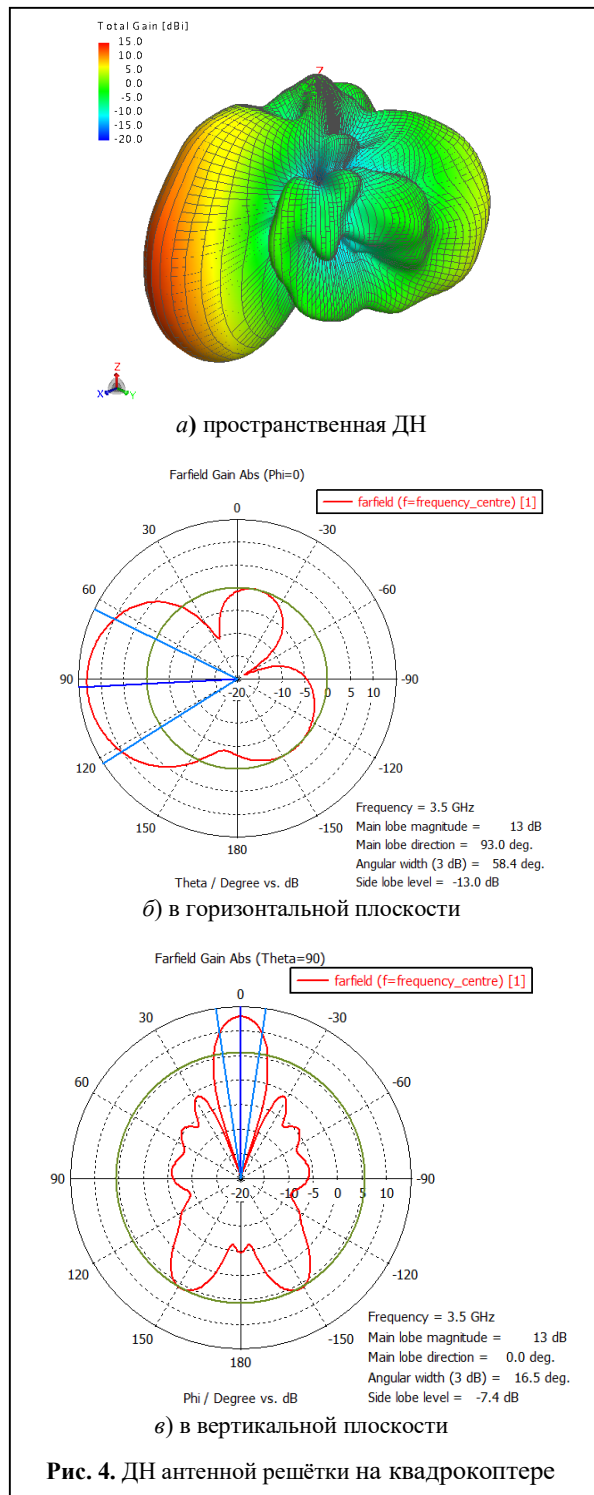


б) в горизонтальной плоскости



в) в вертикальной плоскости

Рис. 3. ДН антенной решётки в свободном пространстве



вых лепестков в горизонтальной плоскости $УБЛ_{\max}^H = -7,4$ дБ, в вертикальной плоскости $УБЛ_{\max}^E = -13,0$ дБ.

На рис 4, а) приведена пространственная ДН антенной решётки в свободном пространстве на частоте 3,5 ГГц, учитывающая конструктивные элементы квадрокоптера, а на рис. 4 б), в) её сечения в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Основные элементы конструкции квадрокоптера выполнены из ABS — пластика. Влияние квадро-

коптера проявилось в снижении КУ антенной решётки на 0,3 дБ, КУ = 12,7 дБ; уменьшении ширины главного максимума ДН в горизонтальной плоскости на $0,5^\circ$, $\Delta\theta_{0.5}^H = 16^\circ$; увеличении ширины главного максимума ДН в вертикальной плоскости на $5,7^\circ$, $\Delta\theta_{0.5}^E = 64,1^\circ$. Максимальный уровень боковых лепестков в горизонтальной плоскости снизился на 1,3 дБ, $УБЛ_{\max}^H = -8,7$ дБ; в вертикальной плоскости увеличился на 1,2 дБ, $УБЛ_{\max}^E = -11,8$ дБ.

На рис. 5, а) приведена пространственная ДН антенной решётки на квадрокоптере, зависшем над земной поверхностью на высоте $h = 100$ м, а на рис. 5 б), в) её сечения в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Влияние земной поверхности проявилось в сильной изрезанности ДН в вертикальной плоскости (рис. 4, б). Рассматривая горизонтальный всплеск в вертикальной плоскости в качестве максимума ДН были получены следующие характеристики направленности в горизонтальной и вертикальной плоскостях: КУ = 18,1 дБ; $\Delta\theta_{0.5}^H = 16,8^\circ$; $УБЛ^H = -8,1$ дБ; $\Delta\theta_{0.5}^E = 0,83^\circ$; $УБЛ^E = 16$ дБ.

Характеристики направленности антенной решётки в свободном пространстве (СП), установленной на квадрокоптере (КК) и в квадрокоптере, зависшем над земной поверхностью (КЗП) на высоте $h = 100$ м, сведены в таблицу 1.

В последующих расчётах ДН антенны с учётом указанных факторов уточнялась для различных вариантов высоты зависания квадрокоптера над земной поверхностью.

Расчёт поля и принимаемой мощности

На рис. 6, а)–з) приведены результаты компьютерного моделирования зависимости напряжённости электрического поля по модулю от расстояния между квадрокоптерами при высоте зависания квадрокоптеров соответственно $h = 100$ м, 200 м, 400 м, 800 м. Из представленных результатов следует, что зависимость носит осциллирующий экспоненциально убывающий характер, перепад амплитуды в которых и период возрастают с увеличением расстояния. С увеличением высоты подвеса антенны размах осцилляций и их период уменьшается. При увеличении подвеса антенны с 200 м и 800 м период осцилляции на участке трассы 60–70 км уменьшился в четыре с половиной раза. При этом амплитуда поля в максимумах практически не изменилась, а в минимумах выросла на 6–7 дБ. Зависимость максимальных, средних и минимальных значений амплитуды поля от расстояния можно представить линейно-ломанной кривой.

Например, при высоте подвеса антенны 200 м на расстоянии трассы 26–38 км зависимости могут быть представлены линейными функциями:

$$E_{\max} = -(0,307r + 48,68),$$

$$E_{cp} = -(0,375r + 59,5),$$

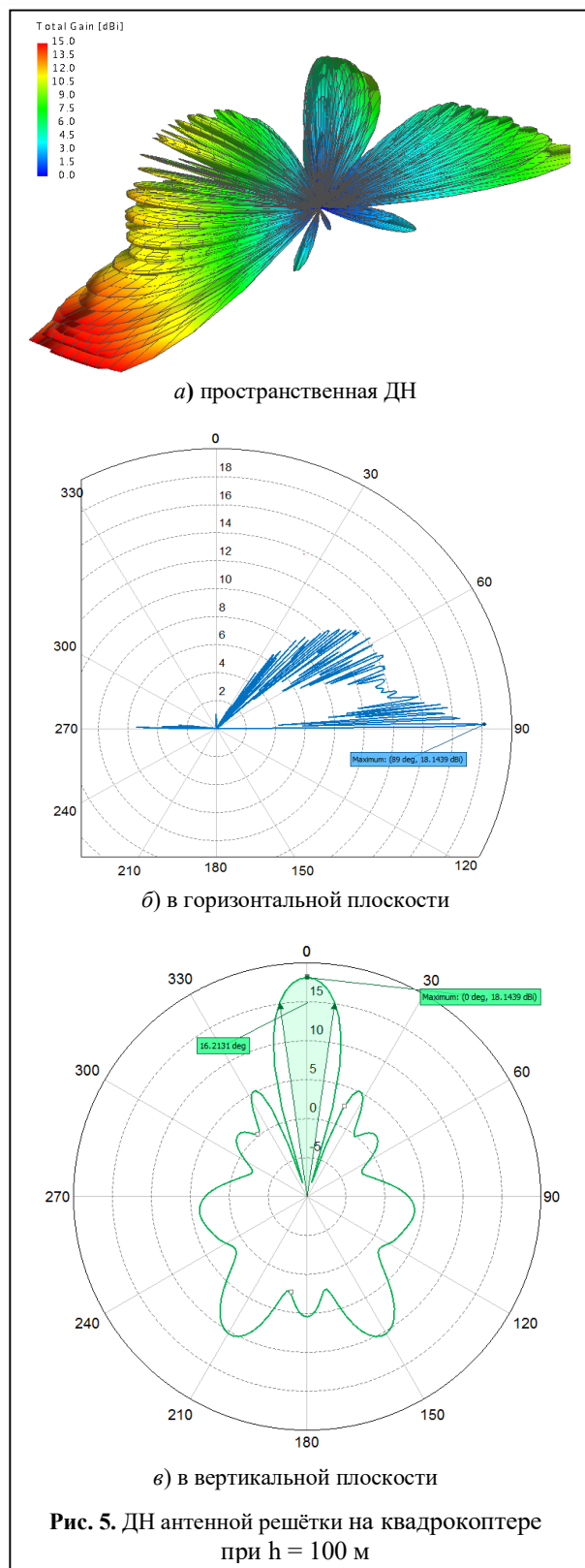


Рис. 5. ДН антенной решётки на квадрокоптере при $h = 100$ м

$$E_{\min} = -(0,22r + 76,36), \text{ дБ } \frac{B}{M},$$

где r задаётся в метрах. Погрешность соотношений на линейных участках зависимости не превышает 0,5 дБ В/м.

Полученный результат можно объяснить, используя лучевое приближение, в соответствии с

Таблица 1.

Параметры	СП	КК	КЗП
КУ, дБ	13	12,7	18,1
$\Delta\theta_{0,5}^H$, град	16,5	16,0	16,2
УБЛ ^H , дБ	-7,4	-8,7	-8,1
$\Delta\theta_{0,5}^E$, град	58,4	64,1	0,8
УБЛ ^E , дБ	-13,0	-11,8	-16,5

которым поле в точках наблюдения формируется прямым лучом и лучами переотражёнными от земной поверхности. При небольших расстояниях между антенной и точками наблюдения протяжённость ломаной траектории отражённых лучей существенно превосходит длину траектории прямого луча, поэтому амплитуда поля, соответствующая переотражённым лучам в точках наблюдения, будет меньше амплитуды поля, соответствующей прямому лучу. Синфазное и противофазное суммирование амплитуд поля, соответствующих прямому и переотражённым лучам, приведёт к результирующей осцилляции поля в точках наблюдения с небольшим перепадом в точках максимума и минимума поля. С увеличением расстояния между антеннами влияние высоты подвеса антенны на амплитуду поля переотражённых лучей снижается. Поля прямого и переотражённых лучей в точках наблюдения оказываются сопоставимы. Как следствие, перепад амплитуды поля в осцилляциях возрастает.

Для зависимостей, приведённых на рис. 6, проведено компьютерное моделирование мощности на выходе приёмной антенны квадрокоптера надземной линии связи при зависании пары квадрокоптеров с соосно и встречно-ориентированными максимумами ДН, на определённой равной высоте в точках трассы, соответствующих минимумам и максимумам распределения напряжённости электрического поля. Фрагменты полученных результатов для участка трассы при $h = 100$ м представлены в таблице 2. Из общего анализа результатов моделирования при $h = 100, 200, 400, 800$ м для трассы протяжённостью 100 км следует, что при близких расстояниях до сечений с максимальными и минимальными значениями напряжённости поля соответствующие уровни мощности на выходе приёмной антенны, при изменении высоты зависания квадрокоптера от 100 м до 800 м, увеличиваются на 10–12 дБ при размещении антенны в минимумах поля, и на 1–2 дБ при размещении антенны в максимумах поля.

При оценке дальности радиосвязи использовались характеристики приёмного радио модуля, приведённые в таблице 3.

Полученные данные выходной мощности были использованы для составления сводной таблицы 4 с результатами оценки дальности радиосвязи на надземной линии с приёмным квадрокоптером зависшим в точках минимума или максимума

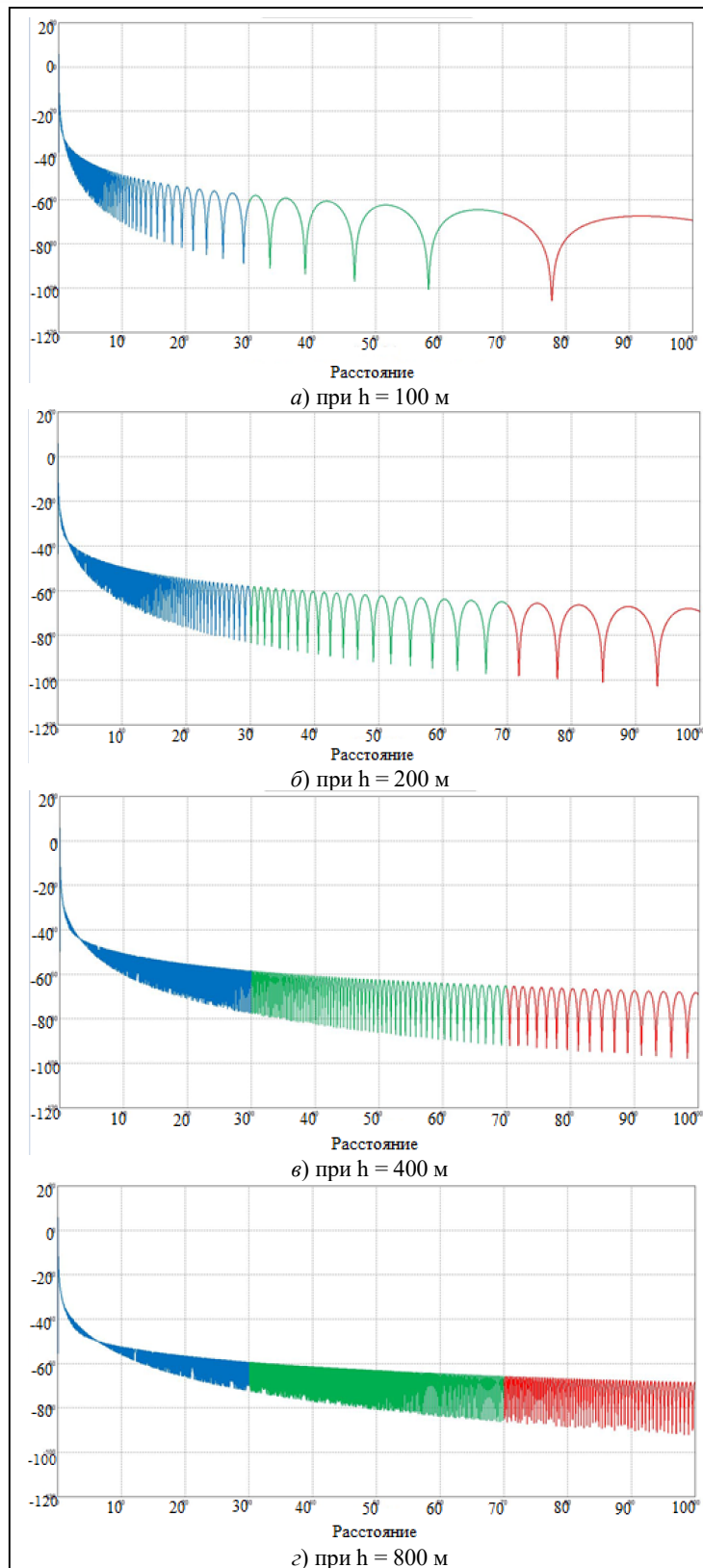


Рис. 6. Зависимость напряжённости электрического поля от расстояния между квадрокоптерами

распределения поля на трассе в зависимости от высоты зависания и скорости передачи информации. Оценка дальности проводилась путём сравнения мощности на выходе приёмной антенны и

соответствующей чувствительности приёмника. Из таблицы 4 следует, что при нахождении в минимумах поля, высоте зависания квадрокоптера 100 м, 200 м, 400 м и скорости передачи информации 5 Мб, 10 Мб, 20 Мб, — дальность связи не превышает 30 км. При увеличении высоты до 800 м уверенный приём становится возможным на расстояниях до 39 км. Снижение скорости передачи до 3 Мб в режиме ШПС увеличивает дальность связи до 38 км при высоте зависания 400 м, и до 50 км при высоте 800 м. При нахождении квадрокоптера в минимумах поля дальность связи на расстоянии близком к ста километрам возможна при высоте зависания 800 м и скорости передачи информации 1 Мб в режиме ШПС.

При размещении квадрокоптера в максимумах поля высота зависания слабо влияет на дальность связи. Так, при скорости передачи 20 Мб и изменении высоты подвеса от 100 м до 800 м дальность связи находилась в пределах 55–66 км, при скорости передачи 10 Мб — в пределах 92–100 км, а при скорости 5 Мб — превышает 100 км.

Использование квадрокоптера в качестве ретранслятора предполагает наличие режима удержания высоты. Режим удержания высоты позволяет пилоту управлять креном, тангажем и рысканьем не сменяя высоту. Высокую точность позиционирования современных квадрокоптеров обеспечивают системы кинематики в реальном времени — RTK (Real Time Kinematic) [12]. В системе RTK реализован метод спутникового позиционирования, который заключается в мгновенной обработке спутниковых данных позиционирования с использованием корректирующей информации с наземной опорной мобильной станции. Например, для дрона DJI Agras T30 Combo [13], оснащённого мобильной станцией высокой точности

D-RTK 2 High Precision GNSS, точность зависания при хорошем сигнале спутниковых систем позиционирования: по горизонтали ± 10 см, по вертикали ± 10 см. Для сравнения, при отключении системы D-RTK: по горизонтали $\pm 0,6$ м, по вертикали $\pm 0,3$ м. Дрон имеет общую массу 26,4 кг, взлётную массу 36,5 кг, продолжительность зависания в воздухе

Таблица 2.

h = 100 м	Точки минимума		Точки максимума	
Номер точки на графике	Расстояние до точки	Мощность на выходе приёмной антенны	Расстояние до точки	Мощность на выходе приёмной антенны
	х, м	Р, дБВт	х, м	Р, дБВт
1	33340	–138,205	31060	–106,451
2	38890	–141,476	35820	–107,663
3	46670	–144,478	42290	–109,082
4	58340	–148,182	51600	–110,789
5	77780	–153,45	66140	–112,93

Таблица 3.

Скорость передачи информации, Мб	20	10	5	3 (шпс)	1 (шпс)
Чувствительность приёмника, дБ мВт	–82	–88	–94	–100	–110

Таблица 4.

Характерные уровни поля	Н, м	Дальность связи, км				
		Скорость передачи информации, Мб				
		20	10	5	3(шпс)	1(шпс)
	100					
Мин		<30	<30	<30	<30	<35
Макс		≤66	≤92	>100	>100	>100
	200					
Мин		<30	<30	<30	<30	<35
Макс		≤66	≤92	>100	>100	>100
	400					
Мин		<30	<30	<30	<38	<71
Макс		≤55	≤100	>100	>100	>100
	800					
Мин		<30	<30	<39	<50	<96
Макс		≤60	≤92	>100	>100	>100

20,5 мин, скорость полёта 7 м/с, максимальная высота полёта 4500 м.

Из рассчитанных зависимостей амплитуды поля от расстояния следует, что при высоте зависания квадрокоптеров $h = 100$ м на расстоянии 60–70 км длина участка, соответствующая уменьшению максимальной амплитуды поля на 3 дБ, не меньше 8,7 км; на расстоянии 90–100 км — больше 18,5 км. При высоте зависания $h = 200$ м на удалении 60–70 км ширина максимумов по половинной мощности превышает 1,7 км, а при удалении 90–100 км — 4,8 км. Для $h = 400$ м ширина максимумов поля по половинной мощности больше 0,43 км на удалении 60–70 км, и больше 1,09 км на расстоянии 90–100 км. Соответствующие участки при $h = 800$ м превышают 60 м при расстоянии 60–70 км, и 170 м на расстоянии 90–100 км. Таким образом, современная система позиционирования

квадрокоптеров-ретрансляторов в режиме удержания способны обеспечить допустимые для надёжной радиосвязи изменения принимаемой мощности при пространственном смещении относительно заданного поглощения.

Заключение

Представленные результаты позволяют сделать следующие выводы. При зависании квадрокоптера в точках минимума поля на высотах (100...800) м и скорости передачи информации (5...20) Мб дальность связи не превышает 39 км. В режиме ШПС при скорости передачи 3 Мб и высоте зависания 800 м дальность связи увеличивается до 50 км. Дальность связи до 100 км может быть получена в режиме ШПС при скорости передачи 1 Мб и высоте зависания квадрокоптера не меньше 800 м. При размещении квадрокоптера в точках максимума поля высота зависания (100...800) м и скорость передачи информации (10...1 (ШПС)) Мб слабо влияют на дальность связи и для указанных случаев близко или превышает 100 км. При скорости передачи 20 Мб и высоте зависания (100...800) м дальность свя-

зи находится в пределах (55...66) км. Необходимую точность позиционирования можно обеспечить с помощью системы кинематики в реальном времени — RTK. Рассчитанные зависимости амплитуды поля от расстояния для различных высот зависания квадрокоптера позволяют оценить область смещения квадрокоптера в горизонтальной плоскости относительно максимумов поля, соответствующих уменьшению амплитуды поля на 3 дБ. При высоте зависания 100 м, 200 м, 400 м, 800 м на расстояниях (60...70) км ширина максимумов распределения поля по половинной мощности получилась равной соответственно 8,7 км, 1,7 км, 480 м и 60 м; а на расстоянии (90...100) км соответственно 18,5 км, 4,8 км, 1,09 км и 170 м. Сопоставление характеристик современных систем кинематики с приведёнными результатами допустимых смещений положения квадрокоптера относительно точки зависания позволяет сделать

заключение о возможности успешной реализации надземной линии связи с БПЛА-ретрансляторами протяжённостью до 100 км и скоростью передачи информации до 10 Мб.

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. Баканев 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. Zeng Y., Zhang R., Lim T.J. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges // IEEE Communications Magazine. 2016. Vol. 54. No. 5. Pp. 36–42.
6. Михалев О.А., Гасимов А.Ф. Анализ беспилотных авиационных систем в качестве потенциальных платформ для размещения ретранслятора радиосигнала в интересах системы связи Минобороны России // Сб.

статей и докладов по материалам ежегодной Научно-практической конференции «Перспективы развития и применения комплексов с беспилотными летательными аппаратами», Коломна: Государственный центр беспилотной авиации МО РФ, 2016. С. 180–185.

7. Васильев В.П., Родионов Д.В. Использование малогабаритных беспилотных летательных аппаратов в качестве ретрансляторов связи // Вестник Воронежского института ФСИН России. 2015. №2. С. 11–14.
8. Галимов А.Ф., Нестеренко А.Г. Методика расчета энергетических параметров зоны обслуживания станцией радиодоступа, размещенной на беспилотном летательном аппарате // Проблемы управления рисками в техносфере. 2017. №1(41). С. 85–93.
9. Банков С.Е., Курушин А.А. Расчет излучаемых структур с помощью FEKO. М.: ЗАО «НПП «Родник», 2008, 246 с.
10. Банков С.Е., Курушин А.А. Практикум проектирования СВЧ устройств в среде FEKO. М.: ЗАО «НПП «Родник», 2009. 200с.
11. Курушин А.А., Пластиков А.Н. Проектирование СВЧ устройств в среде CST Microwave Studio. М.: Изд-во МЭИ, 2011. 155 с.
12. 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.
13. Сельскохозяйственные дроны [Электронный ресурс]. URL: <https://dji-rus.ru/selskohozyaystvennyye-drony/dji-agras-t30/> (дата доступа 06.04.2026)

Поступила 7 апреля 2026 г.

English

ELEVATED RADIO COMMUNICATION LINK WITH UAV-MOUNTED RELAYS

Valerian Mikhailovich Gavrilov — PhD in Engineering, Professor, Department of Radio Engineering and Radio systems, Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs.

Valery Konstantinovich Dementiev — Senior Lecturer, Department of Radio Engineering and Radio systems, Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs.

Natalia Nikolayevna Korneeva — PhD in Engineering, the Head of Department of Radio Engineering and Radio systems, Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs.

Anastasia Maximovna Samsonova — the Technician, Department of Radio Engineering and Radio systems, Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs.

Address: 600000, Russian Federation, Vladimir, Gorky Str., 87.

E-mail: vgavrilov@vlsu.ru

Abstract: At present, research on the organization of overhead radio communication using unmanned aerial vehicles (UAVs) is of particular interest. A new step in the development of radio communication technology was the use of UAV repeaters, which make it possible to quickly provide the possibility of reliable, highly efficient, noise-protected radio communication of the required quality in conditions when it is impossible or inexpedient to use other means of communication. With the help of the FEKO program, CST Suite, a computer simulation of the overhead communication line with repeaters located on quadcopters hovering above the earth's surface was carried out. Dependences of electrotrical field intensity on distance, formed by repeater of one quadcopter depending on hovering height, and corresponding power at output of receiving antenna of the other, are calculated. Calculations are made for the average frequency of the operating range (3.5 GHz) with a radiation power of 350 mW. The relationship between the communication range and the information transfer rate and the height of the quadcopter hang is established. Characteristics of a modern real-time kinematics system for the drone are presented, confirming the feasibility of implementing a ground-based rapidly deployable communication line using UAVs suspended at a specified height

Keywords: overhead communication line, unmanned aerial vehicle (UAV), quadcopter, computer modeling, electric field strength distribution, output power of the receiving antenna, kinematics systems in real time.

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. *Weapons and economics*. 2024. No. 1(67). Pp. 5–8.
2. *Silnikov M.V., Karpovich A.V., Lazorkin V.I., Vishnyakov S.M., Pesterev S.N., Tsyatko K.N.* Scientific and methodological justification of methods for using unmanned aerial vehicles for reconnaissance and target destruction: monograph. St. Petersburg: NPO Spetsmaterialov, 2022. 412 p.
3. *Bakanev S.A., Silnikov M.V., Karpovich A.V., Orlov S.A., Chernyshev Yu.M.* The use of unmanned aerial vehicles in artillery fire control. St. Petersburg: Pervyi IPH, 2023. 112 p.
4. *Kutakhov V.P., Burenok V.M.* Prospects for the use and problems of creating an unmanned aviation military transport system. *Weapons and economics*. 2022. No. 2(60). Pp. 12–22.
5. *Zeng Y., Zhang R., Lim T.J.* Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges. *IEEE Communications Magazine*. 2016. Vol. 54. No. 5. Pp. 36–42.
6. *Mikhalev O.A., Gasimov A.F.* Analysis of unmanned aerial systems as potential platforms for placing a radio signal repeater in the interests of the communication system of the Russian Ministry of Defense. *Sat. articles and reports on the materials of the annual Scientific and Practical Conference «Prospects for the Development and Use of Complexes with Unmanned Aerial Vehicles»*. Kolomna: State Center for Unmanned Aviation of the Ministry of Defense of the Russian Federation, 2016. Pp. 180–185.
7. *Vasiliev V.P., Rodionov D.V.* The use of small-sized unmanned aerial vehicles as communication repeaters. *Bulletin of the Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia*. 2015. No. 2. Pp. 11–14.
8. *Galimov A.F., Nesterenko A.G.* Methodology for calculating the energy parameters of the service area by a radio access station located on an unmanned aerial vehicle. *Problems of risk management in the technosphere*. 2017. No. 1 (41). Pp. 85–93.
9. *Bankov S.E., Kurushin A.A.* Calculation of radiated structures using FEKO. Moscow: CJSC NPP Rodnik, 2008, 246 p.
10. *Bankov S.E., Kurushin A.A.* Workshop for the design of microwave devices in the FEKO environment. Moscow: CJSC NPP Rodnik, 2009. 200 p.
11. *Kurushin A.A., Plastikov A.N.* Design of microwave devices in the CST Microwave Studio environment. Moscow: Publishing House MPEI, 2011. 155 p.
12. *Logachev V.G., Minin I.V.* Method of stabilizing the position and control of a quadrocopter in space using data from inertial and visual sensors. *Fundamental research*. 2015. No. 11. Pp. 85–91.
13. Agricultural drones [Electronic source]. URL: <https://dji-rus.ru/selskohozyaystvennye-drony/dji-agras-t30/> (Access Date 06.04.2026)