

СРЕДСТВА СВЯЗИ С НАЗЕМНЫМИ РОБОТИЗИРОВАННЫМИ СИСТЕМАМИ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

П.Сердюк, В.Слюсар, д.т.н. swadim@inbox.ru

Для военного руководства большинства развитых стран использование безэкипажных наземных боевых средств (Unmanned Ground Vehicles, UGV) [1] – одно из важнейших направлений развития вооружения и военной техники. Считается, что высокий уровень оснащения сухопутного компонента вооруженных сил роботизированными системами и комплексами в перспективе позволит обеспечить ведение полномасштабных сетецентричных боевых действий на основе группового применения безэкипажных платформ в воздухе, на воде и на суше [1]. Ключевая роль в реализации систем UGV отводится средствам связи. Какие возможности предоставляют современные решения в этой области?

ТРАЕКТОРИЯ РОСТА

За последнее десятилетие в развитии военной робототехники произошли значительные изменения, связанные, прежде всего, с массовым производством и испытанием в реальных условиях боевых и обеспечивающих безэкипажных средств. Согласно [2], по состоянию на сентябрь 2010 года, около 8 тыс. UGV различных типов применялось в операциях "Несокрушимая свобода" (Operation Enduring Freedom) в Афганистане и "Свобода Ираку" (Operation Iraqi Freedom). UGV были использованы более чем в 125 тыс. миссий, включая идентификацию подозрительных объектов и рекогносцировку маршрутов передвижения войск, определение местонахождения и обезвреживание самодельных взрывных устройств (improvised explosive devices, IED), разминирование местности, радиационную, химическую и биологическую разведку. В ходе антитеррористических мероприятий с помощью UGV военнослужащие сухопутных войск и морской пехоты обнаружили и обезвредили более 11 тыс. самодельных взрывных устройств. По оценкам военных аналитиков США [3], в январе 2013 года в Афганистане ежедневно использовалось более 12 тыс. образцов UGV различного назначения.

Индустрия беспилотных систем переживает период кардинальных изменений. За последние пять лет на вооружение в мире было принято рекордное количество безэкипажных, автоматически управляемых наземных средств, что подтверждает интерес оборонных заказчиков к подобным системам. Закрепившиеся в этом сегменте рынка сотни поставщиков предлагают не только готовые платформы, но и разнообразные программные продукты, датчики, коммуникационные решения и др. По мере изменения характера современных боевых действий и сокращения финансирования ряда оборонных программ обостряется конкуренция между подрядчиками и поставщиками.

В современных условиях совершенствование UGV обусловлено преимущественно развитием микроэлектроники и микропроцессорной техники, применением видеокамер высокой четкости и соответствующих им по пропускной способности систем связи и передачи данных. Современные наземные безэкипажные машины предназначены, главным образом, для наблюдения и разведки. Дополнительно ведутся разработки и испытания платформ-носителей оружия, которые могут оснащаться стрелковым вооружением, пулеметом, гранатометом, пусковой установкой для дымовых

гранат. Однако в целом ударные функции известных на мировом рынке UGV пока развиты слабо, поэтому такие машины используются в ограниченных пределах.

По данным [3], в конце 2012 года помимо США программы разработки боевых безэкипажных машин реализовывались еще в 76 странах. Речь идет о технологиях, которые распространяются в глобальном масштабе, причем ускоренными темпами. Согласно [4], мировой рынок UGV-систем в 2012 году составил 651,5 млн. долл. США, тогда как по данным 2010 года его объем оценивался в 418 млн. долл. США [5].

ПРИОРИТЕТЫ АВСТМ

Как указано в [6], планами Министерства обороны США на 2034 год предусматривались разработка и принятие на вооружение 171 типа UGV различного назначения. Это больше, чем количество типов беспилотных летательных аппаратов (БПЛА, UAV) – 93 типа, надводных (USV) и подводных (UUV) безэкипажных средств (47 типов) вместе взятых. В процентном отношении многообразие UGV составляет 55% от перспективной номенклатуры всех безэкипажных средств (311 типов, рис.1). Разработка указанного парка UGV ведется в рамках новой программы "Модернизация боевых бригадных групп" (Army Brigade Combat Team Modernization, АВСТМ), которая в октябре 2009 года пришла на смену программе Future Combat System.

Согласно перспективному плану оснащения вооруженных сил США [7] доля безэкипажных наземных машин общего и специального назначения к 2015 году должна была составить треть от общего количества боевой техники сухопутных войск. Однако в результате свертывания программы Future Combat System сроки реализации намеченного

(30% для UGV) сместились за пределы 2025 года. Причина – реалии мирового экономического кризиса, которые заставили пересмотреть прогноз, хотя изменения коснулись лишь временных рамок, но не объема указанного вооружения.

В соответствии с концепцией АВСТМ в боевых подразделениях (на уровне бригады) на первом этапе (Increment 1) планируется внедрение переносных, малоразмерных, наземных робототехнических систем – Small Unmanned Ground Vehicle (SUGV) – массой 10–15 кг, предназначенных для поддержки боевых действий солдата (подразделения) в населенных пунктах. В частности, бюджетом 2013 года предусматривалась закупка 76 SUGV общей стоимостью 83,9 млн. долл. США для оснащения двух пехотных бригадных групп (Infantry Brigade Combat Teams, IBCT) [8].

Как показали результаты имитационного моделирования [9], внедрение SUGV даже с низким уровнем автономности позволит в два раза (с 36 до 73%) повысить боевую эффективность войск в ходе наступательных боевых действий в городских условиях, уменьшить боевые потери своих военнослужащих в 2,3 раза и увеличить в 1,5 раза летальное поражение противника. Эти результаты были получены для варианта использования дистанционно управляемых SUGV из расчета один аппарат на отделение.

На втором этапе выполнения программы АВСТМ (Increment 2) в дополнение к SUGV планируется приступить к оснащению пехотных бригадных групп многоцелевыми безэкипажными наземными машинами обеспечения боевых действий тактических подразделений.

Что касается разработок новых боевых безэкипажных наземных машин (Armed Robotic Vehicle, ARV), оснащенных средствами разведки и поражения целей (5–6-тонных боевых машин), а также расширения парка безэкипажных наземных машин общего и специального назначения различных

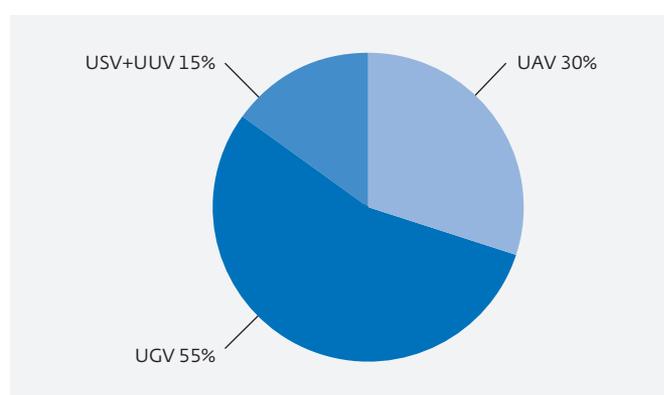


Рис.1. Доля UGV среди безэкипажных платформ вооруженных сил США в 2034 году

весовых категорий, то решение вопроса о соответствующем финансировании отложено до начала реализации третьей фазы программы АВСТМ.

ВЕКТОР РАЗВИТИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Обобщение опыта использования UGV в Афганистане и других вооруженных конфликтах позволило сформулировать требования к перспективным направлениям развития робототехнических систем. В частности, как указано в [1], по мнению аналитиков Объединенного совета вооруженных сил (ВС) США по выработке требований к вооружениям (Joint Requirements Oversight Council, JROC), необходимо продолжить совершенствовать разведывательные возможности UGV, увеличить время автономной работы до суток и более, наращивать ударный потенциал, оснащая в том числе несмертельными видами оружия, добиваться максимальной унификации аппаратуры и подсистем различных типов UGV.

Среди исследований, финансируемых DARPA, применительно к UGV следует указать НИОКР [1], направленные на повышение автономности управления, увеличение радиуса действия, развитие средств технического зрения в сочетании с алгоритмическим обеспечением для автоматического распознавания целей и формирования сценариев боевого применения. Общая тенденция – отказ от дистанционного управления UGV с переходом к полуавтоматическим режимам их функционирования на основе внедрения элементов искусственного интеллекта.

На повестке дня – реализация способности UGV воспринимать голосовые команды управления, самостоятельно выбирать маршрут движения и адаптировать его с учетом текущей обстановки. Кроме того, приоритетной задачей является улучшение помехозащищенности каналов передачи данных и команд управления в условиях группового применения UGV, как в рамках безэкипажных подразделений, так и совместно с экипажными комплексами вооружений и военной техники. По мере решения указанных проблем спектр применения UGV будет значительно расширяться на основе создания как многоцелевых, так и специализированных машин.

Важное отличие современного этапа развития безэкипажных платформ от предшествующих периодов – ориентация при разработке UGV на необходимость функционирования в сетевом информационном пространстве.

ТРЕБОВАНИЯ К СРЕДСТВАМ СВЯЗИ

В соответствии с требованиями, сформулированными в программе WIN-T (Warfighter Information Network-Tactical) в отношении оперативно-тактической системы связи ВС США, ключевая роль при разработке UGV отводится обеспечению их надежной широкополосной связью в защищенной и безопасной информационной среде. Как известно, в случае управления с мобильного командного пункта (КП) группой из нескольких UGV система обмена данными должна обеспечивать передачу команд управления с центрального трансивера КП, а также служебной и сенсорной информации с приемопередающих модулей UGV на центральный трансивер. При этом командный пункт соединяется с каждым из приемопередающих модулей отдельной линией связи.

При реализации сетевцентрической концепции управления приемопередающие модули UGV могут взаимодействовать непосредственно друг с другом. Каждая из линий связи в указанной сетевой архитектуре является дуплексной, причем по направлению от командного пункта передается незначительный объем служебных команд, в то время как от приемопередающих модулей UGV поступает мощный поток сенсорной информации от видеокамер, тепловизоров, радиолокационных и акустических датчиков, бортовой телеметрической аппаратуры. Наибольшую сложность представляет реализация линий связи для передачи именно сенсорных и телеметрических данных. Вполне очевидно, что для этого линии связи должны обладать широкой полосой пропускания с учетом обеспечения достаточной помехозащищенности и скрытности.

Актуальность разработки высокоскоростных коммуникаций обусловлена также необходимостью их применения для управления роботизированными средствами распределенных информационно-управляющих систем [10, 11], в том числе, с использованием сервисов облачных вычислений [12]. По классификации, предложенной в [13], такой класс роботизированных комплексов называется сетевцентрическими автономными наземными транспортными средствами (network-centric autonomous ground vehicle). Переход к использованию распределенных вычислительных ресурсов позволяет реализовать принципы децентрализованного управления, снизить стоимость бортового вычислителя UGV, повысить живучесть за счет привлечения внешних ресурсов взамен вышедших из строя бортовых средств. Распределенные вычислительные ресурсы также обеспечат параллельное

выполнение различных функций системы для сокращения времени отклика UGV на изменения в окружающей обстановке. Это даст возможность повысить скорость движения по пересеченной местности [4].

Прототипом будущей облачной среды для боевых UGV может служить "интернет-мозг" Raruuta [12], созданный европейскими учеными в рамках проекта RoboEarth. Он представляет собой базу знаний с описаниями объектов и явлений реального мира. Предполагается, что к данной базе роботы должны будут подключаться при возникновении нештатной ситуации, не запрограммированной в их бортовых компьютерах. Кроме того, облачный сервис Raruuta может выделять по телекоммуникационным каналам свои вычислительные ресурсы для дополнения штатного "интеллекта" роботов в критические моменты их функционирования.

Среди информационных технологий, максимально соответствующих реализации указанных возможностей, как отмечено в [2], первоочередного внимания заслуживает применение:

- многочастотных сигналов (может использоваться ортогональное частотное дискретное мультиплексирование (OFDM), кодированное OFDM (COFDM), а также неортогональное частотное дискретное мультиплексирование (N-OFDM) [14] в сочетании с кодированием (CN-OFDM), квадратурной амплитудной (QAM) или фазовой (PSK) модуляцией сигналов);
- адаптивного цифрового диаграммообразования в интеллектуальных антенных решетках (smart-антеннах);
- линий связи, функционирующих на основе формирования каналов передачи и приема сигналов по принципу MIMO (множественный вход – множественный выход), а также его многопользовательского варианта (MultiUser MIMO, мульти-MIMO);
- различных комбинаций указанных цифровых технологий.

Таков закономерный итог развития требований к технологиям средств связи с UGV за 20 лет, прошедших с момента публикации [15], в которой были систематизированы передовые по состоянию на начало 1990-х годов взгляды на пути реализации радиоканалов дистанционного управления UGV и информационного обмена с ними.

КАНАЛЫ СВЯЗИ И ОБОРУДОВАНИЕ

Чтобы получить представление о современных достижениях в средствах связи для UGV, рассмотрим сначала результаты [15]. В качестве типового



Рис.2. Принцип взаимодействия элементов в составе комплекса UGV

комплекса UGV, применительно к которому формировались технические требования к радиоканалам связи, использовалась совокупность мобильного пункта управления (Operator Control Unit, OCU), передвижной или стационарной ретранслирующей вышки и собственно безкипажного средства (Mobile Base Unit, MBU) (рис.2) [15]. Бортовое оборудование MBU было представлено двумя видекамерами, обеспечивающими реализацию стереообзора, парой микрофонов и громкоговорителем. Кроме того, передаче подлежали команды управления и информационный поток от различного рода бортовых датчиков. Для трансляции команд с пункта управления на борт UGV были выбраны частоты L-диапазона (1710–1850 МГц), а для приема на пункте управления видео- и аудиоданных с борта UGV – S-диапазона (2310–2390 МГц).

В радиолиниях "ретранслятор-MBU" указанные полосы частот меняются местами таким образом, что команды управления на борт MBU поступают в S-диапазоне, а нисходящие видеопотоки передаются в L-диапазоне. В качестве физической основы для видеокоммуникаций предлагалось использовать частотно-модулированные сигналы с полосой частот 4,2 МГц, совместимые со стандартом NTSC.

Проведенные в [15] расчеты позволили сформулировать требования к спектральной ширине радиоканала для передачи двух потоков видеоданных с борта UGV на уровне 20 МГц, а с учетом использования ретранслятора, принимающего сигналы на одной частоте и переизлучающего их на другой несущей, – 40 МГц. При увеличении количества одновременно обслуживаемых MBU необходимый частотный ресурс значительно увеличивается.

Сегодня для решения этой проблемы широко применяют сигналы COFDM. Идея использования COFDM в каналах связи UGV не нова. Она рассматривалась, например, в патентах США на изобретение, заявленных в 2006–2007 годах. Так, в патенте США № 7633852 [16] указано, что применение COFDM для связи с UGV с полосой канала 2,5 МГц и 400 информационными поднесущими позволяет получить ту же пропускную способность, какую обеспечивает система с аналоговой частотной модуляцией, имеющая ширину полосы 17,5 МГц (рис.3) [17]. При этом значительно повышается чувствительность приемной системы: до -100 дБмВт по сравнению с -83 дБмВт для минимального сигнала, обнаруживаемого в случае традиционной частотной модуляции. В конечном счете, сравнительная узкополосность сигнала COFDM позволяет обслуживать больше UGV без взаимных спектральных

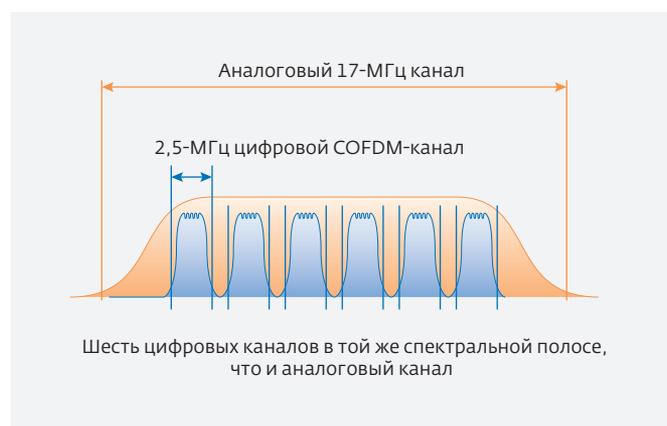


Рис.3. Спектральные полосы сигналов с аналоговой частотной модуляцией и COFDM

помех в отведенном для конкретной миссии диапазоне частот.

Пример реализации аналогичного подхода к решению задачи связи с UGV – оборудование фирмы Silvus Technologies (www.silvustechologies.com, США), которое в 2012 году было продемонстрировано для обмена данными с UGV TALON (фирма QinetiQ North America) и PackBot 510 FasTac (фирма iRobot Corporation). В ходе испытаний использовался MIMO-репитер SC3500 (рис.4) [18] с передатчиком мощностью 1 Вт, излучавший через четыре направленные антенны сигналы COFDM. Устройство обеспечивает дальность связи в режиме прямой видимости (Line-of-sight, LOS) 2,8 км, а в отсутствие таковой (NLOS) – до 500 м. Согласно рекламному проспекту изготовителя, в обстановке без помех комплект SC3500 демонстрирует максимальную скорость передачи данных при прямой видимости до 50–65 Мбайт/с с использованием частотных диапазонов 2,4–2,4835 или 4,9–5,275 (5,15–5,875) ГГц.

В отсутствие прямой видимости скорость передачи данных SC3500 падает до 16 Мбайт/с, однако такой производительности линии связи достаточно, чтобы передавать в реальном времени 3D-изображение со стереоскопической видеокамеры высокой четкости. Кроме того, SC3500 поддерживает работу в составе мобильной Mesh-сети типа MANET, содержащей до 20 узлов ретрансляции.

Длительность используемого в SC3500 пакета COFDM составляет 200 или 50 нс, что обеспечивает полосу канала 5 или 20 МГц соответственно. При этом для каждой поднесущей в зависимости от помех адаптивно выбирается модуляция BPSK, QPSK либо 16-QAM и 64-QAM. Обработка сигналов предусматривает возможность реализации пространственного мультиплексирования данных



Рис.4. MIMO-репитер SC3500 фирмы Silvus Technologies

(Spatial Multiplexing), их пространственно-временного кодирования (Space-Time Coding), а также цифрового формирования лучей диаграммы направленности антенной решетки в режиме передачи по методу оптимального предварительного кодирования Eigen Beamforming [19] с соответствующим цифровым диаграммообразованием при приеме сигналов. Перечисленные информационные технологии, в отличие от традиционных средств связи, оснащенных единичной вибраторной антенной, позволяют [18]:

- в 10 раз снизить мощность передатчика при сохранении неизменной дальности действия и скорости передачи данных;
- в 2,5 раза увеличить дальность связи при прямой видимости и в 4,5 раза – в условиях плотной городской застройки;
- в три раза увеличить скорость передачи;
- обеспечить подавление сосредоточенной в пространстве помехи на 38 дБ.

Фирма Silvus Technologies выпускает также MIMO-репитер SC3800, отличающийся расширенным диапазоном рабочих частот (400–2400 МГц и 4–6 ГГц) с возможностью использования ширины каналов 1,25, 2,5, 5, 10 и 20 МГц [20].

Сигналы COFDM используются и британской фирмой Cobham (www.cobham.com) в тактических средствах передачи видеoinформации с борта UGV [21]. Комплект оборудования Messenger 2 Transmitter Enhanced (M2TE) позволяет передавать изображение формата 1080p (1920×1080) со скоростью 30 фреймов в секунду (FPS) на основе стандарта DVB-T с использованием двух или четырех тысяч поднесущих при полосе канала 6, 7, 8 МГц или 12, 14, 16 МГц соответственно, а также модуляции QPSK, 16-QAM и 64-QAM. При этом можно задействовать несущие частоты в диапазоне от 900 МГц до 7 ГГц.

В классе MIMO-решений заслуживает внимания продукция компании Nutaq (www.nutaq.com), выпускающей для UGV модули передачи данных с программно реконфигурируемой архитектурой на базе FPGA. В частности, мезонинные платы Radio420x стандарта FMC [21] обеспечивают построение радиолиний передачи по принципу MIMO-структуры 2×2 (два передатчика × два приемника) с шириной каналов от 1,5 до 28 МГц в диапазоне несущих от 300 МГц до 3 ГГц.

На примере продукции компании AValon RF (www.avalonrf.com) рассмотрим вариант классификации средств связи с UGV. Специалисты этой компании предлагают различать средства связи для условий прямой или частично прямой видимости (LOS или Partial LOS соответственно) и средства,

ориентированные на работу при отсутствии прямой видимости (Non-LOS). В классе устройств LOS и Partial LOS в зависимости от максимально достижимой дальности передачи видеопотоков выделяют средства:

- малой дальности (Short Range Wireless Links) – передача видеоданных до 10 миль;
- средней дальности (Medium Range Wireless Links) – до 20 миль;
- большой дальности (Long Range Wireless Links) – более 50 миль.

Отличительная особенность Non-LOS устройств – использование низкочастотных сигналов (VHF и low UHF), а также спутниковых каналов связи.

В феврале 2013 года в Афганистане была продемонстрирована возможность управления роботизированным аппаратом поддержки отделения SMSS (Squad Mission Support System) через спутниковый канал связи на расстоянии более 320 км [22]. В этом эксперименте использовался вариант SMSS, оснащенный телескопической мачтой с электронно-оптической системой и тепловизором, изображение с которых передавалось через спутник. Для управления SMSS использовался загруженный в бортовой компьютер маршрут движения,

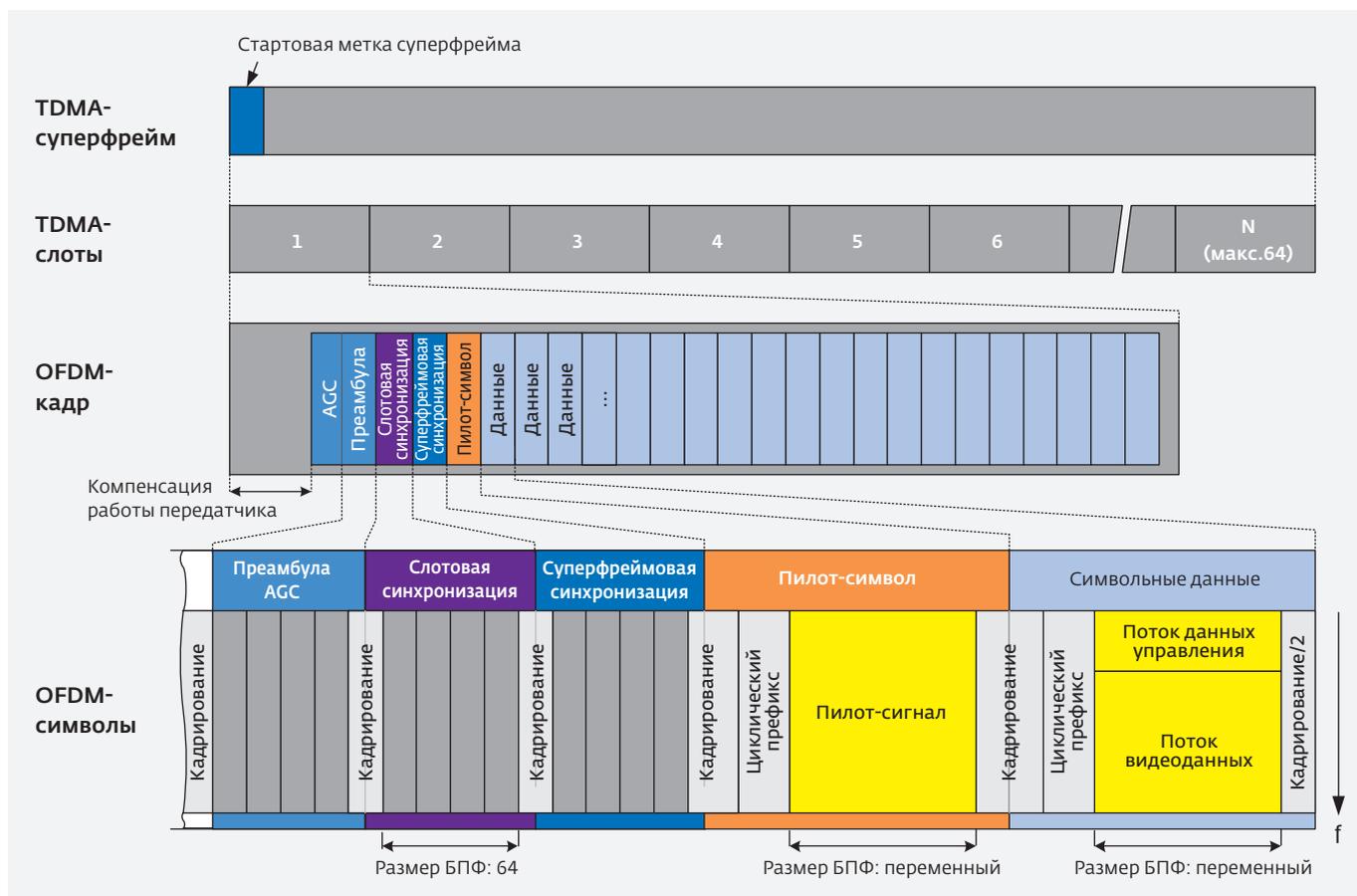


Рис.5. Вариант комбинации технологий TDMA и OFDM для реализации связи с множеством UGV. AGC – автоматическая регулировка усиления

который можно было корректировать через спутниковый канал связи. SMSS автоматически совершал действия, необходимые для выполнения боевой задачи, при этом вмешательство оператора было минимальным.

Применение сигналов OFDM в соответствии со стандартом 802.11a для связи в сети из нескольких UGV рекомендовано в [13, 23]. В соответствии с этим подходом в рамках первого этапа (Increment 1) программы АВСТМ предполагается оснащение SUCV средствами связи стандарта 802.11a. Как вариант рассматривается возможность использования оборудования SuperRange 4 фирмы Ubiquiti. Данная аппаратура обеспечивает скорость передачи до 54 Мбайт/с на частоте 4,9 ГГц. Для передатчика мощностью 400 мВт при выборе антенны с коэффициентом усиления 27 дБ в радиорелейном режиме дальность связи на открытой местности может достигать 1 км.

Для обеспечения связи с несколькими UGV подойдет решение на основе комбинации технологий TDMA и OFDM, предложенное в [23]. В нем используется структура информационных фреймов

на базе OFDM-сигналов, интегрированная в TDMA-слоты (рис.5). Примечательно, что переход к сигналам COFDM при достаточной кодовой базе позволяет отказаться от временного разделения каналов, необходимого в многопользовательском режиме применения OFDM.

Для обеспечения в системе UGV связи большой дальности достаточно перспективно использование стандартов семейства IEEE 802.16 WiMax, а также технологии LTE [23].

В то же время при решении задач обеспечения кооперации между UGV и беспилотными летательными аппаратами, выполняющими, например, роль ретрансляторов сигналов [23, 24], следует учитывать серьезное ограничение, накладываемое доплеровским сдвигом частоты на достижимую с помощью OFDM-сигналов пропускную способность каналов связи [22]. Для снижения негативного эффекта можно уменьшить длительность пакета OFDM и соответственно уменьшить количество информационных поднесущих, например, с 512 до 60 и даже 20 [23]. Однако при этом во столько

же раз снижается и скорость передачи данных. Поэтому более эффективным средством считается переход к использованию неортогонального частотного мультиплексирования сигналов (N-OFDM), предложенного в [25]. Это позволит учитывать значение амплитудно-частотных характеристик фильтров, синтезированных посредством операции быстрого преобразования Фурье, на частотах поднесущих, смещенных из-за эффекта Допплера.

Как и в случае с OFDM-сигналами, применение N-OFDM [14, 25] базируется на квадратурной амплитудной (QAM) или фазовой (PSK) модуляции поднесущих. Поэтому для снижения ошибок демодуляции на приемной стороне важным этапом является прецизионное расквадратурирование сигналов. Выполнение его в аналоговом виде требует идентичности характеристик (апертурного джиттера тактовых сигналов и коэффициентов передачи) квадратурных каналов АЦП [26]. В противном случае при обработке сигнального отклика серьезное влияние будут оказывать комплексно-сопряженные компоненты [26], наличие которых приведет к смещению оценок амплитудных составляющих. Применение АЦП в квадратурных каналах может сопровождаться сдвигом постоянной составляющей, что ухудшает отношение сигнал/шум и вносит фазовые погрешности, искажая сигнальное созвездие [27]. Без решения этой проблемы применение аналогового формирования квадратурных составляющих напряжений сигналов неэффективно. Указанный в [27] путь ее решения состоит в использовании низкой промежуточной частоты сигналов (несколько МГц) на этапе аналого-цифрового преобразования, последующего цифрового переноса частоты выходных отсчетов АЦП в полосу модуляции и цифровой низкочастотной фильтрации результирующих квадратурных откликов на выходе цифрового смесителя для устранения постоянного сдвига и уменьшения шумов. Однако применение низкой промежуточной частоты нежелательно в случае использования широкополосных сигналов OFDM с шириной канала 10 МГц и более.

С учетом указанных обстоятельств практический интерес может представлять применение бесквадратурной аналоговой обработки сигналов с последующим формированием квадратурных составляющих напряжений в цифровом виде на основе использования цифровых I/Q-демодуляторов, например, рассмотренных в [28].

Для создания каналов связи с UGV, по мнению зарубежных специалистов, можно использовать известные наработки, применяемые в БПЛА, адаптированные с учетом специфики среды

функционирования UGV. Речь идет, например, о стандартах НАТО STANAG 4609 Ed. 2, STANAG 7023, STANAG 4586 и др. [29]. Данный подход уместен, поскольку во многих сценариях боевого применения предусматривается совместное использование группировки UGV и БПЛА. При этом БПЛА обеспечивают функции ретрансляторов сигналов с UGV на пункты управления, находящиеся за пределами зоны прямой видимости.

Указанная общность подходов к обеспечению каналов связи с БПЛА и UGV является ключевым фактором, способствующим снижению стоимости соответствующего оборудования и расширению функциональных возможностей безэкипажных платформ различного назначения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Каляев И.А., Рубцов И.В.** Боевым роботам нужна программа. – Национальная оборона, 2012, № 8 (77), с. 34–48.
2. **Winnfield J.A. Jr., Kendall F.** Unmanned Systems Integrated Roadmap FY2011-2036. Washington, DC: U.S. Department of Defense, March 9, 2012. – www.defenseinnovationmarketplace.mil/resources/UnmannedSystemsIntegratedRoadmapFY2011.pdf.
3. **Singer P.W., Wright T.** New Rules of War. Big Bets and Black Swans. A Presidential Briefing Book. – Policy Recommendations for President Obama's Second Term by the Foreign Policy Scholars at Brookings. January 2013, p. 41–44. – www.brookings.edu/~media/research/files/papers/2013/1/big-bets-black-swans/big-bets-and-black-swans-a-presidential-briefing-book.pdf.
4. The Unmanned Ground Vehicles (UGV) Market 2012-2022. August 2012. – www.reportlinker.com/p0962713/The-Unmanned-Ground-Vehicles-UGV-Market-2012-2022.html#utm_source=prnewswire&utm_medium=pr&utm_campaign=Aerospace_and_Defense.
5. The Unmanned Ground Vehicles (UGV) Market 2010-2020. – www.reportlinker.com/p0254445-summary/The-Unmanned-Ground-Vehicles-UGV-Market-Military-Robots-for-EOD-Counter-IED.html.
6. **Clapper J.R., Jr., Young J.J., Jr., Cartwright J.E.** et al. Unmanned Systems Integrated Roadmap FY2009-2034. – Washington, DC: U.S. Department of Defense, April 6, 2007. – www.agriculturedefensecoalition.org/sites/default/files/file/drones_517/517X_4_2009_U.S._Department_of_Defense_UMS_Integrated_Roadmap_April_6_2009_Report.pdf.
7. National Defense Authorization, Act for Fiscal Year 2001. Sec. 220. Unmanned Advanced Capability Combat Aircraft and Ground Combat Vehicles. – Public Law 106-398. Oct. 30, 2000, p. 38. – www.gpo.gov/fdsys/pkg/PLAW-106publ398/pdf/PLAW-106publ398.pdf.

8. The Army Equipment Modernization Plan 2013. –www.bctmod.army.mil/news/pdf/2013%2520Army%2520Equipment%2520Modernization%2520Plan.pdf.
9. **Bedell B.** Small Ground Robot's Effectiveness and Acquisition Strategy. – Civilian Research Project. U.S. Army War College. 15 Jun. 2010. – www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a561210.pdf.
10. **Капустин С.Г., Дьяченко А.Л., Жуков В.А.** Комплекс для обработки и моделирования программно-технических средств распределенных информационно-управляющих систем мобильных роботов. – Материалы XX Международной научно-технической конференции "Экстремальная робототехника. Нано-, микро- и макророботы (ЭР-2009)" (28 сентября – 3 октября 2009 г., с. Дивноморское, Геленджик, Россия). Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009, с. 169–171. – URL: nashaucheba.ru/v50909/.
11. **Корольков Д.Н.** Пункт управления робототехническим комплексом. – Материалы XX Международной научно-технической конференции "Экстремальная робототехника. Нано- микро- и макророботы (ЭР-2009)" (28 сентября – 3 октября 2009 г., с. Дивноморское, Геленджик, Россия). Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009, с. 321–323. – URL: nashaucheba.ru/v50909/.
12. **Hunziker D., Gajamohan M., Waibel M., D'Andrea R.** Rapyuta: The RoboEarth Cloud Engine. – 2013. – URL: http://roboearth.org/wp-content/uploads/2014/05/ICRA13_0420_FI.pdf.
13. Technology Development for Army Unmanned Ground Vehicles. – The National Academies Press, Washington, D.C. – www.cs.umu.se/research/for/dl/SURVEYS%20AND%20STATUS%20REPORTS/Technology%20Development%20for%20Army%20Unmanned%20Ground%20Vehicles.pdf.
14. **Слюсар В.И.** Неортогональное частотное мультиплексирование (N-OFDM) сигналов. – Технологии и средства связи, 2013, № 5, с. 61–65; № 6, с. 60–65.
15. **Hilliard K.D., Barr T.** Design of a Radio Frequency Data Link for the Unmanned Ground Vehicle Technology Test Bed Demonstration Program. Technical Report RD-AS-94-23. – U.S. Army Missile Command. Redstone Arsenal, Alabama. September, 1994. – www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a284997.pdf.
16. United States Patent № 7633852 B2. Int. Cl. H04 J 11/00 (2006.01). Steven C. Brummette, Christopher True. Wireless control system for ground-mobile robotic vehicles. – Filed: Jun. 21, 2006. – Date of Patent: Dec. 15, 2009.
17. **Michaud A.E., Donaldson M.** Non-Line-of-Sight (NLOS) Communications – COFDM Field Testing Results. – Cobham Surveillance. –www.cobham.com/media/75929/NLOS%2520Comm_COFDM%2520field%2520test%2520results.pdf.
18. StreamCaster 3500 MIMO Radio – Dual Band. – <http://silvustechologies.com/products/streamcaster-radios/streamcaster-3500/>.
19. **Zhou S., Giannakis G.B.** Optimal Transmitter Eigen-Beamforming and Space-Time Block Coding Based on Channel Mean Feedback. – IEEE Transactions on Signal Processing, October 2002, v. 50, № 10, p. 2599–2613.
20. StreamCaster 3800 MIMO Radio – Expanded Frequency Options. – <http://silvustechologies.com/products/streamcaster-radios/streamcaster-3800/>.
21. **Слюсар В.И.** Встраиваемые компьютерные системы для жестких условий: стандарты VITA 65 и VITA 46. – Электроника: НТБ, 2010, № 6, с. 86–92.
22. **Богданов В.** США испытали уникального робота. – www.rg.ru/2013/03/05/robot-site.html.
23. **Blumm C., Heller C., Weigel R.** SDR OFDM Waveform Design for a UGV/UAV Communication Scenario. – Journal of Signal Processing Systems, 2012, v. 69, Issue 1, p. 11–21. – libgen.org/scimag3/10.1007/s11265-011-0640-8.pdf.
24. **Ge S. S., Wang G., Le Dong et al.** Intelligent autonomous information acquisition and scene understanding over large space. – Transaction on Wireless communication and Intelligent system. Online Publication, June 2011, p. 84–89. – www.engedu2.net/V2/CI-W22.pdf.
25. Патент Украины № 47835 А, МПК8 Н 04J 1/00, Н04L5/00. Способ частотного уплотнения узкополосных информационных каналов. Слюсар В.И., Смоляр В.Г. – Заявка № 2001106761; Заявлено 03.10.2001; Опубл. 15.07.2002, Бюл. № 7, 2002.
26. **Бондаренко М.В., Копиевская В.С., Слюсар В.И.** Комплексно-сопряженная компонента сигнала при неидентичности джиттера АЦП в квадратурных каналах фазового детектора с дополнительным стробированием. – 4-й Международный радиоэлектронный форум "Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития" (МРФ-2011). Том 1. Харьков, ХНУРЭ, 18–21 октября 2001.
27. **Руиз Р., Хеллвиг М.** Программный I/Q-интерфейс осциллографа R&S RTO – широкие возможности для анализа сигналов. – Электроника: НТБ, 2013, № 2, с. 102–112.
28. **Слюсар В.И., Малярчук М.В., Бондаренко М.В.** Методика синтеза I/Q-демодуляторов произвольной размерности. – III Міжнародний науково-технічний симпозіум "Нові технології в телекомунікаціях" (ДУИКТ-КАРПАТИ '2010, с. Вишків). Київ: Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій. 2–5 лютого 2010, с. 53–55.
29. **Слюсар В.И.** Передача данных с борта БПЛА: стандарты НАТО. – Электроника: НТБ, 2010, № 3, с. 80–86.