

**Пономарев Павел Ардалионович** – ЗАО «Воздухоплавательный центр «Авгурь»; e-mail: [ponomarev.p@rosaerosystems.com](mailto:ponomarev.p@rosaerosystems.com); 125315, г. Москва, Ленинградский проспект, 68, стр. 16; тел.: 84959897425, доб. 118, 89166254146; к.т.н.; зам. генерального директора – директор по государственным программам.

**Ponomarev Pavel Ardalionovich** – JSC "Aeronautical Centre" Augur"; e-mail: [ponomarev.p@rosaerosystems.com](mailto:ponomarev.p@rosaerosystems.com); 68, bld. 16, Leningradsky avenue, Moscow, 125315, Russia; phone/fax: +74959897425, +79166254146; cand. of eng. sc.; deputy general director – government relations director.

УДК 621.396

**Н.М. Боев, П.В. Шаршавин, И.В. Нигруца**

### **ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМ СВЯЗИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ НА БОЛЬШИЕ РАССТОЯНИЯ**

*Авторами рассматриваются вопросы построения систем цифровой связи беспилотных летательных аппаратов для передачи высокоскоростной информации на большие расстояния. Основными проблемами на пути создания систем связи дальнего действия являются: обеспечение радиовидимости между летательным аппаратом (ЛА) и наземным комплексом управления; компенсация большого затухания сигнала на трассе. Прямая видимость между ЛА и наземным комплексом управления может быть достигнута за счет увеличения высоты полета ЛА и увеличением высоты подъема наземной антенны. Передача информации с высокой скоростью на расстояния более 300 км возможна с использованием ретрансляционного оборудования, спутниковых систем связи, стационарных систем передачи информации. Для компенсации большого затухания сигнала на трассе могут быть предприняты следующие меры: увеличение выходной мощности передатчика; увеличение коэффициентов усиления антенного оборудования. Для повышения коэффициента усиления бортового антенно-фидерного оборудования предлагается использование опорно-поворотного устройства на борту летательного аппарата. Авторами выполнен расчет бюджета канала связи для передачи информации на большие расстояния. В работе рассматриваются возможные варианты построения бортовой приемопередающей системы. Показывается, что оптимальным вариантом является создание опорно-поворотного устройства, на платформе которого размещаются: антенно-фидерное оборудование, приемопередатчики, блоки усилителей мощности и малошумящих усилителей. В этом случае удастся разместить оборудование системы связи максимально компактно при использовании надежных вращающихся переходов для линий передачи цифровой информации и для линий передачи аналоговой информации с датчиков диапазонов различных длин волн.*

*Цифровые системы связи; беспилотные летательные аппараты.*

**N.M. Boev, P.V. Sharshavin, I.V. Nigruca**

### **UAVS COMMUNICATION SYSTEMS FOR LONG-DISTANCE INFORMATION TRANSMISSION**

*The problems of long distance digital communication links for unmanned aerial vehicles (UAV) are considered. The main challenges to create long-range communication systems are providing radio visibility and compensating of large path losses. Radio visibility between UAV and ground control unit (GCU) can be achieved by increasing the altitude of UAV and increasing the height of GCU antenna mounting. High speed data transmission over distance more than 300 km is possible by using repeater, satellite communication systems, and fixed communication equipment. The path losses compensation can be achieved by increasing the output power of communication systems transmitters and increasing the antennas gain. In order to increase UAVs antenna*

*gain, the authors propose to use the turn-table for antenna on the aircraft. Link budget calculations for UAVs communication links are shown. The paper discusses possible variants of building onboard communication system. It is shown that the optimal way is creating turn-table and placing on the platform: antennas, communication systems, power and low noise amplifiers. In this case the equipment placement can be achieved as compact as possible using slip rings for transmitting digital data and analog signals.*

*Digital communication systems; unmanned aerial vehicles.*

Многие задачи, решаемые современными комплексами беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), требуют наличия высокоскоростных линий передачи информации между БПЛА и наземным комплексом управления (НКУ) [1]. Например, задачи оперативного мониторинга или разведки с помощью технологий БПЛА предполагают получение на борту и доставку на НКУ растровых изображений разного разрешения, получаемых с датчиков различных диапазонов длин волн. Наиболее распространенная на сегодняшний день технология передачи информации заключается в непрерывной трансляции изображения по мере его получения в цифровом или аналоговом формате, структура которого не меняется в течение всего полета. Необходимо учесть, что непрерывная трансляция изображений имеет следующие особенности:

- ◆ значительная часть визуальной информации может не иметь искомым признаков;
- ◆ отсутствует гарантия достоверной доставки информации;
- ◆ требуется постоянное излучение сигнала передатчиком, что позволяет легко обнаружить БПЛА и установить его координаты.

Существующая технология доставки изображения не эффективно использует ресурсы радиоканала. В этой связи становится актуальным решение следующих задач:

- ◆ реализация функции гарантированной доставки (особенно для изображений высокого пространственного разрешения);
- ◆ реализация адаптивного снижения разрешения видеопотока в зависимости от актуального бюджета канала связи;
- ◆ реализация возможности получения прошлого снимка в полном разрешении с целью уточнения деталей изображения;
- ◆ создание адаптивной системы передачи информации, способной эффективно использовать энергетический и спектральный ресурс канала связи [2–4].

Как правило, на борту БПЛА размещаются не менее двух систем связи: дуплексная/полудуплексная аппаратура передачи командно-телеметрической информации и симплексная система передачи информации полезной нагрузки [1]. Аппаратура передачи командно-телеметрической информации предназначена для низкоскоростной передачи командной информации с НКУ на борт БПЛА и низкоскоростной передачи телеметрической информации с борта БПЛА на НКУ. Аппаратура передачи информации полезной нагрузки предназначена для односторонней высокоскоростной передачи информации полезной нагрузки с борта БПЛА на НКУ. На рис. 1 показаны возможные варианты реализации систем связи комплексов БПЛА.

Прямая связь между БПЛА и НКУ в диапазонах СВЧ возможна только в пределах прямой видимости. Для повышения надежности комплекса БПЛА на борту устанавливаются несколько приемопередатчиков различных диапазонов длин волн [1]. Передача телеметрической информации при полетах на большие расстояния может осуществляться с помощью спутниковых систем связи (Iridium, Globalstar и др.). Высокоскоростная передача информации полезной нагрузки может также осуществляться через малоразмерные спутниковые терминалы, что требует установки на борт ЛА высоконаправленной антенны с возможностью сканирования. В простейшем случае это параболическая антенна на опорно-поворотном устройстве.

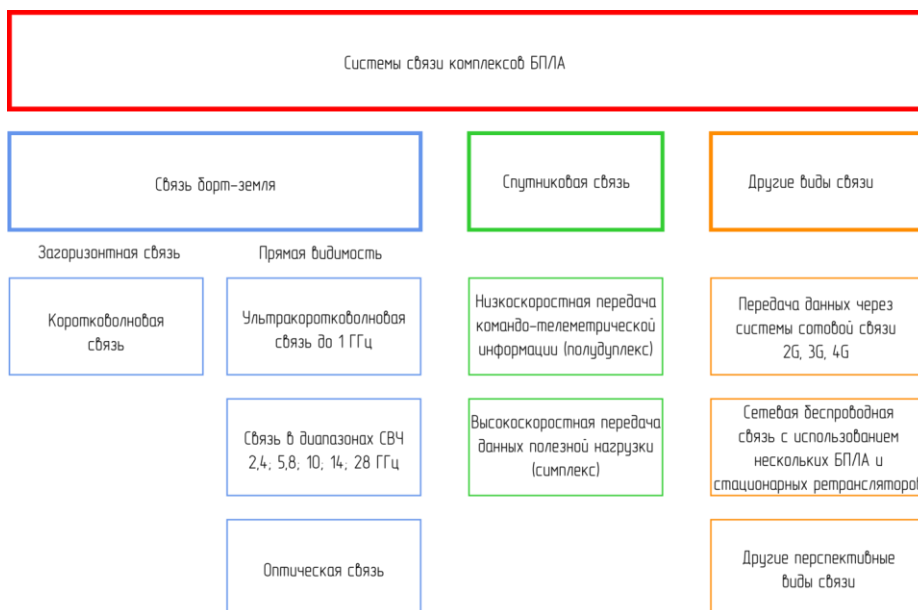


Рис. 1. Системы связи комплексов БПЛА

Несмотря на большое количество возможных вариантов реализации систем передачи командно-телеметрической информации и информации полезной нагрузки, оптимальным и наиболее часто используемым остается вид связи, при котором данные передаются напрямую между БПЛА и НКУ. В этом случае удастся реализовать возможность передачи информации с большой скоростью, недоступной спутниковым системам связи, и при этом не зависеть от стационарных гражданских систем связи. Одним из ограничивающих факторов является расстояние радиовидимости между БПЛА и НКУ (табл. 1).

Таблица 1

Расстояние радиовидимости между БПЛА и НКУ

Высота полета БПЛА, м	Дальность видимости (расстояние до радиогоризонта), км			
	При высоте подъема антенны НКУ, м			
	1	10	20	30
100	39	47	52	55
250	60	68	72	76
500	83	91	96	99
<b>750</b>	<b>101</b>	<b>109</b>	<b>114</b>	<b>117</b>
1000	117	124	129	132
<b>1500</b>	<b>142</b>	<b>150</b>	<b>154</b>	<b>158</b>
2000	163	171	176	179
<b>3000</b>	<b>199</b>	<b>207</b>	<b>212</b>	<b>215</b>
4000	229	237	242	245
5000	256	264	268	272
6000	280	288	293	296
<b>7000</b>	<b>302</b>	<b>310</b>	<b>315</b>	<b>318</b>
8000	323	331	335	339
9000	342	350	355	358
10000	361	368	373	377

Без учета рефракции в атмосфере и при отсутствии препятствий на пути распространения радиоволн существует возможность организации прямой связи между БПЛА и НКУ на дальностях до 200–300 км. Для повышения дальности работы системы связи необходимо увеличивать высоту полета ЛА и использовать мачтовые сооружения для антенны НКУ (рис. 2).

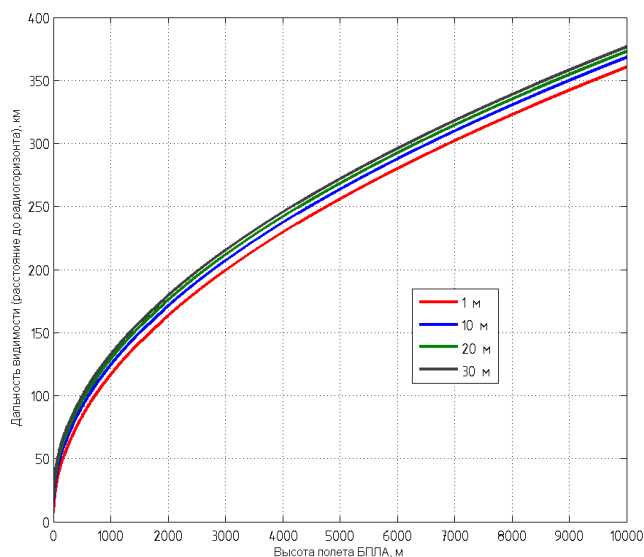


Рис. 2. Дальность прямой видимости БПЛА в зависимости от высоты полета и высоты подъема антенны НКУ

Большое расстояние между БПЛА и НКУ приводит к большому затуханию сигнала на трассе (рис. 3), которое необходимо компенсировать повышением выходной мощности сигнала передатчиков и использованием антенных систем с большим коэффициентом усиления.

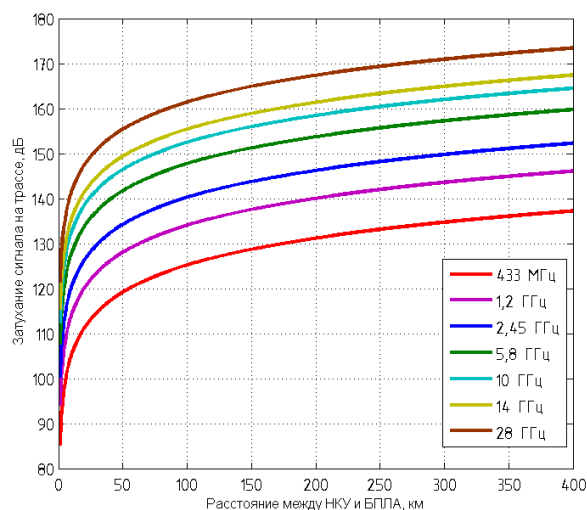


Рис. 3. Затухание сигнала на трассе для различных диапазонов длин волн и при различном расстоянии между БПЛА и НКУ

Передача информации с высокой скоростью (десятки и сотни Мбит/с) возможна только в диапазонах частот выше 1 ГГц. Для компенсации большого затухания на трассе в этих диапазонах частот могут быть использованы параболические антенны большого диаметра (рис. 4). Передвижные комплексы управления БЛА должны быть оборудованы опорно-поворотными устройствами с параболическими антеннами диаметром от 1 до 3 м, в стационарных станциях управления БЛА могут быть использованы антенны большего диаметра.

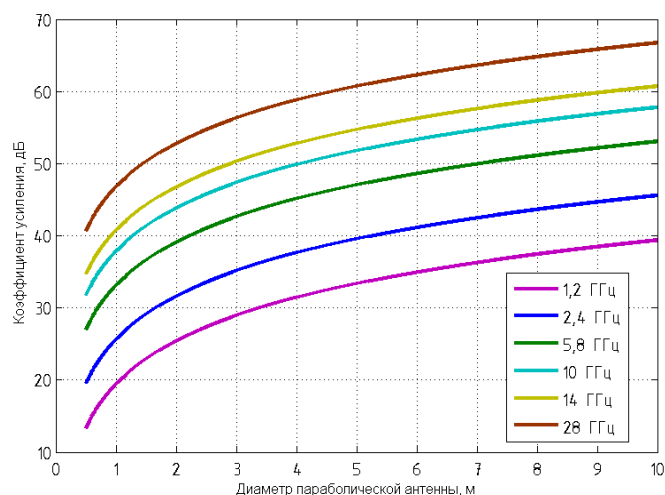


Рис. 4. Зависимость коэффициента усиления параболической антенны от диаметра зеркала для различных диапазонов

Для расчета бюджета канала передачи информации между БЛА и НКУ необходимо рассчитать мощность теплового шума на входе приемника, которая зависит от полосы пропускания аналогового тракта (рис. 5).

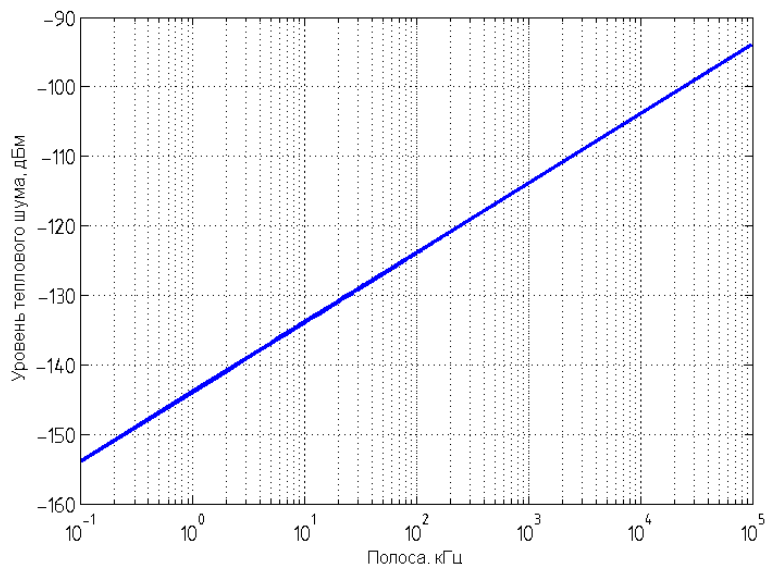


Рис. 5. Зависимость мощности теплового шума на входе приемника от ширины полосы пропускания аналогового тракта

В табл. 2 приведен анализ бюджета канала связи для рабочего диапазона частот 2,4 ГГц, расстояния между БПЛА и НКУ 150 км и полосе частот 20 МГц.

Таблица 2

Анализ бюджета канала связи от БПЛА к НКУ

№	Позиция	Усиление/ослабление, дБ (дБм)	Итого, дБм
1	Выходная мощность передатчика	+30	+30
2	Потери в фидере и разъемах БПЛА	-1,5	+28,5
3	Усиление антенны БПЛА	+10	+38,5
4	Потери на распространение (2,4 ГГц, 150 км)	-145	-106,5
5	Усиление антенны НКУ	+30	-76,5
6	Потери в фидере и разъемах НКУ	-1,5	-78
7	Уровень шума на входе приемника (полоса 20 МГц)	-100	
	<b>Отношение сигнал/шум</b>	<b>+22 дБ</b>	

Как видно из табл. 2, для обеспечения бюджета канала связи при большом затухании сигнала на трассе необходимо использовать направленные антенны на борту БПЛА. Задача управления направлением максимального усиления бортовой антенны может быть решена несколькими способами:

1. Использование многоэлементной антенной решетки с управляемой диаграммой направленности.
2. Использование нескольких переключаемых антенн.
3. Установка антенны на опорно-поворотном устройстве.

Рассмотрим эти способы отдельно.

1. Кольцевая антенная решетка (рис. 6) может быть использована для создания антенной системы с управляемым направлением максимума диаграммы направленности. Благодаря кольцевой симметрии антенной решетки удается получить направленные диаграммы, которые мало меняются при сканировании в пределах  $360^\circ$  в плоскости решетки.

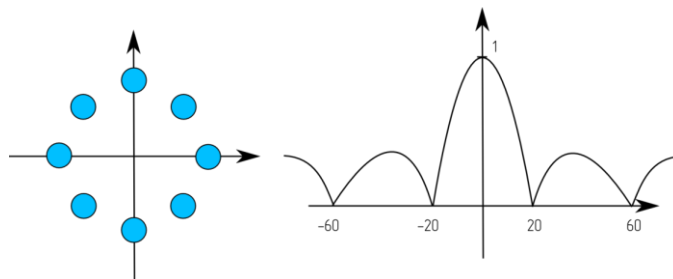


Рис. 6. Кольцевая антенная решетка

Для получения большого коэффициента усиления кольцевой антенной решетки необходимо увеличивать число элементов (32, 64 и более). Преимуществом антенной решетки является возможность немеханического сканирования как в азимутальной плоскости, так и по углу места. При этом во время сканирования передача сигнала может не прерываться. Использование многоэлементной антенной решетки осложняется необходимостью изготовления сложных и дорогих диаграммообразующих устройств.

2. При использовании нескольких переключаемых остронаправленных антенн пространственные направления по азимуту разбиваются на сектора (зоны, рис. 7). Минимальное количество антенн – 4, в этом случае ширина диаграммы направленности должна составлять около  $90^\circ$ . При использовании широко распространенных патч-антенн с шириной диаграммы направленности около  $60^\circ$ , число секторов равно 6. С увеличением коэффициентов усиления антенн число зон растет, для размещения большого количества антенн необходимо увеличивать габаритные размеры и массу всей антенной системы. Наличие переключаемых элементов неизбежно приводит к перерывам в передаче информации.

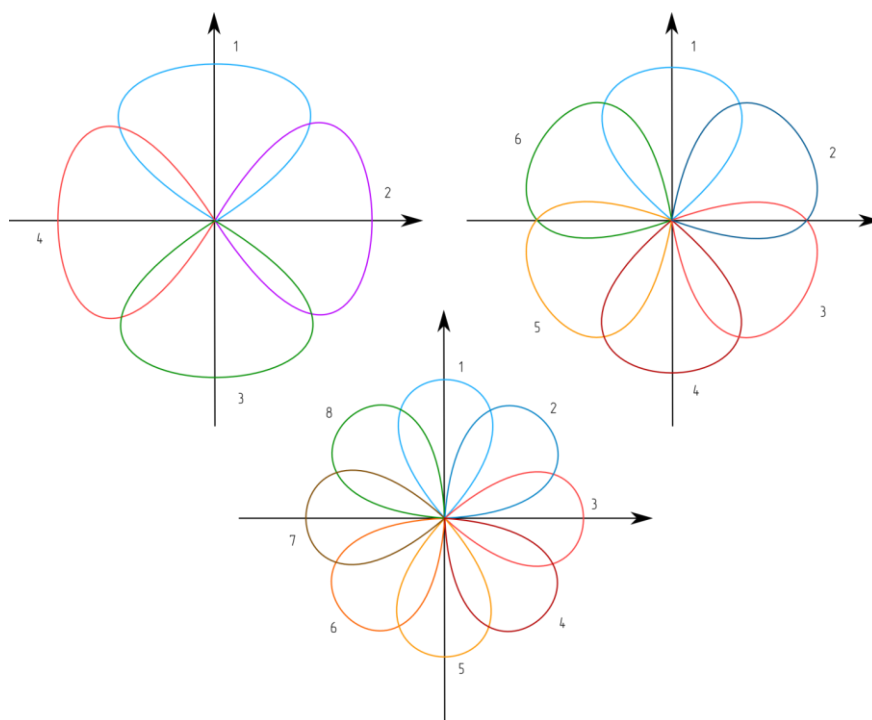


Рис. 7. Массив переключаемых остронаправленных антенн

При наличии нескольких антенн на борту ЛА возникает необходимость выбора антенны, направленной в сторону НКУ, требуется коммутация сигналов. Возможны несколько вариантов реализации подобной системы:

А. Переключение выхода усилителя мощности передатчика между антеннами (один передатчик, один усилитель мощности, несколько антенн).

Б. Переключение выхода передатчика между усилителями мощности и антеннами (один передатчик, несколько совмещенных усилителей мощности и антенн).

В. Переключение цифрового сигнала между передатчиками (число передатчиков и усилителей мощности равно числу антенн).

Рассмотрим эти варианты по отдельности.

А. В простейшем случае выходной сигнал усилителя мощности коммутируется между несколькими антеннами (рис. 8).

Достоинством этого варианта является использование единого передающего модуля и усилителя мощности для работы на несколько антенных устройств. Недостатками являются: потери в коммутирующем устройстве; наличие ограничений по уровню мощности для полупроводниковых коммутаторов.

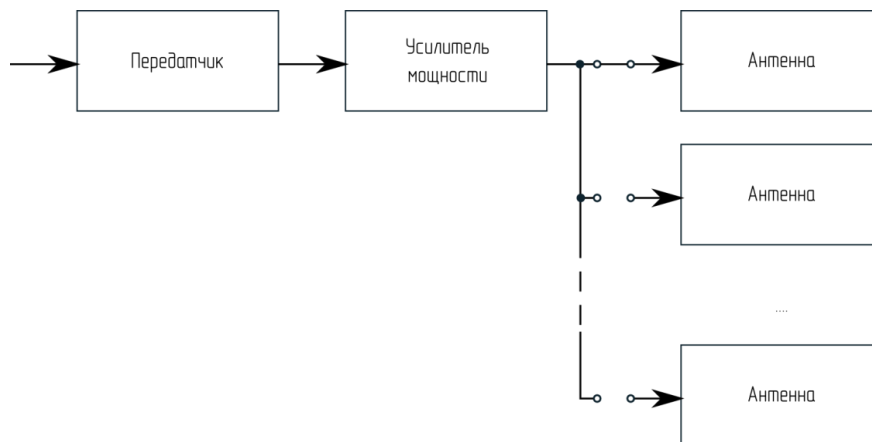


Рис. 8. Переключение выхода усилителя мощности передатчика между антеннами (один передатчик, один усилитель мощности, несколько антенн)

Быстродействующие полупроводниковые коммутаторы имеют большие потери (0,3...2 дБ) и малую допустимую мощность: точка децибельной компрессии в основном находится до +30...40 дБм. Электромеханические коммутаторы рассчитаны на большие мощности и имеют малые потери (рис. 9).



Рис. 9. Электромеханический коммутатор DowKey 581-420802A (1 вход, 8 выходов, 0...18 ГГц, 50 Ом, потери на частоте до 4 ГГц 0,2 дБ при максимальной мощности до 100 Вт)

Недостатком электромеханических коммутаторов является высокое время переключения (до 20 мс для DowKey 581-420802A) и высокая цена.

Б. Для снятия ограничений, которые накладывает коммутатор СВЧ-сигналов, усилитель мощности передатчика может быть вынесен за переключатель. В этом случае число усилителей мощности равно числу антенн (рис. 10).

К недостаткам такого подхода можно отнести: наличие нескольких усилителей мощности, которыми нужно управлять (включать/выключать при переключении антенн); усилители СВЧ-сигналов высокой мощности (более 1 Вт) занимают много места и имеют большую массу. Для данного варианта необходимо разрабатывать единый многоканальный блок усилителей мощности с общей системой питания и охлаждения.



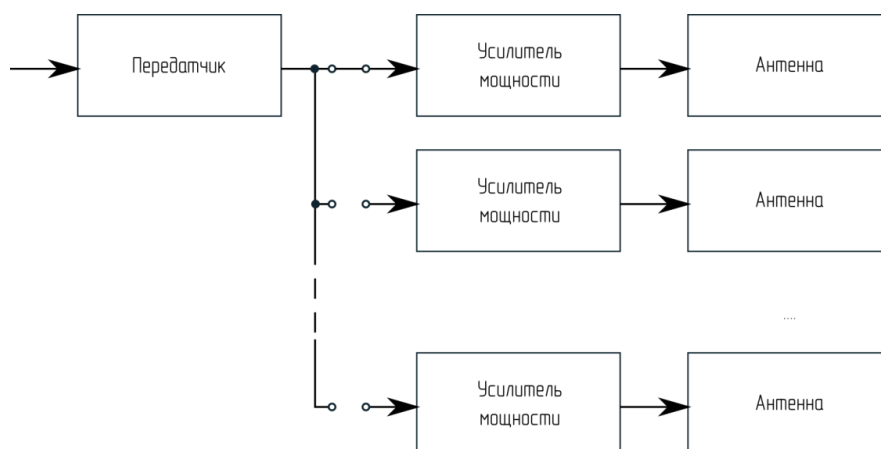


Рис. 10. Переключение выхода передатчика между усилителями мощности и антеннами

В. Третий подход подразумевает отказ от переключателей СВЧ-сигналов целью использования для каждой антенны своего передатчика и усилителя мощности. В этом случае переключатель сигналов выполняется на уровне цифровой логики (внутри ПЛИС или при помощи микроконтроллера).

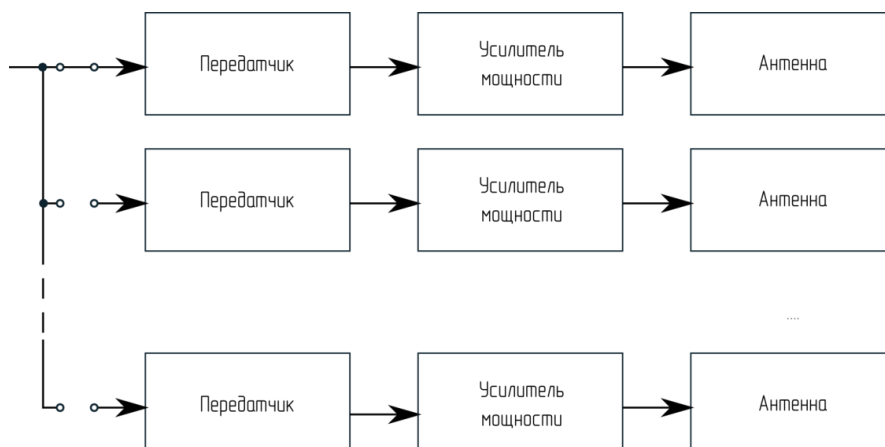


Рис. 11. Переключение цифрового сигнала между передатчиками

К достоинствам данного подхода следует отнести высокую надежность системы: даже в случае выхода из строя одного из каналов передачи информации, остальные останутся рабочими, обеспечивая связь в оставшихся азимутальных секторах.

3. Установка антенны на опорно-поворотном устройстве позволяет использовать одну остронаправленную антенну для непрерывного слежения за направлением на НКУ без разрывов связи. При установке антенны на опорно-поворотном устройстве главной задачей является создание вращающегося перехода, который может быть размещен в разных местах (рис. 12):

А. Вращающийся СВЧ-переход размещается перед антенной и после усилителя мощности.

Б. Вращающийся переход размещается после передатчика и перед усилителем мощности и антенной.

В. Передающее устройство, усилитель мощности и антенна размещаются на поворотном устройстве, через многоканальный вращающийся переход передаются цифровые сигналы и напряжение питания.

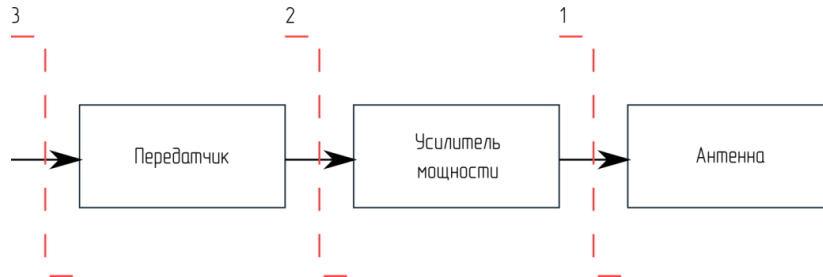


Рис. 12. Варианты размещения вращающегося перехода

Вращающийся коаксиальный переход СВЧ-сигнала является сложным устройством и, как правило, может пропускать через себя высокие мощности при низких потерях (рис. 13).



Рис. 13. Вращающийся коаксиальный переход *Diamond satcom 18-2124-0* (SMA, 0–18 ГГц, потери до 0,3 дБ, мощность до 200 Вт)

К недостаткам использования вращающегося коаксиального СВЧ-перехода нужно отнести: высокую стоимость, большие сроки поставки.

Кроме того, при установке на опорно-поворотное устройство только антенны или антенны и усилителя мощности остальное оборудование необходимо размещать как можно ближе к вращающемуся переходу, т. е. под опорно-поворотным устройством. Остронаправленная антенна может быть выполнена либо как плоская антенна (антенные решетки, апертурные антенны), либо как антенна с расположением элементов вдоль излучения (например, антенны бегущей волны: спиральная, вибраторная). Таким образом, при размещении подобного объекта на опорно-поворотном устройстве, большая часть поверхности поворотной платформы остается неиспользуемой. Для повышения эффективности использования площади поворотной платформы необходимо размещать на ней помимо антенны передающее оборудование и усилитель мощности. В этом случае требуется простой многоканальный вращающийся переход. Необходимым требованием к такому переходу является возможность передачи таких сигналов, как Gigabit Ethernet, и возможность передачи больших токов для питания выходного усилителя мощности (рис. 14, 15).

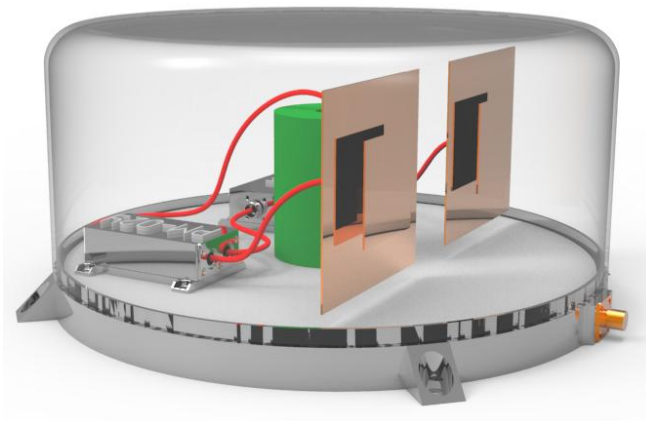


*Рис. 14. Вращающийся переход AC7195 (Ethernet 1000BaseT, RG178, до 43 контактов общего назначения, ток до 10 А)*



*Рис. 15. Вращающийся переход серии ME2121 (Ethernet 1000BaseT, до 24 контактов общего назначения, ток до 10 А)*

Таким образом, оптимальным является использование опорно-поворотной платформы, на которой размещается все приемопередающее оборудование. На рис. 16 показана модель разработанной платформы для БЛПА со взлетной массой более 30 кг.



*Рис. 16. Модель поворотной платформы с антеннами, приемопередатчиком и усилителем мощности*

Ориентация поворотной платформы в пространстве должна осуществляться по сигналам от автопилота, который непрерывно вычисляет вектор направления на НКУ. Для повышения эффективности антенного оборудования на поворотной платформе необходимо использовать антенны с круговой поляризацией и увели-

чивать их апертуру за счет создания антенных решеток в горизонтальной плоскости. Сужение диаграммы направленности в горизонтальной плоскости позволит повысить коэффициент усиления антенны при постоянной ширине диаграммы направленности в вертикальной плоскости, что гарантирует возможность наведения антенны при любых допустимых углах полета ЛА.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Боев Н.М.* Анализ командно-телеметрической радиолинии связи с беспилотными летательными аппаратами // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. акад. М.Ф. Решетнева. – 2012. – Вып. 2 (42). – С. 86-91.
2. *Боев Н.М.* Адаптивное изменение параметров цифровых систем связи комплексов беспилотных летательных аппаратов // 22-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии", 10–14 сент., 2012 г.: Материалы конф.: в 2 т. – Т. 1.
3. *Боев Н.М.* Синхронизация цифровых программно-определяемых систем связи по сигналам СРНС // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. акад. М. Ф. Решетнева. – 2012. – Вып. 6 (46). – С. 34-37.
4. *Боев Н.М., Лебедев Ю.* Управление энергетической эффективностью совмещенных каналов передачи данных единой системы связи // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. акад. М.Ф. Решетнева. – 2013. – Вып. 1 (47). – С. 11-15.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.Я. Браверман.

**Боев Никита Михайлович** – Институт инженерной физики и радиоэлектроники, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск; e-mail: boev@radio-systems.org; 660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, 28; тел.: +79022208967; аспирант.

**Шаршавин Петр Владимирович** – e-mail: sharshavin@radio-systems.org; тел.: +79135939754; аспирант.

**Нигруца Игорь Владимирович** – e-mail: nigruca@radio-systems.org; тел.: +79232842213; аспирант.

**Boev Nikita Mikhaylovich** – Institute of engineering physics and radioelectronics, Siberian federal university, Krasnoyarsk; e-mail: boev@radio-systems.org; 28, Kirenskogo street, Krasnoyarsk, 660074, Russia; phone: +79082208967; postgraduate student.

**Sharshavin Petr Vladimirovich** – e-mail: sharshavin@radio-systems.org; phone: +79135939754; postgraduate student.

**Nigruca Igor Vladimirovich** – e-mail: nigruca@radio-systems.org; phone: +79232842213; postgraduate student.

УДК 629.7.05, 004.891.3

**И.В. Макаров**

#### **ОРГАНИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ СРЕДСТВ САМОДИАГНОСТИКИ И МОНИТОРИНГА ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ИЗДЕЛИЯ НА БАЗЕ УНИФИЦИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ**

*Данная статья посвящена описанию подхода к сбору, обработке телеметрической информации с БПЛА, который применяется авторским коллективом в контексте развития технологий БПЛА в Красноярском крае. Отражены вопросы программной реализации масштабируемых механизмов сбора телеметрических данных комплекса БПЛА. Созданный механизм позволяет единообразным и макро программируемым образом в фоновом режиме*