

РАДИОЛИНИИ СВЯЗИ С БПЛА

ПРИМЕРЫ РЕАЛИЗАЦИИ

В предыдущей публикации [1] мы рассмотрели требования, предъявляемые в вооруженных силах стран НАТО к радиолиниям передачи информации с борта беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). За счет каких технических средств предполагается их реализовывать? Информации об этом крайне мало, тем не менее представление составить можно.

В первом поколении радиолиний связи с БПЛА вооруженных сил стран НАТО использовалась существующая инфраструктура коммуникаций (например, JTIDS/Link 16). В частности, такой концепции придерживаются и разработчики автоматизированной системы противодействия террористическим угрозам в гаванях LEXXWAR, продемонстрировавшей на выставке TechDemo'08 [2]. Однако недостаточная пропускная способность Link 16 – до 50 Кбит/с [3] – не позволяет полностью реализовать потенциал БПЛА. Поэтому сегодня ведутся многочисленные разработки радиосредств для связи с БПЛА, причем они характеризуются многообразием подходов. Определенную долю международного рынка занимают системы с традиционными, проверенными на протяжении многих лет методами модуляции сигналов. Характерным примером тому является аналоговый канал передачи видеоданных с борта германского БПЛА "Луна" с полосой пропускания 5 МГц, по которому также транслируются изображения местности, полученные с бортовой РЛС с синтезированной апертурой MiSAR.

Другой пример использования устаревших, с точки зрения STANAG 4609, аналоговых методов связи с традиционной частотной модуляцией сигналов GMSK – разработанный компанией Enerdyne (www.enerdyne.com) программируемый модем для тактических систем БПЛА EnerLinkIII [4] (рис.1, 2). В режиме прямой видимости он передает видеоданные NTSC, PAL и RS170 в частотных диапазонах 1700–1850 МГц (L-диапазон), 2200–2500 МГц (S-диапазон), 4400–4950 МГц (нижний C-диапазон) и 5250–5850 МГц (верхний C-диапазон). Каждый из них может использоваться для восходящего и нисходящего каналов. При этом достигается эквивалентная скорость передачи данных 11 Мбит/с на расстоянии 75 морских миль (в дальнейшем планируется поднять скорость передачи до 22 Мбит/с) и 5 Мбит/с –

В. Слюсар, д.т.н.
swadim@inbox.ru

на расстоянии до 100 морских миль. В типовом составе наземного оборудования предусмотрена зеркальная параболическая антенна диаметром 24 дюйма с автоматическим сопровождением БПЛА в пределах зоны прямой видимости. Для работы на незначительной дальности, где угловая скорость БПЛА может превысить возможности карданной подвески наземной антенной системы, используется всенаправленная антенна. Антенны переключаются автоматически. Кроме аналогового режима работы, разработчики рекламируют возможность перепрограммирования EnerLinkIII для цифровых методов модуляции, что свидетельствует о перспективности именно цифровых технологий передачи данных. В частности, именно цифровые версии EnerLinks используются фирмой DRS Technologies при модернизации ее БПЛА Sentry и Neptune. Недавно фирма Insitu объявила о планах применения EnerLinks в ее БПЛА Integrator и Scan Eagle [4].

Ширина полосы пропускания радиоканала системы EnerLinkIII связана со скоростью передачи данных и, к примеру, для 10 Мбит/с составляет менее 12 МГц по уровню -20 дБс (т.е. относительно максимальной амплитуды сигнала на центральной частоте полосы), а по уровню -50 дБс – около 24 МГц. При компрессии изображения согласно стандарту H.264 обеспечивается передача данных двух каналов в режиме NTSC с максимальным разрешением видео 560×480 пикселей или 550×576 – в режиме PAL. При этом максимальная скорость передачи от одного такого источника видеосигналов составляет 3,5 Мбит/с.

Новая система передачи данных Starlink израильской компании Elisra [5] предназначена для обеспечения связи с БПЛА на расстоянии до 100 км в С-диапазоне частот. Система использует временное дуплексирование (TDD), ширина каждого частотного канала – 4 МГц. Радиолиния может функционировать в одночастотном режиме или в режиме скачкообразного изменения частоты. Другая разработка этой же фирмы – система ADLS-2, предназначенная для работы одновременно с пятью малоразмерными БПЛА. Она способна обслуживать 24 IP-источника видео- и аудиоданных, в том числе аналоговых, бортовые РЛС с синтезированной апертурой, GPS-датчики и т.п.

Указанные в предыдущей публикации [1] требования к пропускной способности вынуждают разработчиков радиолиний с

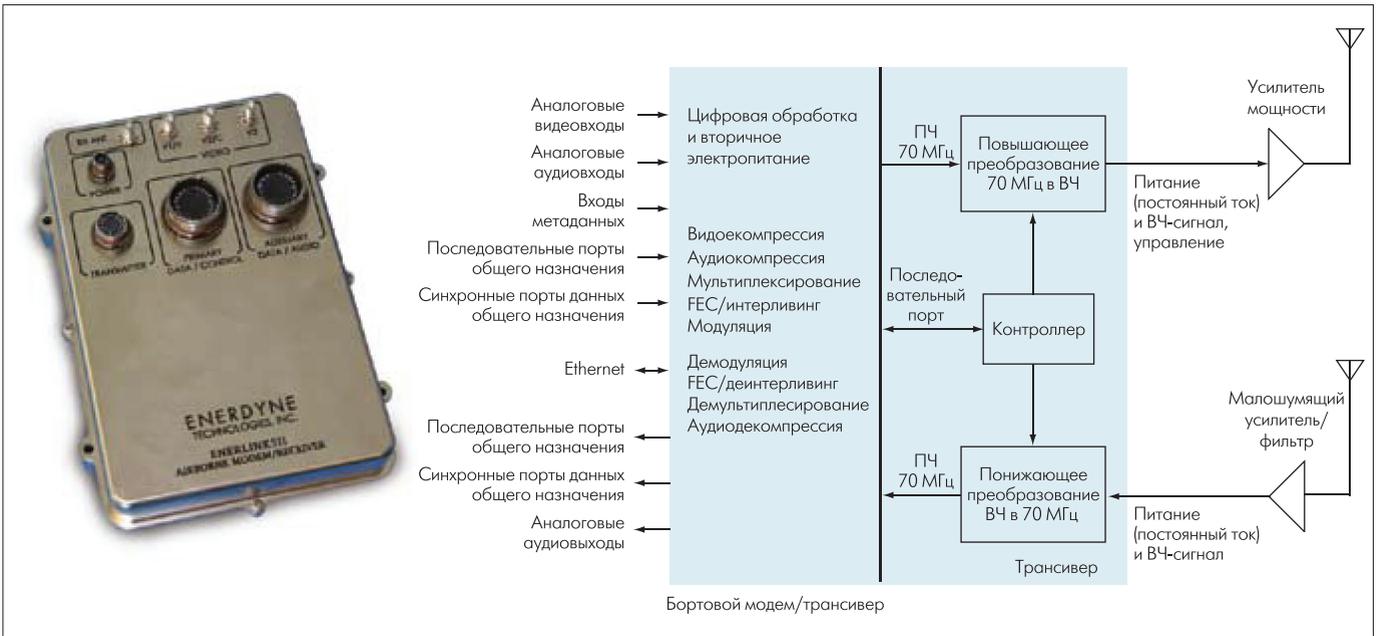


Рис. 1. Бортовой модем EnerLinksIII

БПЛА искать новые подходы к повышению скорости передачи данных от мультисенсорных бортовых платформ. Один из наиболее эффективных подходов – применение модуляции OFDM и C-OFDM. Среди первых проектов, в которых исследовалась возможность применения OFDM-модуляции на линии свя-

зи с БПЛА, – проект MinuteMan, который финансировался отделом перспективных исследований ВМФ США (Office of Naval Research – ONR). Он реализовывался в 2000–2005 годы в лабораториях отделов электротехники и компьютерных наук Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе (UCLA) [6]. Це-

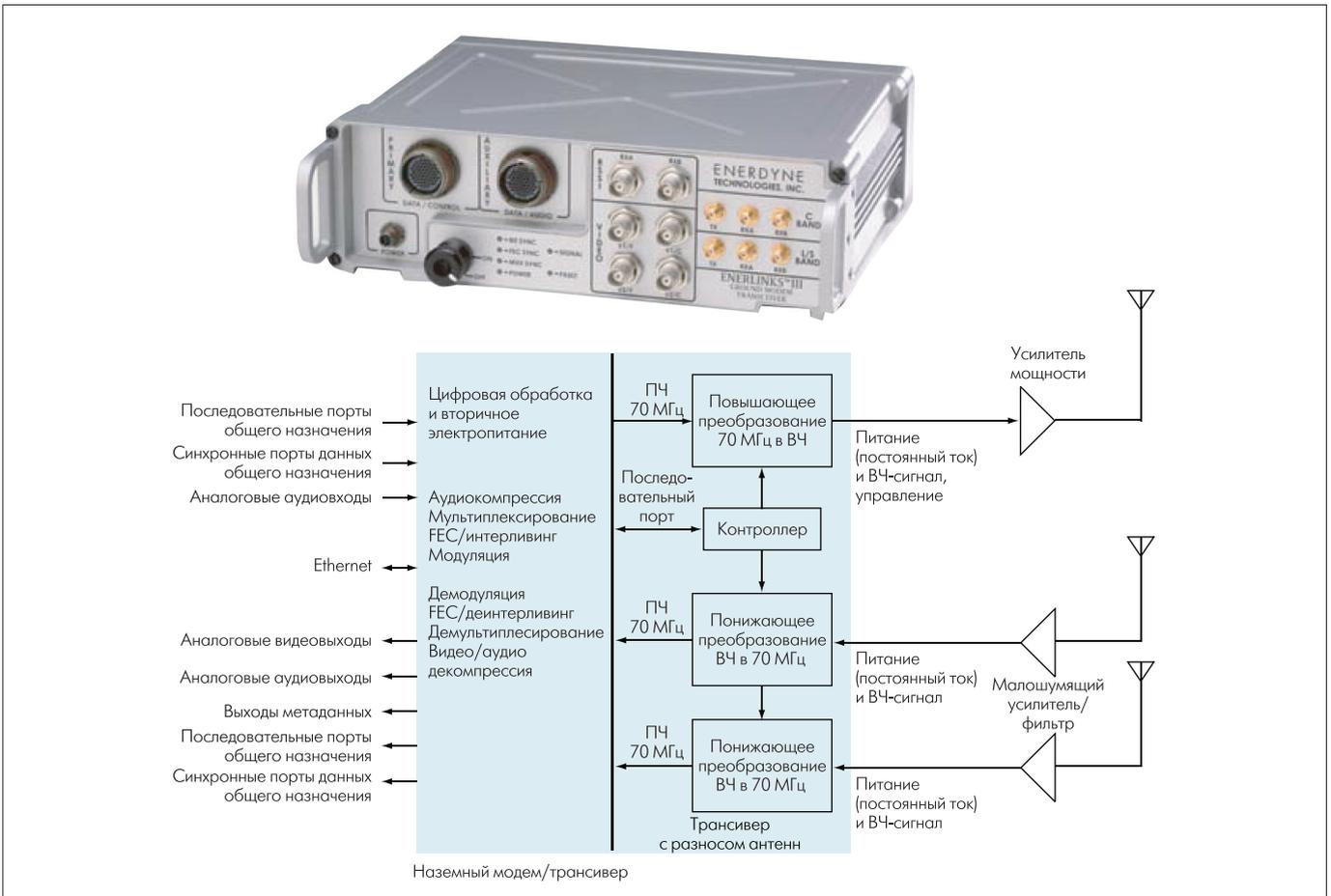


Рис.2. Наземный модем EnerLinksIII

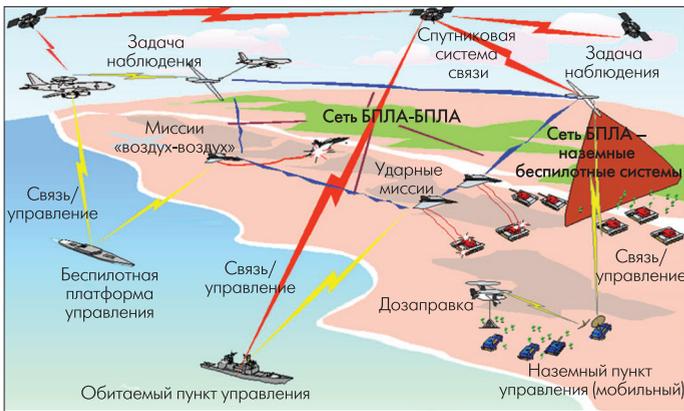


Рис.3. Сущность проекта MinuteMan [6]

лью проекта была разработка системы радиосвязи и обмена данными сил флота с беспилотными воздушными, надводными и наземными аппаратами (рис.3). Среди основных направлений проекта выделим разработку фундаментальных основ организации подвижной беспроводной интеллектуальной сети связи – "интернет в небе"; предоставление динамических услуг для сетевых вычислений; организацию отказоустойчивой связи и самореконфигурацию для распределения информации в реальном масштабе времени, управление задачами, ситуативное поведение; передачу голоса, видео, изображений, данных в реальном масштабе времени с адаптивным обеспечением качества услуг (QoS – Quality of Service) и управлением ресурсами.

Применение OFDM-сигналов в радиолиниях "БПЛА – наземные абоненты" предполагается в проекте Института электроники и связи Украинской академии наук по созданию системы передачи данных на базе высотного БПЛА (СПД „Фаэтон“) [7]. При передаче данных в восходящих каналах (с борта на землю) в этом проекте предлагается использовать стандарт DVB-S с модуляцией OFDM-256, а в нисходящих – методы множественного доступа с частотным и временным разделением. Диапазон частот OFDM-сигналов стандарта DVB-S составляет 11,7–12,5 ГГц, полоса одного радиоканала по уровню -30 дБс достигает 40 МГц. Предельный радиус зоны обслуживания одной центральной станции в условиях прямой видимости при мощности передатчика БПЛА 50 мВт и интенсивности осадков до 40 мм/ч заявлен в пределах 50–60 км. За счет увеличения мощности бортового передатчика радиус зоны покрытия может быть увеличен до 250 км.

Использовать OFDM-модуляцию в сочетании с размещением плоских цифровых антенных решеток (ЦАР) на борту БПЛА предусмотрено в проекте Корейского космического университета по разработке системы передачи видеоданных с беспилотных платформ на основе технологии WiBro (Wireless Broadband, IEEE 802.16) [8]. Адаптивное цифровое формирование луча с компенсацией пространственных эволюций планера БПЛА в случае прямой видимости позволяет ориентировать максимум диаграммы направленности бортовой ЦАР на наземный приемный пункт и тем самым повысить

энергетику канала связи на 15 дБ и более. Это позволит увеличить высоту полета БПЛА при передаче данных без внесения изменений в наземную инфраструктуру.

Постоянно расширяется и военное направление применения OFDM-модуляции. В сухопутных войсках НАТО появились системы связи, использующие военную версию стандарта IEEE 802.11g, их производство освоила нидерландская фирма MobiComm. Компания Nova Engineering уже несколько лет предлагает серийные комплекты связи для BMC США (HDR LOS Radio Modem), которые реализуют принцип OFDM.

Широкому распространению OFDM способствовал выбор данной технологии модуляции сигналов в качестве физической основы создания тактических широкополосных сетей (Wideband Networking Waveform, WNW) в рамках программы Joint Tactical Radio System (JTRS). Как отмечено в Перспективном плане развития беспилотных авиационных систем США [9], WNW планируется использовать в качестве радиолиний связи с БПЛА, например, в частотном диапазоне 225–400 МГц. При этом ожидается достижение скорости передачи данных 10 Мбит/с. При миграции на другие частоты в зависимости от полосы пропускания канала связи скорость передачи может быть увеличена. Например, WNW-модем SDR-4000 компании L-3 Communications Nova Engineering [10] при ширине полосы 10 МГц обеспечивает скорость передачи до 23 Мбит/с. В перспективных планах повышения скорости передачи в транспортной среде WNW указывают 274 Мбит/с [9].

Для одновременной связи с несколькими БПЛА в простейшем случае используются кодированные OFDM-сигналы. Например, фирма Cobham Surveillance (GMS Products, www.gmsinc.com) продвигает систему связи на основе сигналов DVB-T с модуляцией C-OFDM и шестигранной антенной решетки [11]. Система функционирует в диапазоне 1,7–1,85 и 1,99–2,5 ГГц. Ее приемник позволяет обеспечить связь с мобильными источниками сигналов. Так, при 2048 номинальных поднесущих и модуляции поднесущих методом 16-QAM допустим доплеровский сдвиг частот до 570 Гц, что соответствует максимальной скорости взаимного движения передатчика и приемника сигналов 280 км/ч при центральной несущей 2,2 ГГц. Каждая из шести панелей антенны (рис.4) работает с сигналами вертикальной поляризации, коэффициент усиления – 12 дБ, диаграмма направленности – 53° по азимуту и 20° по углу места (на уровне -3 дБ).

Американская компания Aeromix предлагает готовые модемные решения для двусторонней связи с БПЛА в стандарте IEEE 802.16-2004 [12] (режим WirelessMAN_OFDM). При этом на расстоянии до 75 морских миль обеспечивается скорость передачи данных от 12 до 65 Мбит/с. Объем модема 802.16 EDL Digital Data Link – 24 куб. дюйма, масса – около 360 г. Выпускается и мини-версия модема (802.16 EDL Mini Digital Data Link) для снаряжения малых БПЛА. Ее объем 10 куб. дюймов, масса – около 150 г. Модемы работают в диапазонах 5,725–5,825 и 4,5–4,8 ГГц,

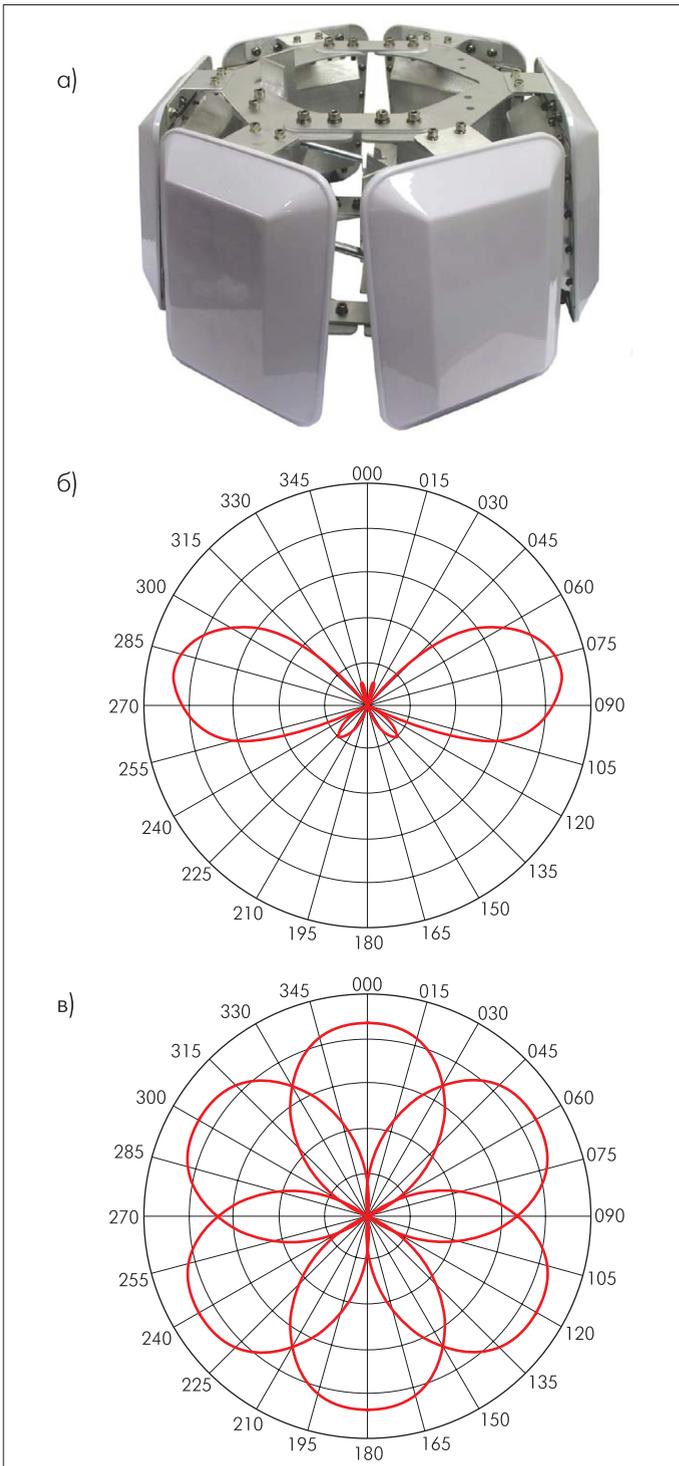


Рис.4. Антенная система фирмы Global Microwave System (а), сечения ее диаграмм направленности в вертикальной (б) и горизонтальной (в) плоскостях при угле места 10° [11]

в них выбирается один из четырех или девяти (в диапазоне 4,5–4,8 ГГц) каналов шириной 17 МГц с шагом 20 МГц. При обработке сигналов применяются две промежуточные частоты – 20 и 570 МГц. В зависимости от дальности связи, скорости движения БПЛА и помеховой обстановки могут применяться разные уровни амплитудно-фазовой модуляции поднесущих, с соответствующим изменением скорости: 6 Мбит/с (BPSK); 15 Мбит/с (QPSK); 22,5 Мбит/с (8-PSK1); 30 Мбит/с (16-QAM или 16-PSK1);

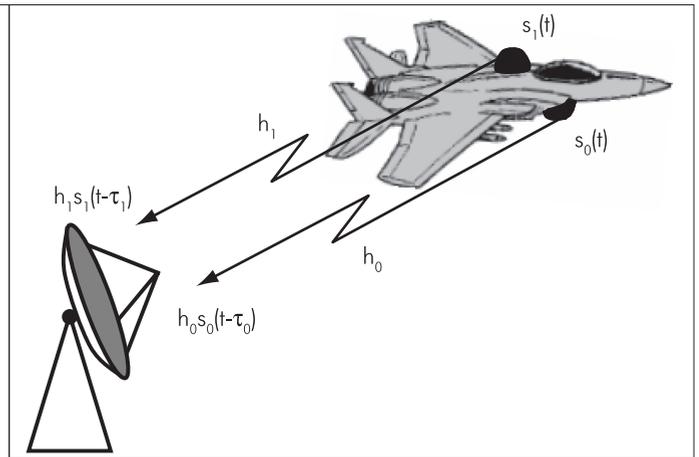


Рис.5. Типовая система МИМО по схеме "2×1" при решении задач бортовой телеметрии [13]

65,5 Мбит/с (64-QAM). Существенно, что надежная связь обеспечивается при максимальном доплеровском сдвиге частоты, соответствующем взаимной скорости пунктов приема и передачи данных 2500 миль/ч.

При многолучевом распространении радиоволн на пересеченной местности и множественных переотражениях сигналов актуальна технология многоантенных систем МИМО, базирующаяся на применении цифровых антенных решеток (ЦАР). Один из первых примеров использования технологии МИМО для связи с летательными аппаратами – двухантенная передача телеметрических данных с борта летательного аппарата на наземную станцию телеметрии [13]. В работе [14] была продемонстрирована эффективность применения простейшей схемы пространственно-временного кодирования по алгоритму Аламоути для варианта "2 бортовых антенны – один наземный приемник" (схема MISO, много входов – один выход) (рис.5). Наличие двух антенн на корпусе БПЛА позволило решить проблему поддержки надежной связи при разных ориентациях корпуса БПЛА относительно направления на наземную станцию. В последующем была экспериментально доказана стационарность коэффициентов передачи MISO-канала на протяжении нескольких секунд в отсутствие маневра летательного аппарата [15–17]. Это создало предпосылки для разработки более продвинутых МИМО-решений, использующих многоэлементные антенные решетки.

Принцип МИМО используется, например, для приема данных от бортовых сенсоров вертолетного мини-БПЛА, разработанного Фраунгоферским институтом химических технологий (Германия). Соответствующая 4-элементная антенная система приемно-передающей станции связи с БПЛА в диапазоне частот 2,4 ГГц (рис. 6) была представлена на выставке TechDemo'08 [2].

Основное условие успешного применения МИМО-систем – стационарность коэффициентов передачи радиоканала с момента их оценивания до завершения трансляции массива данных. Понятно, что для низкоскоростных БПЛА эти условия соблюдения намного проще, чем для высокоскоростных. Однако при приеме сигналов вне прямой видимости коэффициенты пере-



Рис.6. MIMO-система связи с БПЛА (приемник видеоданных AR023-01) компании AirRobot. Фото автора

дачи канала можно считать псевдостационарными и для БПЛА, двигающихся с большой скоростью. Действительно, углы падения электромагнитных волн на поверхность рассеивания в районе наземной приемной станции мало изменяются при большом удалении источника сигналов. Например, угол прихода волны изменится на 1° при смещении БПЛА на 17,6 м на удалении 1 км или на 1746 м при удалении в 100 км.

Таким образом, при формировании требований к перспективным радиолиниям связи с БПЛА необходимо ориентироваться на предпочтительное применение сигналов с модуляцией C-OFDM в сочетании с технологиями цифрового диаграммообразования, MIMO и мультиMIMO (MultiUser MIMO). При OFDM-модуляции важен метод упреждающей компенсации эффекта Доплера по полученным с помощью пилот-сигналов оценкам доплеровских смещений частоты. Все это позволяет обеспечить максимальную спектральную эффективность каналов связи и их устойчивость к влиянию помех.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Слюсар В.** Передача данных с борта БПЛА: стандарты НАТО. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2010, № 3, с. 80–86.
2. **Слюсар В.** Электроника в борьбе с терроризмом: защита гаваней. Часть 1. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2009, № 5, с. 68–73.
3. **Steven J. Zaloga, David Rockwell, Philip Finnegan.** World Unmanned Aerial Vehicle Systems. Market Profile and Forecast, 2008 Edition. – www.dror-aero.com/link/UAV/WORLD_UNMANNED_AERIAL_VEHICLE_SYSTEMS_-_MARKET_PROFILE_AND_FORECAST_2008.pdf.
4. Enerdyne Introduces Programmable EnerLinksIII Advanced Data Link for Tactical UAV Systems. – www.enerdyne.com.
5. Elisra presents New UAV Data Link Technology

Developments. – www.asd-network.com/press_detail/22216/Elisra_presents_New_UAV_Data_Link_Technology_Developments.htm.

6. Overview of UCLA MinuteMan-Project. – www.icsl.ucla.edu.

7. **Илюшко В.М., Нарытник Т.М.** Система передачи данных на базе высотного беспилотного летательного аппарата (СПД "Фаэтон"). – Зв'язок, 2004, № 7, с. 38–39.

8. **Pyung-Joo Park et al.** Performance of UAV (Unmanned Aerial Vehicle) Communication System Adapting WiBro with Array Antenna. – Proceedings of the 11th international conference on Advanced Communication Technology, Volume 2, Feb. 15–18 2009, p. 1233–1237.

9. Unmanned Aircraft Systems (UAS) Roadmap 2005–2030. – www.globalsecurity.org/intell/library/reports/2005/roadmap-final2.pdf.

10. Wideband Networking Waveform OFDM PHY. Physical Layer Implementation of WNW on the SDR-4000 Platform. – www.spectrumsignal.com/products/pdf/WWN_OFDM_web.pdf.

11. Messenger Antenna Array (MAA) 12 dB, 1.7–2.5 GHz, Six-Panel Array. – www.southwestantennas.com/images/maa-ds0212x1.pdf.

12. Aeronix 802.16 UAV EDL Digital Data Link. – www.aeronix.com/products/uav_sensor_data_link/.

13. **Tom Nelson.** Space-Time Coding with Offset Modulations. A dissertation for the degree of Doctor of Philosophy. – Department of Electrical and Computer Engineering, Brigham Young University, December, 2007. – contentdm.lib.byu.edu/ETD/image/etd2155.pdf.

14. **R.C.Crummett, M.A.Jensen, and M.D.Rice.** Transmit diversity scheme for dual-antenna aeronautical telemetry systems. – Proceedings of the 38th International Telemetry Conference, San Diego, CA, October 21–24, 2002, p. 113–121.

15. **M. Jensen, M. Rice, T. Nelson, A. Anderson.** Orthogonal dual-antenna transmit diversity for SOQPSK in aeronautical telemetry channels. – Proceedings of the International Telemetry Conference, San Diego, CA, October 2004, p. 337–344.

16. **M. Jensen, M. Rice, A. Anderson.** Comparison of Alamouti and differential space-time codes for aeronautical telemetry dual-antenna transmit diversity. – Proceedings of the International Telemetry Conference, San Diego, CA, October 2004, p. 345–354.

17. **Tom Nelson, Michael Rice, Michael Jensen.** Experimental Results for Space-Time Coding Using ARTM Tier-1 Modulation. – Proceedings of the International Telemetry Conference, Las Vegas, NV, October 2005, p. 90–100.