

УДК 621.396.946

Лысенко А.И.Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»**Явися В.С.**Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

СПОСОБ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА КАНАЛА УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ

Беспилотные летательные аппараты малых размеров с электродвигателями широко применяются в различных сферах. При этом необходимо обеспечить устойчивую, высокоскоростную передачу сигналов управления между наземным центром и самим аппаратом. Для этого предлагается использовать направленные антенны на борту аппарата. Традиционные способы реализации такой задачи оцениваются с учетом ограничений на массогабаритные и энергетические показатели.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, канал управления.

Постановка проблемы. Области применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) постоянно расширяются. Сегодня с их помощью можно контролировать техническое состояние объектов, их безопасность и режимы функционирования. БПЛА можно использовать в целях аэрофотосъемки для картографирования. Беспилотные комплексы позволяют повысить показатели телекоммуникационных сетей (живучесть, пропускную способность), они могут доставлять грузы и т. д. В военной сфере БПЛА становятся незаменимыми для решения задач разведки и целеуказания.

Как правило, любое применение БПЛА подразумевает, что получаемая с их помощью информация и сигналы управления самим аппаратом должны передаваться в реальном времени. Следует подчеркнуть, что даже кратковременные перерывы управления могут привести не только к перебоям с получением полезной информации, но и к потере самого БПЛА. Другими словами – требуется обеспечить непрерывную передачу большого объема данных при заданных требованиях по полосе пропускания, вероятности битовой ошибки и др.

Для повышения пропускной способности необходимо расширять полосу частот приемопередающего оборудования и использовать спектрально-эффективные методы модуляции. Однако это вынуждает обеспечить более высокое отно-

шение сигнал/шум (ОСШ) на входе приемника, приводит к снижению дальности действия радиосистемы, повышению вероятности ошибок и т. д.

Анализ исследований и публикаций. В настоящее время широко используются мультикоптерные БПЛА малых размеров с электродвигателями. При их создании выдвигаются жесткие требования как по минимизации размеров приемопередающего и антенно-фидерного оборудования, так и по потребляемой ими мощности.

Для удовлетворения требований по массогабаритным показателям и по пропускной способности целесообразным является выбор диапазона сверхвысоких частот (СВЧ). Наиболее подходящим является диапазон 2,4 ГГц, в котором в зависимости от текущего значения ОСШ можно использовать такие виды модуляции, как BPSK, QPSK, QAM16, QAM32 и т. д., обеспечивающие высокую спектральную эффективность [1].

Мультикоптерные БПЛА с электроприводом, как правило, используются на дальностях до 10 км, поэтому ограничений, связанных с «прямой видимостью», для них не существует, так как при высоте полета 50 м и высоте наземного комплекса управления (НКУ) 1,5 м (при условии его нахождения в руках оператора) дальность прямой видимости, определяемая формулой [2]:

$$D_{KM} = 4,12(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})h_2$$

где h_1, h_2 – высоты БПЛА и НКУ соответственно, составит более 30 км.

Поскольку в диапазоне 2,4 ГГц затухание сигнала на расстоянии 10 км достигает 120 дБ [1], необходимо предусмотреть меры, позволяющие обеспечить требуемый энергетический уровень передаваемого сигнала. Анализ рынка малогабаритных приемопередающих устройств показывает, что наиболее распространены приемники с чувствительностью порядка 90 дБ и передатчики с усилением около 30 дБ, что позволяет перекрыть затухание именно в 120 дБ.

Однако для обеспечения вероятности ошибки порядка 10^{-6} при использовании QAM32 необходимо, чтобы ОСШ находилось на уровне не менее 18 дБ [2]. С учетом потерь в фидере приемника и передатчика (всего около 3 дБ) становится очевидным, что уровень передаваемого сигнала должен быть увеличен, как минимум, на 21 дБ, а в реальных условиях распространения сигнала и влияния непреднамеренных помех – на еще большую величину.

Постановка задачи. Решить такую задачу за счет увеличения мощности передатчика не представляется возможным, поскольку влечет за собой повышение массогабаритных показателей и значительный рост энергопотребления приемопередающего оборудования, что особенно критично для БПЛА. Очевидным выходом в этой ситуации является использование направленных антенн. В связи с этим необходимо обосновать тип антенн как НКУ, так и БПЛА, а также способ их взаимодействия.

Изложение основного материала. На НКУ целесообразно установить параболическую антенну, обладающую значительным усилением по сравнению с другими типами антенн аналогичных размеров.

Для параболической антенны коэффициент усиления рассчитывается по формуле [2]:

$$G = 10 \lg (k(\pi D / \lambda)^2 \cos \varphi), \quad (1)$$

где G – коэффициент усиления; k – эффективность или коэффициент использования поверхности антенны (для большинства антенн равен примерно 0,55); D – диаметр зеркала; $\chi \cos \varphi$ – угол прихода волны.

В соответствии с выражением (1) при диаметре зеркала 0,5 м, точно направленной антенне на БПЛА ($\varphi=0$) в диапазоне 2,4 ГГц коэффициент усиления составит всего 19,4 дБ. Дальнейшее повышение коэффициента усиления может быть осуществлено за счет увеличения диаметра зеркала, что является трудно реализуемым для носимого НКУ.

В этой ситуации задача повышения мощности может быть решена путем установки направленной антенны на борту БПЛА. При этом необходимо учесть тот факт, что ее конструкция должна обладать минимальным сопротивлением ветровой нагрузке, а также решить задачу адаптации диаграммы направленности под параметры полета БПЛА и координаты местоположения НКУ.

Управление направлением максимального усиления бортовой антенны может осуществляться несколькими способами [3], такими как установка антенны на опорно-поворотном устройстве; использование многоэлементной антенной решетки с управляемой диаграммой направленности; использование нескольких переключаемых антенн.

Реализация первого способа позволяет использовать одну остронаправленную антенну для непрерывного слежения за направлением на НКУ без разрывов связи. При установке антенны на опорно-поворотном устройстве необходимо создание вращающегося перехода. Этот элемент приемопередающего тракта может быть размещен в разных местах: перед антенной и после усилителя мощности; после передатчика и перед усилителем мощности и антенной; передающее устройство, усилитель мощности и антенна размещаются на поворотном устройстве, через многоканальный вращающийся переход передаются информационные сигналы и напряжение питания.

К недостаткам использования вращающегося коаксиального СВЧ-перехода в первую очередь нужно отнести его высокую стоимость. Кроме того, при размещении остронаправленной антенны любого типа на опорно-поворотном устройстве большая часть поверхности поворотной платформы остается неиспользуемой. Перемещение антенны в горизонтальной плоскости приводит к перемещению центра массы БПЛА, а следовательно, к дестабилизации его пространственного положения. 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 питания выходного усилителя мощности.

Этот способ, несмотря на кажущуюся простоту реализации, имеет еще один серьезный недостаток: значительные затраты мощности на работу электропривода.

Для создания антенной системы с управляемой диаграммой направленности может быть использо-

вана кольцевая антенная решетка. Благодаря кольцевой симметрии антенной решетки удается получить направленные диаграммы, которые мало меняются при сканировании в пределах 360° в плоскости решетки.

Однако для получения большого коэффициента усиления кольцевой антенной решетки необходимо увеличивать число элементов, что в связи с массогабаритными ограничениями неприемлемо для мультикоптерных БПЛА с электроприводом. Кроме того, использование многоэлементной антенной решетки осложняется необходимостью изготовления сложных и дорогих диаграммообразующих устройств.

При использовании нескольких переключаемых антенн пространственные направления по азимуту разбиваются на секторы. С увеличением коэффициентов усиления антенн их число растет, а для размещения большого количества антенн необходимо увеличивать габаритные размеры и массу всей антенной системы. В этом случае возможно компромиссное решение между количеством антенн и их усилением, которое как обеспечит необходимый коэффициент усиления, так и удовлетворит требования относительно массогабаритных ограничений.

При наличии нескольких антенн на борту БПЛА возникает необходимость выбора антенны, направленной в сторону НКУ, требуется коммутация сигналов. Возможны несколько вариантов реализации подобной системы: переключение выхода усилителя мощности передатчика между антеннами (один передатчик, один усилитель мощности, несколько антенн); переключение выхода передатчика между усилителями мощности и антеннами (один передатчик, несколько совмещенных усилителей мощности и антенн); переключение цифрового сигнала между передатчиками (число передатчиков и усилителей мощности равно числу антенн).

В первом варианте выходной сигнал усилителя мощности коммутируется между несколькими антеннами.

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

Во втором варианте для снятия ограничений, которые накладывает коммутатор СВЧ-сигналов, усилитель мощности передатчика может быть вынесен за переключатель. Тогда число усилителей мощности равно числу антенн.

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 этого варианта необходимо разрабатывать единый многоканальный блок усилителей мощности с общей системой питания.

Третий вариант подразумевает отказ от переключателей СВЧ-сигналов ценой использования для каждой антенны своего передатчика и усилителя мощности. В этом случае переключатель сигналов выполняется на уровне цифровой логики.

К достоинствам этого 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. Однако при этом требуются значительные затраты на аппаратную часть как по стоимости, так и массогабаритным показателям.

Очевидно, что для мультикоптерных БПЛА предпочтительным является вариант переключения выхода усилителя мощности передатчика между антеннами. Для его реализации предлагается разместить на борту БПЛА шесть антенн типа «волновой канал». Простота конструкции антенны легко позволяет решить задачу минимизации ветровой нагрузки. С учетом массогабаритных ограничений конструкция одной антенны будет состоять лишь из трех элементов. Коэффициент усиления трехэлементной антенны типа «волновой канал» [4] – 5,5 дБ в пределах сектора 60° . Ее габаритные показатели можно определить, используя рис. 1.

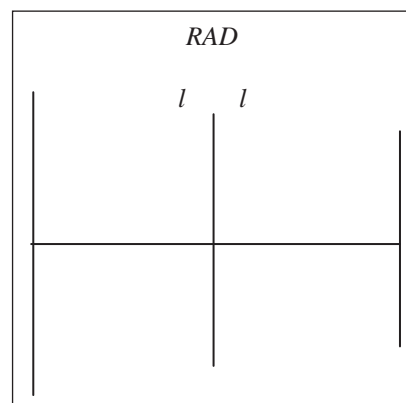


Рис. 1. Типовая трехэлементная антенна типа «волновой канал»

Известно [4], что размеры элементов антенны определяются длиной волны, а именно: активный вибратор $A=0,5\lambda$; рефлектор незначительно больше вибратора $R \geq A$; директор незначительно меньше его $D \leq A$; расстояние между рефлектором, активным вибратором и директором $l=0,25\lambda$.

Для выбранного частотного діапазона $\lambda=0,25\lambda$ м, поэтому одна антенна имеет габариты приблизительно 7×7 см. Конструкция из шести антенн (рис. 2) впишется в окружность радиусом:

$$R_6 = 2l + l \sin 60 \approx 2,87\lambda \approx 9 \text{ см,}$$

а ее вес составит около 120 г.

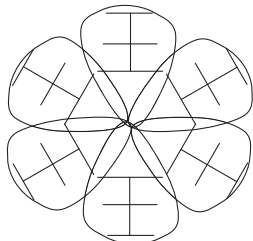


Рис. 2. Шестисекторная антенная конструкция типа «волновой канал»

Выводы. При реализации такой антенной системы усиление приемо-передающего тракта может достигнуть 55 дБ, что, например, обеспечит на удалении 10 км ОСШ на входе приемника 22 дБ, а соответственно, возможность использования модуляции QAM64 с вероятностью ошибки порядка.

Таким образом, при использовании предложенного варианта построения антенно-фидерного тракта мультикоптерного БПЛА не только решается задача обеспечения качественного канала управления, но и появляется возможность организации высокоскоростного обмена информацией с НКУ на значительных расстояниях.

Список литературы:

1. Боев Н.М. Анализ радиолиний связи с беспилотными летательными аппаратами /Электронный ресурс/ http://radio-systems.org/uav_communications_links.
2. Скляр, Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение, Изд. 2-е, испр.: Пер. с англ. / Б. Скляр. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
3. Боев Н.М., Шаршавин П.В., Нигруца И.В. Построение систем связи беспилотных летательных аппаратов для передачи информации на большие расстояния /Электронный ресурс/ <http://uav-siberia.com/content/postroenie-sistem-svyazi-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov-dlya-peredachi-informacii-na>.
4. Гончаренко И.А. Антенны КВ и УКВ. Часть 3. Простые КВ антенны. М.: РадиоСофт, 2015. – 288 с.

СПОСІБ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ КАНАЛУ УПРАВЛІННЯ БЕЗПІЛОТНИМИ ЛІТАЛЬНИМИ АПАРАТАМИ

Безпілотні літальні апарати малих розмірів з електродвигунами широко застосовуються у різних сферах. При цьому необхідно забезпечити стійку, високошвидкісну передачу сигналів управління між наземним центром і самим апаратом. Для цього пропонується використовувати спрямовані антени на борту апарата. Традиційні способи реалізації такого завдання оцінюються з урахуванням обмежень на вагогабаритні та енергетичні показники.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, канал управління.

A METHOD OF PROVIDING THE QUALITY OF UNMANNED AIRCRAFT CONTROL CHANNEL

Unmanned aerial vehicles of small dimensions with electric motors are widely used in various fields. It is necessary to ensure a stable, high-speed transmission of control signals between the ground center and the device itself. For this purpose it is proposed to use directional antennas on board the device. Traditional ways of realizing such a task are assessed taking into account the limitations on mass and size indicators.

Key words: unmanned aerial vehicle, control channel.