

УДК 621.396.2, 621.396.6

Д. П. КУДРЯВЦЕВ, РАХМАН МОХАММАДИ ФАРХАДИ

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина

БЕСПРОВОДНЫЕ СЕТИ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛОВ ТЕЛЕМЕТРИИ НА НАЗЕМНУЮ СТАНЦИЮ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ: ОРГАНИЗАЦИЯ И ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА

В работе проанализированы способы и устройства обеспечения связи между беспилотным летательным аппаратом и наземной станцией управления. В большинстве случаев обмен данными между радиомодемом наземной части системы обмена телеметрическими сигналами и наземной станцией управления реализован с использованием проводного интерфейса. Такое решение во многих случаях не является оптимальным. Предложено обеспечить такой вид связи с использованием беспроводной (Wi-Fi) сети. Беспроводная сеть в данной работе использовалась для обмена сигналами телеметрии между радиомодемом наземной части (RFD – 900) и наземной станцией беспилотного летательного аппарата (установлена на ноутбуке) в полнодуплексном режиме. Передача телеметрических сигналов на встроенный в ноутбук Wi-Fi-приемопередатчик осуществляется с использованием Wi-Fi-модуля ESP8266-12E (в составе отладочной платы NodeMCU), который подключается с помощью UART - интерфейса к выходу радиомодема и используется в качестве наземного беспроводного ретранслятора сигнала. Для реализации такого обмена в среде программирования Delphi 7 разработан программный модуль обмена данными на основе TCP/IP - протокола.

Ключевые слова: *Wi-Fi, SoC, IoT, беспроводная локальная сеть, ESP8266, TCP/IP – протокол, программно реализованный сокет.*

Введение

Наземная станция управления (НСУ, GCS) – центр управления беспилотными летательными аппаратами (БПЛА), используется для отображения сигналов телеметрии, изменения точек маршрута, высоты и т.д. Задачи управления выполняются программным обеспечением (ПО), которое устанавливается, как правило, на ноутбуке. Применяется как оригинальное (самостоятельно разработанное авторами проекта) управляющее ПО, так и ПО сторонних производителей.

Как правило, НСУ включает пульт дистанционного управления; пыле- и влагозащищенный ноутбук, иногда дополненный видеоочками; оборудование канала телеметрии: антенный блок (антенна или несколько антенн) на штативе с радиомодемом; GPS – модем; оборудование видеоканала FPV [1, 2].

В настоящее время для передачи принятого наземной частью телеметрического сигнала в наземную станцию управления широко используется проводное соединение [3]. Радиомодем наземной части посредством кабеля подключается к USB – порту ноутбука.

Однако такой способ соединения имеет ряд недостатков. Максимальная длина USB-кабеля огра-

ничивает удаление между радиомодемом и НСУ пятью метрами, что создаёт неудобства при вынесении радиомодема на мачту (широко практикуется для увеличения радиуса полёта БПЛА). Плохая фиксация разъёма USB-кабеля в соответствующем порту ноутбука создаёт ненадёжное соединение, которое часто становится причиной некачественной передачи телеметрической информации. Это в условиях полёта категорически запрещено, так как может привести к аварии БПЛА. Такой способ соединения позволяет реализовать только подключение типа «точка-точка», в то же время часто возникает необходимость одновременно раздавать сигнал телеметрии на несколько наземных устройств – несколько наземных станций (в режиме обучения и ученик и преподаватель могут использовать для управления БПЛА две равнозначные НСУ), наземную станцию и ПДУ и т.д.

Целью статьи является анализ принципов организации и разработка удобного, дешёвого, надёжного, универсального устройства обмена сигналами телеметрии между радиомодемом наземной части системы обмена телеметрическими сигналами БПЛА и наземной станцией с использованием беспроводной (Wi-Fi) сети.

Постановка задачі

Исходя из вышесказанного, практический интерес представляет разработка дешёвого, экономичного (с малым током потребления), лёгкого устройства беспроводного подключения радиомодема к НСУ БПЛА для передачи сигналов телеметрии в полнодуплексном режиме. Разрабатываемое устройство должно позволять реализовывать подключение типа «точка-многоточие» (реализовывать функции сервера в сети типа «звезда») и раздавать сигнал телеметрии на несколько устройств одновременно.

Авторы проекта используют оригинальное управляющее программное обеспечение наземной станции управления, разработанное с использованием IDE Delphi. Поэтому в дополнении к аппаратной части необходимо разработать программный модуль, задача которого состоит в экспорте телеметрической информации, принятой аппаратной частью НСУ, в управляющее ПО. При разработке программной части устройства желательно также использовать IDE Delphi - это упростит встраивание разработанного программного модуля в основное ПО.

Желательно предусмотреть модульность и универсальность разрабатываемого устройства, что расширит сферу его применения: позволит использовать, например, для беспроводной передачи сигналов видеотракта (FPV) БПЛА, а также в приложениях, не связанных с беспилотной авиацией.

На рынке Украины представлены устройства, с помощью которых можно было бы решить задачу. Однако с помощью стандартных средств решить задачу затруднительно.

Имеющиеся в большом количестве на рынке Wi-Fi точки доступа, которые можно было бы использовать в этом случае, обладают массой недостатков. Например, большие размеры и масса таких устройств не желательны при решении данной задачи. Питание большинства точек доступа осуществляется от бытовой электросети с использованием встроенного адаптера питания. Следовательно, использовать стандартное устройство не получится - для решения этой задачи необходима как минимум модернизация узла питания. Стоимость подобных устройств довольно высока - самые дешёвые Wi-Fi точки доступа можно купить на Украине примерно за 1000 грн.

Wi-Fi точки доступа имеют на борту только LAN (Ethernet) - порты проводного подключения. Следовательно, для подключения к выходу радиомодема канала телеметрии или выходу видеоприёмника FPV - системы, необходимо будет задействовать дополнительно UART - Ethernet преобразова-

тель, что усложняет и удорожает подобное решение. К недостаткам относится также отсутствие реализации программной части. На рынке Украины представлены также стандартные Wi-Fi - репитеры, например, Xiaomi Wi-Fi Amplifier [4]. Они, как правило, обладают небольшими размерами и низким напряжением питания (могут быть запитаны от USB-разъёма), что делает возможным их питание от аккумуляторов. Но они могут быть использованы только для беспроводной ретрансляции Wi-Fi - сигнала и не имеют портов проводного подключения. Т.е. подключить к такому устройству выход радиомодема канала телеметрии или выход видео приёмника FPV- системы не получится. Кроме того, такие устройства не дешевы - цена самых дешёвых экземпляров 15 - 20 \$.

Присутствуют на рынке и устройства, алгоритм работы которых близок к алгоритму разрабатываемого устройства. Так устройство «903W Wi-Fi Car Camera Wireless» представляет собой наземный беспроводной ретранслятор видеосигнала на встроенный в ноутбук или смартфон Wi-Fi - приёмопередатчик [5]. Т.е. для организации беспроводной передачи FPV-видеосигнала на смартфон или планшет (под управлением операционных системах Android и iOS) необходима штатная видеосистема FPV, к приёмнику которой проводным способом подключается наземный Wi-Fi - ретранслятор «903W Wi-Fi Car Camera Wireless». Между Wi-Fi - ретранслятором и смартфоном (планшетом) поддерживается беспроводное соединение типа точка - точка. Устройство известно в среде разработчиков БПЛА и RC-моделей [6], разработчиков охранных систем и т.д.

Такое решение близко решению, принятому в данной статье. Главное достоинство - решение не создаёт неудобств при вынесении штатного FPV-видеоприёмника или радиомодема канала телеметрии на мачту и не ограничивает перемещение оператора вместе с наземной станцией по отношению к антенной мачте (в пределах действия Wi-Fi сети). Устройство имеет внешнюю антенну, что увеличивает радиус покрытия Wi-Fi сети до 150м. Но для данной задачи в ней нет необходимости и устройство со встроенной антенной с радиусом покрытия Wi-Fi сети до 30м вполне может решить поставленную задачу.

Главный недостаток - не универсальность, узкая сфера применения. Устройство может использоваться только для ретрансляции FPV - сигнала, а, например, сигнал телеметрии ретранслировать не может.

Не универсальность объясняется неприспособленностью для такой работы как аппаратной части

(устройство содержит только видеовход формата AVI), так и программной части, которая специализирована только на отображении видеосигнала на мониторе смартфона или планшета.

Недостатком также является возможность работы программной части устройства только в операционных системах (ОС) Android и iOS и не возможность работы в ОС Windows. При решении поставленной задачи этот недостаток будет критичным, т.к. НСУ, используемая авторами проекта установлена на ноутбуке, который работает под управлением ОС Windows.

К недостаткам относится также возможность поддержки беспроводного соединения только типа точка – точка.

Кроме того, цена такого устройства (38\$) всё-таки велика для большинства авиа-любителей.

1. Выбор элементной базы и схемотехническое решение

Учитывая всё вышеизложенное, наибольшую перспективу имеет устройство для организации беспроводной Wi-Fi сети, т.к. в качестве приёмной части в этом случае можно использовать встроенный в ноутбук Wi-Fi-приёмопередатчик, что позволит существенно удешевить и упростить разработку. Текущая реализация технологии Wi-Fi позволяет реализовать скорость обмена данными более 100 Мбит/с. При этом пользователи могут перемещаться между точками доступа на территории покрытия сети Wi-Fi, используя мобильные устройства, оснащенные клиентскими приёмо-передающими устройствами. Обычно схема Wi-Fi сети содержит не менее одной точки доступа и не менее одного клиента. Точка доступа передаёт свой идентификатор сети (SSID) с помощью специальных сигнальных пакетов на скорости 0,1 Мбит/с каждые 100 мс, что значительно упрощает процедуру подключения к сети новых устройств. Принцип работы Wi-Fi сетей подробно описан в официальном тексте стандарта [7].

Среди широкого выбора Wi-Fi устройств, предлагаемых рынком, в среде разработчиков заслуженной популярностью пользуется SoC-модуль ESP8266 компании Espressif с интерфейсом Wi-Fi. Модуль привлекает разработчиков в связи с выходом широкой гаммы продуктов на его базе и необыкновенно низкой ценой (~2\$).

Использование данной системы на кристалле (ЧМК, SoC) в устройствах обмена данными позволяет разрабатывать удобные портативные приборы на основе беспроводного обмена через Интернет или

локальные Wi-Fi сети [8]. Для достижения портативности используется батарейное или аккумуляторное питание, чему способствует низкое энергопотребление модуля:

- напряжение питания 2,2...3,6 В;
- потребление до 200 мА в режиме передачи;
- потребление в режиме приема - 60 мА;
- потребление в режиме ожидания - 40 мА;
- режим пониженного потребления с сохранением соединения с точкой доступа ~1 мА;
- режим глубокого сна 0,1 мкА.

SoC содержит в своем составе 32-разрядный микроконтроллер Tensilica L106 с тактовой частотой 80 МГц. Микроконтроллер не имеет на кристалле пользовательской энергонезависимой памяти. Исполнение программы ведется из внешней SPI ПЗУ путём динамической подгрузки требуемых участков программы в кэш инструкций. Поддерживается до 16 МБ внешней памяти программ. Для связи с Flash-памятью программ используется SDIO контроллер (возможен Standard, Dual или Quad SPI интерфейс). Интерфейс Wi-Fi стандарта 802.11 b/g/n представлен приёмо-передатчиком со встроенным TCP/IP стекком. Поддерживается WPA/WPA2 и WPS-шифрование.

Для связи с периферией разработчику доступны 10-разрядный АЦП, SPI, UART, I²C, I²S интерфейсы и до 16-и GPIO с поддержкой PWM. [9, 10, 11].

Структурная схема SoC ESP8266 представлена на рис. 1 [8, 9, 12].

Несмотря на наличие такого функционала, цена на SoC и готовые платы-модули не превышает нескольких долларов. Это обусловлено ее высокой интегрированностью: аналоговая часть приемника-передатчика также интегрирована на кристалл.

Для реализации простейшего устройства на основе SoC ESP8266 дополнительно необходимы только Flash-память, 6 резисторов, 2 катушки индуктивности и кварцевый резонатор. Это уменьшает стоимость печатной платы, компонентов и монтажа [8]. Схема электрическая принципиальная Wi-Fi-модуля ESP8266-12E представлена в [8, 9, 12].

Следует отметить также хорошую документированность SoC, наличие дополнительной литературы о применении и схемотехнических решениях программного комплекта разработчика, образцов кода. После популяризации и широкого распространения данной SoC появилась поддержка программирования ESP8266 в среде Arduino IDE, что, по мнению автора, значительно упрощает и удешевляет процесс разработки.

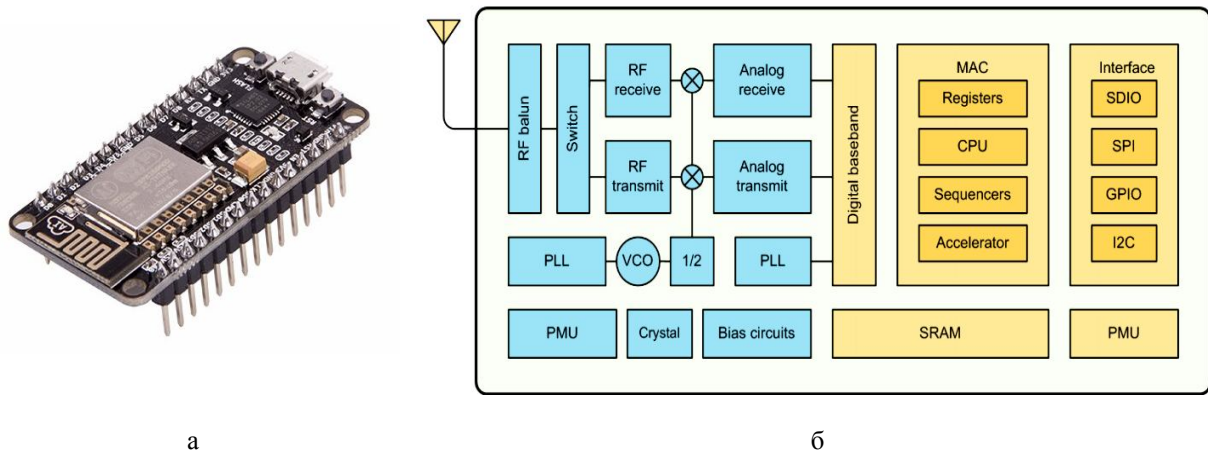


Рис. 1. Внешний вид SoC ESP8266 в составе отладочной платы NodeMCU (а) и её структурная схема (б)

Производитель предоставляет набор библиотек, через API которых программист получает доступ к периферии. Основное применение ESP8266 находит в управлении разнообразными бытовыми приборами через беспроводные сети – системы «умный дом», «интернет вещей» (IoT).

Кроме того, модуль широко применяется в системах беспроводного обмена данными, системах идентификации и контроля доступа, Wi-Fi системах позиционирования.

Однако разработка устройств на основе Wi-Fi – модуля ESP8266 затрудняется неудобной для цифровой техники величиной напряжения питания и уровня логических сигналов (3,3 В), необходимостью реализации программатора или устройства подключения по USB, нестандартным шагом контактных площадок портов ввода/вывода.

2. Экспериментальные результаты

2.1. Аппаратная часть

Для разработки прототипа устройства была выбрана отладочная плата NodeMCU V3, которая наряду с Wi-Fi – модулем ESP8266 содержит также адаптер интерфейса CP2102. Плата позволяет упростить разработку, т.к. на ней уже реализовано подключение по USB, регулятор питания и все выводы чипа разведены на гребенки со стандартным шагом 2.54 мм, что позволяет отлаживать прототип разрабатываемого устройства с использованием макетной платы. Кроме того, плата поставляется с прошивкой NodeMCU, что позволяет программировать ее с помощью языка Lua или с помощью Arduino IDE.

В дальнейшем планируется самостоятельно разработать аналог такой платы, что позволит удешевить разработанное устройство.

Схема электрическая принципиальная отладочной платы NodeMCU V3 представлена в [13, 14].

Для решения поставленной задачи SoC ESP8266 была запрограммирована как точка доступа по методике, описанной в [15]. Для программирования использовалась незначительно модернизированная автором библиотека Wi-FiAccessPoint. В результате программирования точка доступа получила сетевое имя `ssid = "ESPap_236"` и IP – адрес 192.168.4.1.

Проверка работоспособности аппаратной части полученного устройства производилась с использованием беспроводной локальной сети, в которой точка доступа на основе Wi-Fi – модуля ESP8266 использовалась в качестве сервера. К этой сети подключались два ноутбука по стандартной методике подключения к беспроводным сетям. Один из компьютеров использовался в качестве источника сигнала.

Проверка правильности работы аппаратной части производилась с помощью приложения для тестирования программных сокетов Windows «TCP/IP Builder 1.9», разработанного фирмой DRK Open source software [16].

Проверка показала полную работоспособность аппаратной части прототипа. Однако, несмотря на полученные результаты, применение приложения TCP/IP Builder 1.9 в составе ПО наземной станции затруднительно ввиду сложности встраивания этого приложения в основное ПО ввиду того, что разработчики TCP/IP Builder 1.9 не предоставляют исходные коды. Поэтому было принято решение работать в дополнение к аппаратной части программный модуль, задача которого состоит в экспорте телеметрической информации, принятой беспроводным интерфейсом HCU, в управляющее ПО. Для упрощения встраивания разработанного программного модуля в основное ПО разработка про-

граммной части устройства производилась с использованием IDE Delphi.

2.2 Программная часть

2.2.1 Интерфейс

Внешний вид интерфейса разработанного программного модуля представлен на рис. 2.

На рис. 2 сделаны обозначения:

- 1 – вкладка «Connect» («Подключение»);
- 2 – программный модуль «Wi-Fi_connection» («Wi-Fi_соединение»);
- 3 – поле отображения информации о доступных беспроводных сетях;
- 4 – кнопка «Wi-Fi_Network_list» («Список сетей_Wi-Fi»);
- 5 – кнопка «Очистить список»;
- 6 – кнопка «Подключиться к Wi-Fi»;
- 7 программный модуль «TCP Socket Setup» («Настройка сокетa TCP»);
- 8 – поле ввода IP – адреса локального компьютера («Local IP»);
- 9 – поле ввода номера порта подключения локального компьютера к сокетному соединению («Local Port Number»);

10 – поле ввода IP – адреса удалённого компьютера, который подключается к локальному компьютеру («Connection IP»);

11 – поле ввода номера порта удалённого компьютера, который подключается к локальному компьютеру («Connection Port Number»);

12 – кнопка «Create Socket» («Создать сокет»);

13 – кнопка «Destroy Socket» («Разрушить сокет»);

14 – кнопка «Connect» («Подключить»);

15 – вкладка «Information» («Информация»);

16 – поле ввода информационного сообщения, которое клиент передаёт серверу («Client-> Server Information Packet»);

17 – кнопка «Send->Server» («Отослать-> Серверу»);

18 – поле ввода информационного сообщения, которое сервер передаёт клиенту («Server->Client Information Packet»);

19 – кнопка «Send->Client» («Отослать-> Клиенту»);

20 – поле отображения сообщений, которыми обмениваются клиент и сервер между собой.

Программный модуль содержит две вкладки. Вкладка **Connect** используется для организации

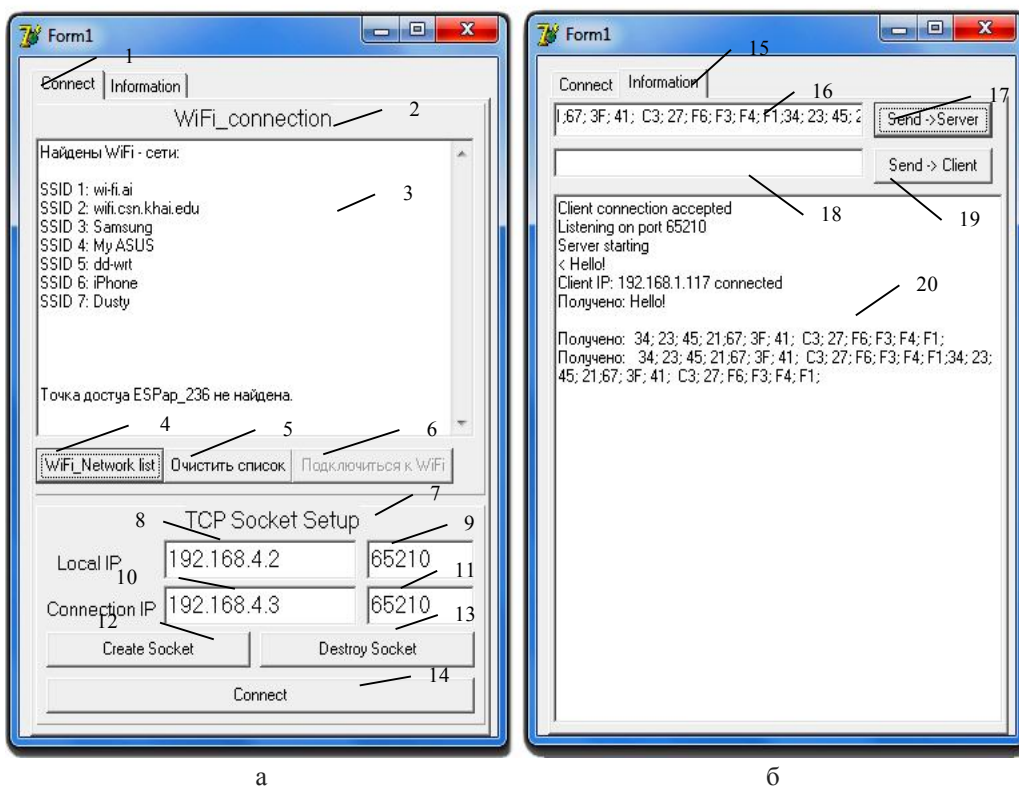


Рис. 2. Внешний вид интерфейса разработанной терминальной программы:
а - внешний вид вкладки **Connect**; б - внешний вид вкладки **Information**

беспроводной Wi-Fi - сети и настроек соединения с ней. Вкладка **Information** используется для приёма и передачи данных.

2.2.2 Вкладка Connect

Вкладка **Connect** содержит элементы управления для мониторинга доступных беспроводных сетей и подключения к ним. Кроме того эта вкладка используется для организации программно реализованного сокетного соединения по протоколу TCP/IP.

Вкладка условно разделена на два логических модуля – «Wi-Fi_connection» и «TCP Socket Setup».

Блок «Wi-Fi_connection» предназначен для мониторинга доступных беспроводных сетей и подключения к точке доступа ESPap_236.

Блок содержит кнопки «Wi-Fi_Network_list», «Очистить список», «Подключиться к Wi-Fi» и поле отображения информации о доступных беспроводных сетях.

Кнопки «Wi-Fi_Network_list» и «Очистить список» позволяют загрузить список доступных беспроводных сетей и очистить этот список соответственно. Кнопка «Подключиться к Wi-Fi» позволяет подключиться к точке доступа ESPap_236 и активируется только в случае, если эта точка доступа обнаружена в списке доступных сетей.

Мониторинг доступных сетей и подключение производится с помощью netsh-команд [17, 18]. Для использования netsh-команд в проект дополнительно устанавливался Delphi-компонент **DosCommand**.

Блок – схема алгоритма обработки нажатия кнопок «Wi-Fi_Network_list» и «Подключиться к Wi-Fi» представлена на рис. 3.

По нажатию кнопки «Wi-Fi_Network_list» выполняется netsh-команда *netsh wlan show networks*, которая позволяет сформировать список доступных беспроводных сетей и отобразить его в поле отображения информации о доступных беспроводных сетях (элемент Мемо модуля «Wi-Fi_connection»).

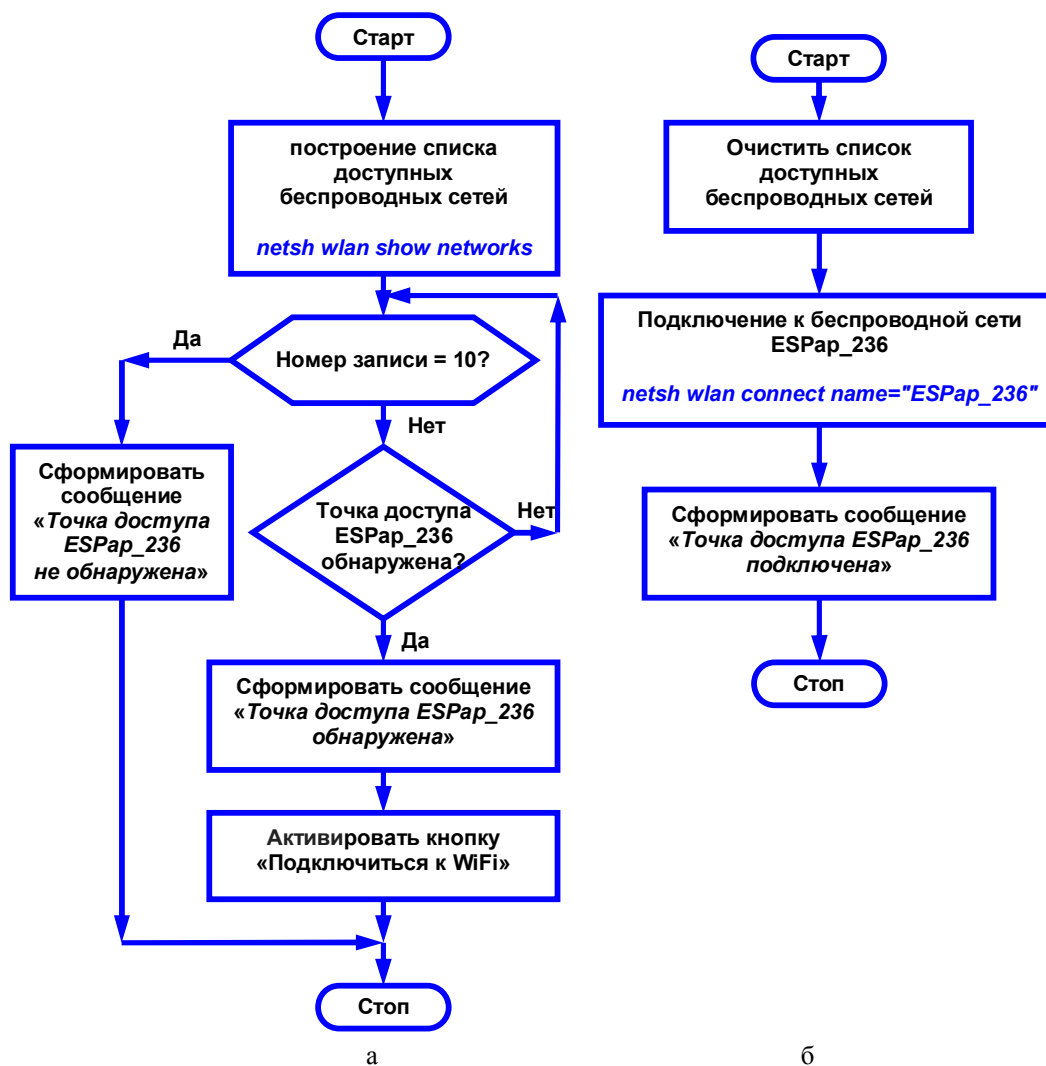


Рис. 3. Блок – схема алгоритма обработки нажатия кнопок «WiFi_Network_list» (а) и «Подключиться к WiFi» (б)

После чего для первых десяти записей в этом списке производится поиск по кодовому слову ESPap_236. Если поиск даёт положительный результат – считается, что точка доступа ESPap_236 обнаружена, формируется сообщение «точка доступа ESPap_236 обнаружена» и активируется кнопка «Подключиться к Wi-Fi».

В противном случае формируется сообщение «точка доступа ESPap_236 не обнаружена» и кнопка «Подключиться к Wi-Fi» остаётся заблокированной.

Алгоритм обработки нажатия кнопки «Подключиться к Wi-Fi» более прост. При нажатии кнопки очищается ранее сформированный список доступных беспроводных сетей (очищается элемент Мемо модуля «Wi-Fi_connection»). После чего производится подключение к беспроводной сети ESPap_236 с помощью netsh-команды *netsh wlan connect name="ESPap_236"* и формируется информационное сообщение «точка доступа ESPap_236 подключена».

Блок «TCP Socket Setup» предназначен для организации программно реализованного сокетного соединения и управления им. Для этого в проект устанавливались два дополнительных Delphi-компонента: **ClientSocket** и **ServerSocket**.

Блок содержит кнопки «Create Socket», «Destroy Socket», «Connect»; поля ввода IP – адресов и портов подключения к сокетному соединению локального и удалённого компьютеров («Local IP», «Local Port Number», «Connection IP» и «Connection Port Number» соответственно). Кроме того, в проекте предусмотрена обработка событий, связанных с функционированием компонентов **ClientSocket** и **ServerSocket**.

Блок – схема алгоритма обработки нажатия кнопок «Create Socket» представлена на рис. 4.

Кнопка «Create Socket» позволяет создать программно реализованный сокет. С этой целью в момент нажатия кнопки на точке доступа ESPap_236 стартует Web – сервер и, используя информацию, введённую пользователем предварительно в полях ввода «Local IP» и «Local Port Number», задаются IP – адрес и порт подключения локального компьютера к сокетному соединению.

Затем на стороне сервера создаётся сокетное соединение и формируется информационное сообщение «*Server starting...*» («Сервер стартует...»).

На следующем этапе тестируется статус созданного сокетного соединения.

Если соединение активировано, то формируется информационное сообщение «*Server started*» («Сервер стартовал»). Далее на основе информации, которую пользователь ввел предварительно в полях ввода «Connection IP» и «Connection Port Number», задаются IP – адрес и номер порта под-

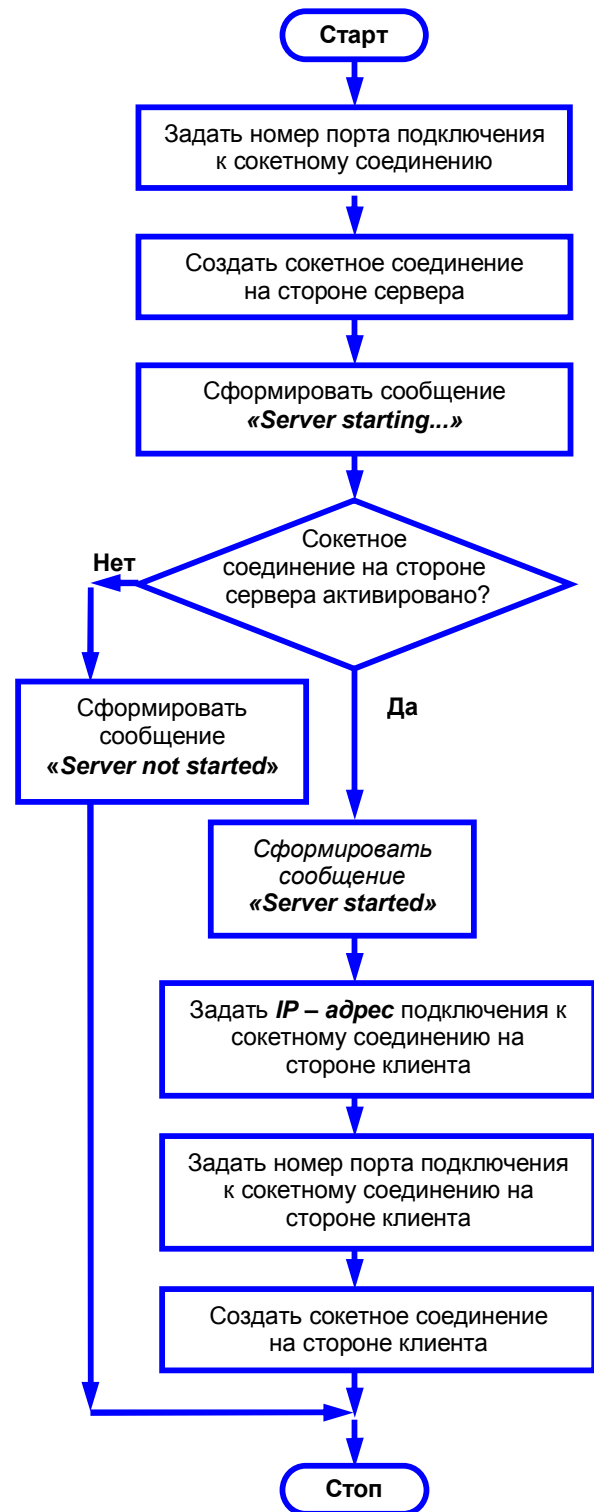


Рис. 4. Блок – схема алгоритма обработки нажатия кнопки «Create Socket»

ключения к сокетному соединению на стороне клиента. После чего создаётся сокетное соединение на стороне клиента.

Если же сокетное соединение на стороне сервера не было активировано, то формируется информационное сообщение «*Server not started*» («Сервер

не стартовал») и сокетное соединение на стороне клиента не создаётся.

Подключение между сервером и клиентом с использованием ранее созданного сокетного соединения можно произвести нажатием кнопки «Connect».

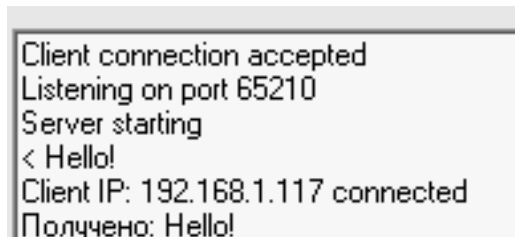
После установления соединения между сервером и клиентом (или клиентами, если реализуется сеть типа «звезда») происходит стандартный диалог приветствия.

Сервер отправляет всем подключённым к нему устройствам (клиентам) приветственное сообщение «<Hello!». Формирование этого сообщения происходит с использованием обработчика события компонента **ServerSocket**. В момент подключения сервера к сокету формируется событие *ServerSocketConnect*. Приветственное сообщение генерируется в результате его обработки.

Клиенты в ответ отправляют сообщение с подтверждением подключения следующего вида:

```
Client «IP_адрес_клиента» connected
Получено: Hello!
```

Пример приветственного сообщения представлен на рисунках 2, б (более детально на рис. 5).



```
Client connection accepted
Listening on port 65210
Server starting
< Hello!
Client IP: 192.168.1.117 connected
Получено: Hello!
```

Рис. 5. Вид приветственного сообщения

При формировании ответного сообщения также задействован обработчик события, связанного с работой компонентов (в данном случае - компонента **ClientSocket**). В момент подключения клиента к сокету формируется событие *ClientSocketConnect*. В результате его обработки клиент отправляет серверу информационное сообщение с подтверждением подключения.

Кнопка «Destroy Socket» используется для разрушения сокетного соединения между сервером и клиентом. При отключении клиента формируется событие *ServerSocketClientDisconnect*. В результате его обработки сервер генерирует информационное сообщение '*Client disconnected*'.

По нажатию кнопки «Destroy Socket» сначала отключается соединение на стороне клиента. После чего закрывается сокетное соединение на стороне сервера.

2.2.3. Порядок использования вкладки Connect

Для создания беспроводной сети необходимо щелчком по кнопке **Wi-Fi_Network_list** активировать алгоритм загрузки списка доступных беспроводных сетей и, если точка доступа **ESPar_236** обнаружена, необходимо подключиться к ней кнопкой «Подключиться к Wi-Fi». Затем необходимо установить IP – адрес подключаемого (локального) компьютера и указать его в поле **Local IP**. Для установления IP – адреса можно, например, воспользоваться командой **ipconfig** из командной строки Windows. После чего необходимо указать номер порта подключения к сокетному соединению (произвольное значение в диапазоне от 2000 до 65535).

Дальнейшая настройка зависит от типа соединения и вида используемой для обмена данными сети. Если реализуется беспроводной обмен данными между двумя компьютерами с использованием точки доступа **ESPar_236** в качестве сервера, необходимо произвести настройку удалённого компьютера аналогично вышеописанной методике.

Следующим шагом необходимо подключить сокетное соединение. Для этого на стороне локального компьютера необходимо указать IP – адрес удалённого компьютера в поле **Connection IP**. На стороне удалённого компьютера в том же поле необходимо указать IP – адрес локального компьютера. Затем последовательным нажатием кнопок «Create Socket» и «Connect» необходимо создать сокетное соединение с удалённым компьютером и подключиться к нему.

2.2.4. Вкладка Information

Вкладка **Information** используется для приёма и передачи данных и содержит элементы управления и отображения данных (управляющие кнопки, поля ввода и отображения данных), которые используются для обмена данными по протоколу TCP/IP между клиентской и серверной частями системы.

Вкладка содержит поля ввода и отображения информационных сообщений, которыми клиент и сервер обмениваются между собой; кнопки «Send -> Server» и «Send -> Client». Кнопки «Send -> Server» и «Send -> Client» позволяют отправлять сообщения серверу со стороны клиента и клиенту со стороны сервера соответственно.

Для правильного функционирования алгоритма приёма и передачи данных в проекте предусмотрена

обработка событий, связанных с работой компонентов **ClientSocket** и **ServerSocket**. При приёме сервером данных от клиента формируется событие *ServerSocketClientRead*. В результате его обработки принятые данные выводятся на дисплей серверной части (строки данных выводятся в элемент Memo серверной части программы).

При обнаружении ошибки подключения или передачи данных формируется событие *ServerSocketClientError*. В результате его обработки сервер генерирует сообщение-отчёт с кодом ошибки.

При приёме клиентской частью сообщения от сервера формируется событие *ClientSocketRead*. В результате его обработки принятые данные выводятся на дисплей клиентской части.

2.3. Тестирование разработанного программно-аппаратного комплекса

Проверка работоспособности разработанного программно-аппаратного комплекса производилась в два этапа.

На первом этапе работа комплекса тестировалась в составе беспроводной локальной сети типа звезда - для тестирования создавалась беспроводная локальная сеть на основе нескольких ноутбуков со штатными Wi-Fi – приёмопередатчиками.

Точка доступа на основе Wi-Fi-модуля ESP8266 использовалась в такой сети в качестве сервера (повторялись условия раздела «Аппаратная часть»). К этой сети подключались два ноутбука, один из которых использовался в качестве источника сигнала. В этом случае к аппаратной части комплекса (плата Node MCU) проводным способом подключался только источник питания.

На втором этапе аппаратная часть комплекса использовалась в качестве беспроводного Wi-Fi – модема, к которому с помощью проводного соединения подключался источник сигнала. Для этого к плате Node MCU посредством конвертера USB2.0-UART подключался источник сигнала (радиомодем RFD – 900). Схема межсоединений прототипа устройства, которое использовалось для тестирования на втором этапе, представлена на рис. 6.

Wi-Fi – модуль ESP8266 использовался в обоих случаях в качестве беспроводного наземного ретранслятора сигнала на встроенный Wi-Fi - модуль ноутбука. В качестве данных для обмена в обоих случаях использовался большой (2кБ) массив байт, а также текстовая строка, содержащая 1000 символов.

Проверка правильности работы комплекса производилась с помощью разработанного автором программного модуля. В обоих случаях в качестве источника и приёмника сигналов использовались

ноутбуки, работавшие под управлением ОС Windows 7.

Тем не менее, авторы понимают, что некоторые моменты статьи разработаны недостаточно. Например, в программной части не проработан механизм работы с файловой системой, что было бы очень желательно при использовании разработанного устройства в качестве беспроводного сервера для построения локальной Wi-Fi – сети. Такой механизм облегчил бы задачу обмена файлами (например, видеофайлами) в локальной сети.

Программная часть реализована только для использования в ОС Windows. Желательно предусмотреть реализацию её в других ОС (Linux, Android), учитывая широкую распространённость этих ОС.

В будущем планируется устранить эту недоработку.

Другое перспективное направление развития разработки – использование встроенного в SoC ESP8266 аналогово-цифрового преобразователя для построения беспроводного Wi-Fi – датчика.

В обоих случаях (первый и второй этап тестирования) была достигнута скорость обмена данными 115 200 кБ/с.

Заключение

Разработано дешёвое, экономичное (с малым током потребления), лёгкое устройство беспроводного подключения радиомодема к НСУ БПЛА для передачи сигналов телеметрии и команд управления между радиомодемом (RFD – 900) и наземной станцией БПЛА в полнодуплексном режиме.

Передача телеметрических сигналов на встроенный в ноутбук Wi-Fi - приёмопередатчик осуществляется с использованием Wi-Fi-модуля ESP8266 - 12E (отладочная плата Node MCU), подключённого посредством UART - интерфейса к выходу радиомодема. Wi-Fi – модуль используется в качестве наземного ретранслятора сигнала, принятого радиомодемом RFD – 900, на встроенный Wi-Fi - модуль ноутбука.

Кроме того, разработанное устройство можно использовать в качестве беспроводного сервера для построения локальной Wi-Fi –сети.

В дополнении к аппаратной части разработан программный модуль обмена данными на основе TCP/IP – протокола, задача которого состоит в экспорте телеметрической информации, принятой беспроводным интерфейсом НСУ, в управляющее ПО.

Для упрощения процедуры встраивания разработанного программного модуля в основное ПО наземной станции управления, программная часть

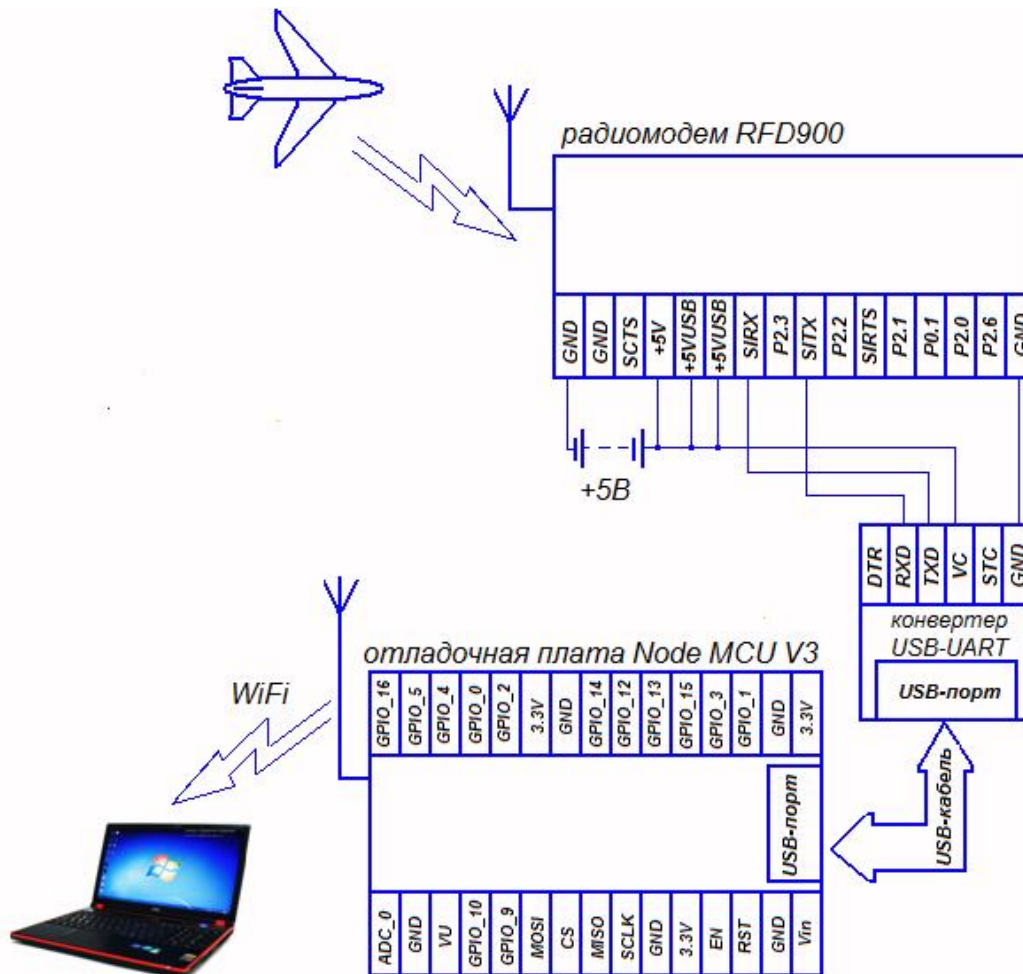


Рис. 6. Схема межсоединений разработанного прототипа устройства, которое использовалось для тестирования на втором этапе

устройства разрабатывалась с использованием IDE Delphi.

Разработанное устройство обладает признаками модульности и универсальности, что расширяет сферу его применения: позволит использовать, например, для беспроводной передачи сигналов видеотракта (FPV) БПЛА, а также в приложениях, не связанных с беспилотной авиацией.

Литература

1. Ground Control Station - UAV Factory – Unmanned Platforms and Subsystems [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.uavfactory.com/product/16>. - 3 октября 2012.
2. Transportable UAS Ground Station - Vislink [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://vislink.com/wp-content/uploads/2016/02/Transportable-Ground-Station_Datasheet_RD001445_ENG.pdf. - 24 апреля 2014.
3. Piccolo System User's Guide-Unmanned Aircraft & Drones [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.uadrones.net/systems/research/acrobat/050418.pdf>. - 18 апреля 2005.
4. Mi_Wi-Fi_Amplifier-Xiaomi_Mi.pdf [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://files.xiaomi-mi.com/files/Wi-Fi_amplifier/Wi-Fi-amplifier-EN.pdf. - 31 дек. 2016.
5. WI-FI AVIN User manual.pdf [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ecwox.tistory.com/attachment/cfile4.uf@214ECF44555EEB3308E753.pdf>. - 29 октября 2015.
6. Wi-Fi передача видеосигнала на смартфон или планшет [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.youtube.com/watch?v=NZsZpGyt--U&list=PLLZE76gJ6shP4bY1QHzoBEEABIEQ-2J&index=89>. - 26 мая 2016.
7. IEEE Standard for Information technology - Telecommunications and information exchange between systems-Local and metropolitan area networks -

Specific requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11-2007.pdf>. - 12 июня 2007.

8. *ESPRESSIF smart connectivity platform: ESP8266 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://wiki.itreadstudio.com/images/e/e0/ESP8266_Specifications_English.pdf. - 12 октября 2007.*

9. *ESP8266EX Hardware User Guide [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://akizukidenshi.com/download/ds/esp8266systems/0B-ESP8266_Hardware_User_Guide_EN_v1.1.pdf. - 1 июня 2015.*

10. *TN0897 Technical note ST SPI protocol [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/technical_note/58/17/ad/50/fa/c9/48/07/DM00054618.pdf/files/DM00054618.pdf/jcr:content/translations/en.DM00054618.pdf. - 21 сентября 2013.*

11. *UM10204 I2C-bus specification and user manual [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.nxp.com/documents/user_manual/UM10204.pdf. - 4 апреля 2014.*

12. *ESP-12E Wi-Fi Module [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://mintbox.in/media/esp-12e.pdf>. - 14 мая 2015.*

13. *A development kit for NodeMCU firmware [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/nodemcu/nodemcu-devkit>. - 17 января 2017.*

14. *Schematics for ESP - 12E DevKit [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://smartarduino.gitbooks.io/user-manual-for-esp-12e-devkit/content/schematics_for_esp-12e_devkit.html. - 21 января 2017.*

15. *Точка доступа на ESP8266 за 5 минут. Описание методики программирования модуля ESP8266 в качестве точки доступа [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.youtube.com/watch?v=pP3-63agSG4>. - 25 января 2017.*

16. *TCP/IP Builder 1.9 description and download [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.drk.com.ar/builder.php.u> - 30 сентября 2012.*

17. *Netsh Commands for Wireless Local Area Network (WLAN) in Windows Server 2008 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://technet.microsoft.com/en-us/library/cc755301\(v=ws.10\).aspx](https://technet.microsoft.com/en-us/library/cc755301(v=ws.10).aspx). - 7 мая 2009.*

18. *Windows 7 Wi-Fi command cheatsheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.4armed.com/blog/windows-7-wi-fi-command-cheatsheet/>. - 7 августа 2014.*

References

1. *Ground Control Station - UAV Factory - Unmanned Platforms and Subsystems.* Available at: <http://www.uavfactory.com/product/16>. (Accessed 3.10.2012).

2. *Transportable UAS Ground Station - Vislink.* Available at: https://vislink.com/wp-content/uploads/2016/02/Transportable-Ground-Station_Datasheet_RD001445_ENG.pdf. (Accessed 24.04.2014).

3. *Piccolo System User's Guide-Unmanned Aircraft & Drones.* Available at: <http://www.uadrones.net/systems/research/acrobat/050418.pdf>. (Accessed 18.04.2005).

4. *Mi_Wi-Fi_Amplifier-Xiaomi_Mi.pdf.* Available at: https://files.xiaomi-mi.com/files/Wi-Fi_amplifier/Wi-Fi-amplifier-EN.pdf - (Accessed 31.12.2016).

5. *WI-FI AVIN User manual.pdf.* Available at: <http://ecwox.tistory.com/attachment/cfile4.uf@214ECF44555EEB3308E753.pdf>. (Accessed 29.10.2015).

6. *Wi-Fi peredacha videosignala na smartfon ili planshet.* [Wi-Fi transmission of video on a smartphone or tablet.] Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=NZsZpGyt-U&list=PLLZE76gJ6shP4bY1QHzoBEEABIEQ-2Jjs&index=89>. (Accessed 26.05.2016).

7. *IEEE Standard for Information technology - Telecommunications and information exchange between systems-Local and metropolitan area networks - Specific requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications.* Available at: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11-2007.pdf>. (Accessed 12.06.2007).

8. *ESPRESSIF smart connectivity platform: ESP8266.* Available at: http://wiki.itreadstudio.com/images/e/e0/ESP8266_Specifications_English.pdf. (Accessed 12.10.2007).

9. *ESP8266EX Hardware User Guide.* Available at: http://akizukidenshi.com/download/ds/esp8266systems/0B-ESP8266_Hardware_User_Guide_EN_v1.1.pdf. (Accessed 23.06.2015).

10. *TN0897 Technical note ST SPI protocol.* Available at: http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/technical_note/58/17/ad/50/fa/c9/48/07/DM00054618.pdf/files/DM00054618.pdf/jcr:content/translations/en.DM00054618.pdf. (Accessed 21.09.2013).

11. *UM10204 I2C-bus specification and user manual.* Available at: http://www.nxp.com/documents/user_manual/UM10204.pdf. (Accessed 04.04.2014).

12. *ESP-12E Wi-Fi Module.* Available at: <https://mintbox.in/media/esp-12e.pdf>. (Accessed 14.05.2015).

13. *A development kit for NodeMCU firmware.* Available at: <https://github.com/nodemcu/nodemcu-devkit>. - (Accessed 07.01.2017).

14. *Schematics for ESP - 12E DevKit.* Available at: https://smartarduino.gitbooks.io/user-manual-for-esp-12e-devkit/content/schematics_for_esp-12e_devkit.html. - (Accessed 21.01.2017).

15. *Tochka dostupa na ESP8256 za 5 minut. Opisanije metodiki programirovanija modolja ESP8266 v kachestve tochki dostupa.* [Access point on ESP8266 in 5 minutes. Description of the programming methodology module ESP8266 as an access point.] Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=pP3-63agSG4>. (Accessed 25.01.2017).

16. *TCP/IP Builder 1.9 description and download.* Available at: <http://www.drk.com.ar/builder.php>. (Accessed 30.09.2012).

17. *Netsh Commands for Wireless Local Area Network (WLAN) in Windows Server 2008.* Available at: [https://technet.microsoft.com/en-us/library/cc755301\(v=ws.10\).aspx](https://technet.microsoft.com/en-us/library/cc755301(v=ws.10).aspx). (Accessed 7.05.2009).

18. *Windows 7 Wi-Fi command cheatsheet.* Available at: <https://www.4armed.com/blog/windows-7-Wi-Fi-command-cheatsheet/>. (Accessed 7.08.2014).

Поступила в редакцію 20.06.2017, рассмотрена на редколлегии 14.09.2017

БЕЗДРОТОВІ МЕРЕЖІ ДЛЯ ПЕРЕДАЧІ СИГНАЛІВ ТЕЛЕМЕТРІЇ НА НАЗЕМНУ СТАНЦІЮ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ: ОРГАНІЗАЦІЯ І ПРОГРАМНО-АПАРАТНІ ЗАСОБИ

Д. П. Кудрявцев, Мохаммаді Фархаді Рахман

В роботі проаналізовано способи і пристрої забезпечення зв'язку БПЛА і наземної станції управління. У більшості способів обміну даними зв'язок між радіомодемом наземної частини системи обміну телеметричними сигналами та наземною станцією керування реалізовано з використанням дротових інтерфейсів, що в багатьох випадках не є оптимальним. Запропоновано забезпечити такий вид зв'язку з використанням бездротової (Wi-Fi) мережі.

Бездротова мережа в даній роботі використовувалася для обміну сигналами телеметрії між радіомодемом RFD - 900 і наземною станцією БПЛА (встановлена на ноутбучі) в повнодуплексному режимі. Передача телеметричних сигналів на вбудований в ноутбук Wi-Fi-приймач здійснюється з використанням Wi-Fi-модуля ESP8266-12E (у складі налагоджувальної плати NodeMCU), що підключається за допомогою UART - інтерфейсу до виходу радіомодему і використовується в якості наземного ретранслятора сигналу. Для реалізації такого обміну в середовищі програмування Delphi 7 розроблено програмний модуль обміну даними на основі TCP/IP - протоколу.

Ключеві слова: Wi-Fi, SoC, IoT, безпроводна локальна мережа, ESP8266, TCP/IP – протокол, програмно реалізований сокет.

WIRELESS NETWORKS FOR TELEMETRIES SIGNAL TRANSMISSION ON THE GROUND STATION OF UNMANNED AERIAL VEHICLE: ORGANIZATION AND SOFTWARE DEVICES

D. P. Kudrjavec, Mohammadi Farhadi Rahman

The methods and devices for providing communication between unmanned aerial vehicle and ground control station are analyzed in this paper. In many cases this solution is not optimal. The maximum length of the USB cable limits the distance between the radio modem and the ground control station by five meters. In many cases, this solution is not optimal. The maximum length of the USB cable limits the distance between the radio modem and the ground control station by five meters. It creates discomfort to take out the radio modem on the mast. Bad fixing of the USB cable connector in the corresponding port of the laptop creates an unreliable connection, which often causes a non-qualified transmission of telemetric information. This method of connection allows only a point-to-point connection. At the same time, it is often necessary to simultaneously transmit a telemetry signal to several terrestrial devices.

It is proposed to provide this type of communication using a wireless (Wi-Fi) network. The wireless network in this work was used to exchange telemetry signals between the RFD-900 radio modem and the ground station of the unmanned aerial vehicle (installed on the laptop) in full-duplex mode. The transmission of telemetry signals to the Wi-Fi transceiver, built into the laptop, is carried out using the ESP8266-12E module, which is included in the

NodeMCU-debug board. The ESP8266-12E module is connected via the UART interface to the output of the radio modem and used as a ground system's wireless signal repeater.

To implement such signal transmission in the Delphi 7 IDE was developed a software module based on the TCP/IP protocol.

The developed device has the modularity and universality features, which expands the area of its application. For example: video signals wireless transmission (FPV), an applications not associated with remote-controlled aircraft. In addition, the developed device can be used as a wireless server for local Wi-Fi network building.

It is planned to modernize the software in the future - it will be added algorithm for working with a file system, it will be developed the software for other operating systems (Linux, Android) etc.

Keywords: Wi-Fi, SoC, IoT, wireless local network, ESP8266, TCP/IP – protocol, program realized socket.

Кудрявцев Дмитрий Петрович – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры производства радиоэлектронных систем летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: kudryvzev99@gmail.com.

Мохаммади Фархад Рахман – аспирант кафедры производства радиоэлектронных систем летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: rmfahadi.ua@gmail.com.

Kudrjvtcev Dmitry Petrovich – Ph.D., Assistant Professor of Dept. Radio electronic systems of aircrafts production, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine, e-mail: kudryvzev99@gmail.com.

Mohammadi Farhadi Rahman – Ph.D.-student of Electronic Production of Aircraft Systems Department, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine, e-mail: rmfahadi.ua@gmail.com.