

## КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ, СИСТЕМЫ И ПРОГРАММЫ ИЗК

# ВЫСОКОТОЧНЫЕ БЕСПИЛОТНЫЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫЕ АППАРАТЫ — СЕГОДНЯ И ЗАВТРА

© 2019 г. П. Гецов<sup>1,2\*</sup>, Ст. Начев<sup>2</sup>, Ванг Бо<sup>1\*\*</sup>, Д. Зафиров<sup>2\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Технологический университет в Нинбо, Нинбо, Китай

<sup>2</sup>Институт космических исследований и технологий, Болгарская академия наук, София, Болгария

\*E-mail: director@space.bas.bg,

\*\*E-mail: bo305@hotmail.com

\*\*\* E-mail: zafirov@space.bas.bg

Поступила в редакцию 28.08.2018 г.

Описываются возможности повышения точности определения местоположения беспилотных летательных аппаратов. Сравняются возможности различных систем определения координат для достижения точности 2.5 см. Описываются способы передачи данных о коррекции координат. В заключение предполагается, что наиболее целесообразно использовать трансляцию по сети мобильных операторов в режиме реального времени для точного определения координат беспилотных летательных аппаратов.

**Ключевые слова:** ГНСС, GPS, ГЛОНАСС, Галилео, Бэйдоу, RTK, SBAS, Dragnet, UAV, SIM

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019184-91>

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время точность востребована во многих сферах и отраслях по всему миру, начиная от производства и заканчивая доставкой товара потребителю. К наиболее требовательным в плане точности отраслям можно отнести и сектор БПЛА (беспилотных летательных аппаратов или «дронов»), являющийся одновременно одним из самых высокотехнологичных секторов экономики и одним из самых быстрорастущих рынков в мире.

Точность производства, малые допуски узлов и максимально высокая точность позиционирования в полете — все это важные факторы, позволяющие снизить вес, увеличить продолжительность полета и в итоге повысить эффективность любых дронов, которые проектируются и производятся в текущий момент.

Говоря о «позиционировании» и «точности», необходимо выявить передовые современные технологии, которые бы удовлетворяли высоким требованиям к точности и управляемости при нормальном полете используемых сегодня дронов.

### ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ И ТОЧНОСТЬ ГНСС

Глобальная навигационная спутниковая система, также известная как «ГНСС», является одной из самых популярных независимых систем определения местоположения и навигации в мире. Изначально технология ГНСС предназначалась для военных целей, однако вскоре стала доступна для гражданского применения. На данный

момент ГНСС считается одной из самых надежных и низкочастотных навигационных технологий. ГНСС основана на системе взаимосвязанных спутников и доступна в любое время дня и ночи, 365 дней в году, чем и обусловлена ее надежность. Технология нашла применение в автомобильной и аэрокосмической промышленности, а также в сфере БПЛА.

На сегодняшний день существует несколько систем ГНСС: GPS (система глобального позиционирования — разработана в США), ГЛОНАСС (Глобальная навигационная спутниковая система — разработана в России), «Галилео» (разработана Европейским космическим агентством) и «Бэйдоу» (разработана в Китае). Ожидается, что системы «Галилео» и «Бэйдоу» будут полноценно функционировать по всему миру к 2020 году.

В основе всех существующих систем ГНСС лежит схожая технология, однако их точность и возможности по постобработке разнятся.

GPS способна обеспечить точность до 5–10 м в горизонтальной плоскости (7.8 м в горизонтальной плоскости с вероятностью 95%), точность ГЛОНАСС составляет 4.5–7.5 м, «Галилео» — 1 м в горизонтальной плоскости. ГНСС «Бэйдоу» является наименее точной и обеспечивает точность 10 м в горизонтальной плоскости. При этом точность в вертикальной плоскости у всех ГНСС намного ниже (около 15 м). Таким образом, технология ГНСС не обладает точностью, необходимой для осуществления взлета и посадки, что и послужило стимулом для поиска инновационной технологии,

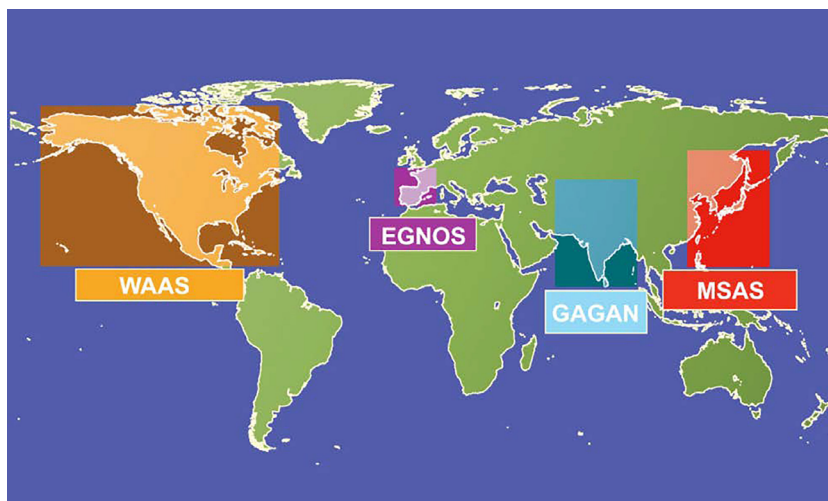


Рис. 1. Зона покрытия SBAS. Авторы выражают благодарность Образовательному фонду К.Ч. Вонга за поддержку.

способной повысить точность как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости. В любом случае, точность в горизонтальной плоскости можно существенно повысить, используя приемник, способный получать корректирующие сигналы от всех (или как минимум трех) ГНСС одновременно.

### ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ГНСС ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ

На рынке представлены несколько решений для повышения точности и обеспечения надежного, точного позиционирования — как военных, так и гражданских.

Строго говоря, существующие ГНСС способны обеспечить намного более высокую точность в горизонтальной плоскости (до 5–10 см), однако в интересах безопасности и рынка дополнительная поправка либо доступна только на платной основе (данные зашифрованы), либо недоступна для гражданских целей вовсе, и точность намеренно существенно занижается (с помощью *селективной доступности*). Технология, повышающая точность GPS, известна также как DGPS (*дифференциальная система глобального позиционирования*). В свою очередь, технология, повышающая точность при помощи DGPS, называется *спутниковой системой дифференциальной коррекции (SBAS)*.

Как правило, DGPS обеспечивает более высокую точность (до 20 см), используя сеть стационарных наземных опорных станций по всему миру, также известных как *станции DGPS*. Эти станции объединены в следующие системы: *европейская геостационарная служба навигационного покрытия (EGNOS)* в Европе, *широкозонная усиливающая система (WAAS)* в Северной и Центральной Америке, *многофункциональная система дополнения*

*спутникового базирования (MSAS)* в Японии и Малайзии и *спутниковая система дифференциальных поправок (GAGAN)* в Индии (рис. 1).

Технология SBAS основана на перерасчете разницы погрешности между реальным и расчетным местоположением в реальном времени. В результате перерасчетов формируются дополнительные сообщения, которые накладываются на исходные сообщения ГНСС. Затем дополнительный корректирующий сигнал (корректирующее сообщение) передается на геостационарный спутник, откуда поступает на приемник ГНСС дрона — «ровер» (рис. 2), обеспечивая таким образом более высокую точность позиционирования.

Необходимо отметить, что данная технология не способна обеспечить постоянную точность 20 см из-за накапливаемой за время полета погрешности, в результате чего точность DGPS падает с 20 см до 1 м. Существуют также другие системы SBAS — например, RTX CenterPoint от компании Trimble, обеспечивающая точность 3.8 см, или системы на основе принципа *«кинематики реального времени» (RTK)*, достигающие точности 2.5 см. Тем не менее все эти системы также относятся к SBAS, а основное различие между ними сводится к точности *от прохода к проходу* (текущая точность позиционирования) и *от года к году* (воспроизводимая точность). Уровень точности при использовании различных корректирующих технологий наглядно показан на рис. 3.

Технология RTK основана на тех же принципах, что и системы SBAS, и на текущий момент является одним из наиболее доступных решений. RTK входит в число самых широко распространенных технологий корректировки в мире и применяется, когда необходима максимальная точность

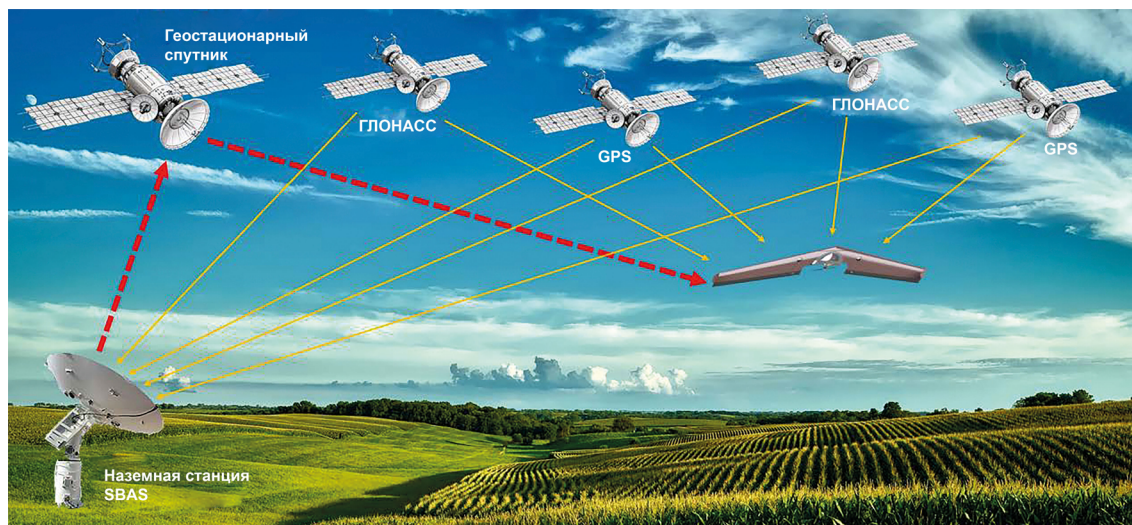


Рис. 2. Принцип работы SBAS (служебный документ компании Aero Vision Ltd).

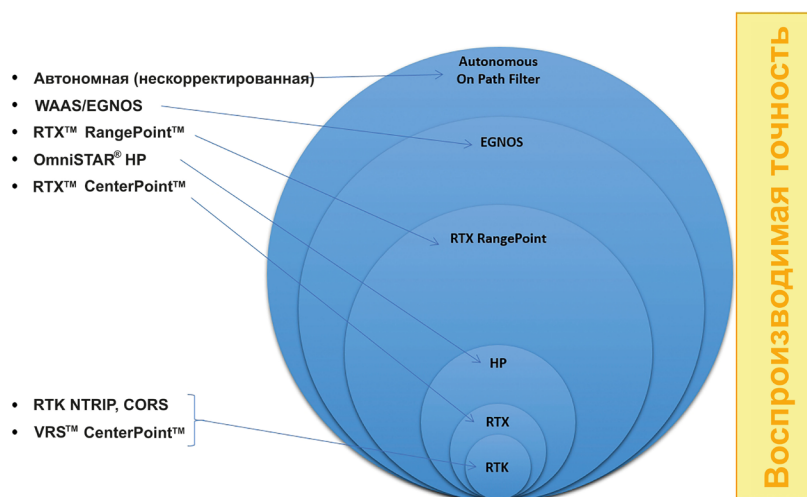


Рис. 3. График уровня воспроизводимой точности при использовании различных корректирующих технологий (служебный документ компании CNH Industrial).

в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Несмотря на то, что в основе всех систем SBAS лежит один и тот же принцип, корректирующие сообщения генерируются и передаются на ровер (приемник ГНСС) немного по-разному.

Основное различие между технологиями SBAS и RTK кроется в системе расчетов. Принцип работы технологии RTK заключается в использовании одного базового стационарного приемника и нескольких передвижных приемников (роверов). Стационарный приемник ретранслирует одну фазу несущего сигнала, полученного от группировки ГНСС, в то время как передвижные приемники (роверы) сравнивают собственные фазовые измерения с данными, полученными от базового приемника. В результате местоположение пересчитывается с точностью менее сантиметра

(принцип работы технологии RTK представлен на рис. 4).

Коммуникация между базовой станцией RTK и ровером может осуществляться разными способами — например, по прямой радиосвязи. Этот метод обеспечивает передачу сигнала в радиусе около 10 км между базовой станцией и ровером. Протоколы связи также могут различаться, так как оборудование для RTK изготавливается множеством производителей. Среди самых распространенных протоколов можно выделить *CMR/CMR+* (собственность Trimble), *NMEA* (открытый протокол), *RINEX/BINEX* (открытые протоколы для передачи необработанных данных), *RTCM 2/3* (Радиотехническая комиссия морских сервисов) и *NTRIP* (сетевая передача RTCM через Интернет).

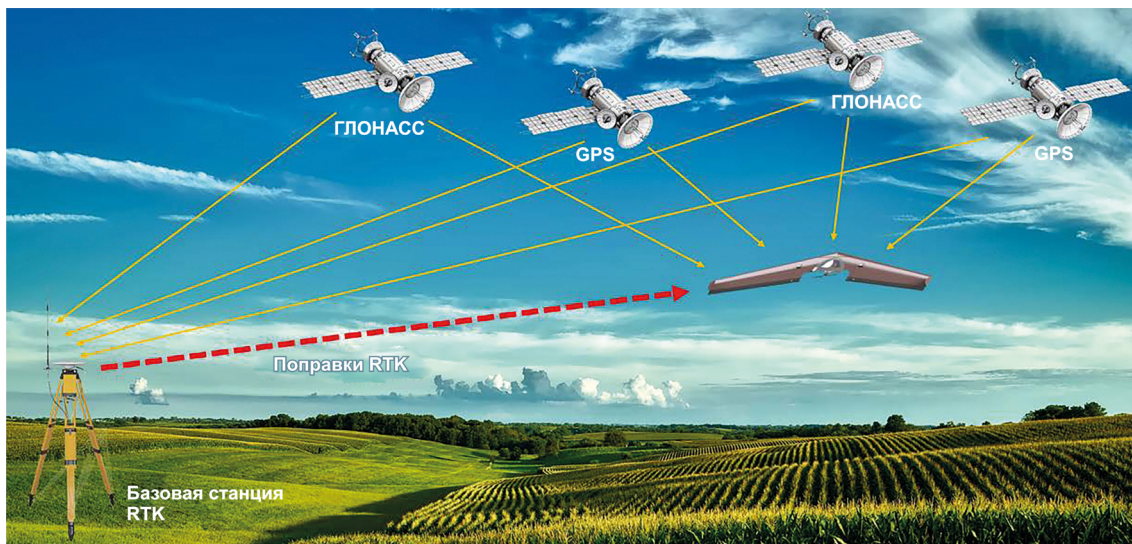


Рис. 4. Поправки RTK, передаваемые по прямой радиосвязи через базовую станцию (служебный документ компании Aero Vision Ltd)

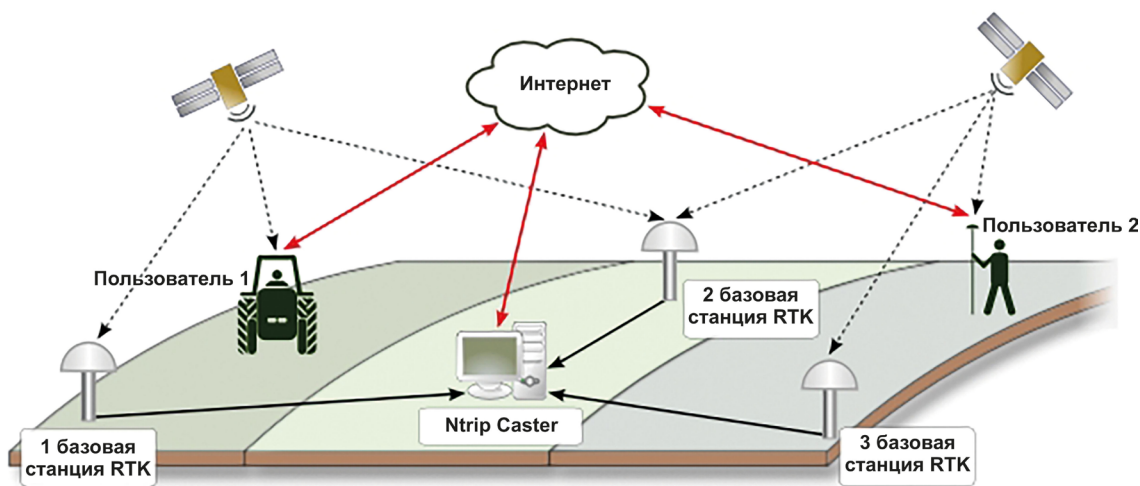


Рис. 5. Принцип работы сети NTRIP (технология компании Alberding GmbH).

Данные по протоколам CMR и CMR+ передаются преимущественно по прямой радиосвязи, а протоколы RTCM и NTRIP позволяют без труда передавать данные через Интернет по локальной сети, WiFi или сотовой сети местного оператора мобильной связи. Сегодня протокол NTRIP широко используется при подключении нескольких станций: таким образом данные, полученные от связанных станций, проходят последующую обработку на сервере NTRIP, благодаря чему станции функционируют как единая система, а не как отдельные базовые станции. Технологию позиционирования RTK также называют «опорными станциями непрерывного действия» (CORS). Преимущество системы CORS заключается в том, что при подключении нескольких станций к серверу данные

проходят постобработку одновременно, обеспечивая более высокую точность позиционирования и увеличенный радиус действия — более 100 км между двумя станциями. Кроме того, при отключении одной из базовых станций сервер NTRIP способен интерполировать возможную погрешность и компенсировать потерю станции. Точность при этом немного пострадает, однако зона покрытия сети останется прежней (рис. 5).

Сети на основе NTRIP — самый распространенный формат поправок RTK в мире. При дальнейшем развитии, повышении надежности и расширении зоны покрытия мобильных сетей и сетей GSM технологию NTRIP в ближайшие 10 лет можно будет использовать для самых разных целей — от военной промышленности до любительских дронов.



Рис. 6. Here + RTK, RTK-решение для автопилота Pixhawk 2 (служебный документ Here+).

### СВЯЗЬ, ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ И ИНТЕГРАЦИЯ БПЛА

Возможности для высокоточного определения местоположения БПЛА достаточно ограничены. Причиной этому служит внушительная стоимость разработки высокоточных сервисов, а также ограничения по максимальной взлетной массе БПЛА.

На текущий момент (3-й квартал 2017 г.) доступно не так много решений, предназначенных непосредственно для БПЛА. Среди самых распространенных из них можно выделить следующие:

**Piksi RTK (разработка Swift Nav)** — Компания Swift Nav предлагает одно из самых доступных RTK-решений для БПЛА. Данные электронные модули используют прямую радиосвязь RTK с одной базовой станцией. Подобное решение дает пользователю возможность установить базовую станцию RTK практически где угодно и обеспечивая высокую точность без ущерба автономности позиционирования.

**Here + RTK (разработка Hex Aero)** — Here + RTK, предназначенный специально для автопилота Pixhawk, сочетает в себе оборудование и программное обеспечение с открытым исходным кодом. Это решение также основано на использовании одной базовой станции RTK и прямой радиосвязи. Главным его преимуществом является открытое программное обеспечение, позволяющее с легкостью задавать настройки для нескольких автопилотов и полетных контроллеров, представленных на рынке, а также его низкая стоимость при относительно высоком качестве (рис. 6).

**DJI D-RTK** — Решение от DJI во многом схоже с вышеперечисленными системами. Основным отличием продукта DJI можно считать полностью интегрированное программно-аппаратное обеспечение и крайне удобный пользовательский интерфейс для подготовки устройств DJI к работе и их настройки. Все это делает продукты DJI надежными и простыми в использовании, что привлекает внимание энтузиастов и профессионалов со всего мира.

Выше приведены лишь несколько примеров доступных на сегодняшний день высокоточных решений для БПЛА. При этом все они обладают примерно одинаковыми недостатками: малой зоной покрытия сигнала (до 10 км), неподтвержденной надежностью (из-за радиосвязи) и непригодностью для использования в городских условиях и полетов на малой высоте на расстоянии более 2–3 км от базовой станции.

### ИНТЕГРАЦИЯ И РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОГРАММЫ DRAGNET

Недостатки существующих систем RTK, основанных на радиосвязи, определили требования, сформулированные Управлением перспективных исследовательских проектов Министерства обороны США (DARPA) в документе DARPA-BAA-16-55. DARPA заинтересовано в инновационных исследованиях, направленных на организацию постоянного, всеохватного наблюдения за беспилотными авиационными системами (БАС) в городских условиях. В частности, предлагается создать масштабируемую сеть датчиков на воздушных носителях для обнаружения, классификации и отслеживания БПЛА посредством осмотра сложного ландшафта в рамках проекта *Aerial Dragnet* по созданию системы защиты от БАС. (Служебный документ DARPA-BAA-16-55).

В основе концепции *Aerial Dragnet* лежит система наблюдения, состоящая из одного или нескольких датчиков, закрепленных на воздушном носителе. Система включает алгоритмы для обнаружения, отслеживания и классификации малогабаритных БАС в городских условиях. Процессор, производящий вычисления в реальном времени, может размещаться непосредственно на летательном аппарате или на земле с подключением по высокоскоростному каналу передачи данных.

Потенциальным исполнителям проекта предлагается разместить свою систему наблюдения на выбранном ими самими постоянном воздушном носителе на высоте не более 300 м. Таким образом, высокая точность и надежность позиционирования являются обязательными условиями. Рассмотрев недостатки позиционирования при использовании технологии коррективки RTK на основе прямой радиосвязи, можно сделать вывод о том, что наиболее подходящей технологией позиционирования является NTRIP, которая обеспечивает наивысшую точность 95% времени (при средней точности 2.5 см 100% времени). Помимо использования NTRIP также возможно сочетание единого канала связи и передачи данных в рамках одного технологического решения с функцией передачи корректирующих сигналов.

### СВЯЗЬ, ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ И КАНАЛ СВЯЗИ DRAGNET

В основе концепции *Aerial Dragnet* лежит технология многоуровневой связи, анализа и управления, использующая БПЛА в качестве инструмента для защиты воздушного пространства в городских условиях при *нарушении* дронами границ охраняемых территорий.

Данная концепция подразумевает многоуровневое управление БПЛА с зоной покрытия от 20 до 180 км<sup>2</sup>. Приоритетной задачей является расширение зоны действия сети *Dragnet* и обеспечение высокой продолжительности и безопасности полета в черте города и на территории "умных городов".

Для того, чтобы охватить область размером с городской район минимальным количеством платформ, условный единый узел наблюдения должен обеспечивать зону покрытия с поддержкой распространения общей оперативной обстановки (ООО) среди небольшого числа пользователей на площади 20 км<sup>2</sup>.

Таким образом, общегородская сетевая структура должна обеспечивать зону покрытия с поддержкой распространения ООО среди большого числа пользователей на площади 180 км<sup>2</sup>.

Добиться этого можно при помощи нескольких БПЛА (так называемых «*локальных БПЛА*»), одновременно выполняющих разные задачи и передающие данные *главному БПЛА*, который, в свою очередь, анализирует полученную от *локальных БПЛА* информацию и обменивается отсортированными данными с *Центром управления* (рис. 7).

Другими словами, система включает следующие компоненты:

- *районные системы БПЛА*;
- *городской БПЛА*;
- *специализированные БПЛА*;
- *наземная станция обслуживания БПЛА*;
- *наземная станция управления (НСУ)*.

В информационном потоке участвуют следующие типы данных:

- *поправочные данные* — корректирующий сигнал для обеспечения наивысшей точности позиционирования (данные NTRIP) — отметки 2 и 4 на рис. 7;
- *информационные данные* — информация, полученная от *районных БПЛА* и *городского БПЛА* — отметки 1, 2, 3 и 4 на рис. 7;
- *данные обнаружения и предотвращения столкновений в воздухе* — данные о местоположении, высоте, направлении и скорости движения, передаваемые всем районным БПЛА и центру управления и обработки данных (наземная станция управления и центр обработки данных).

*Районные БПЛА* должны иметь возможность сканировать участок площадью 20 км<sup>2</sup> и осуществлять связь друг с другом по зашифрованному и защищенному каналу прямой радиосвязи, способному обеспечить надежную связь на расстоянии не менее 2–5 км в городских условиях. Вся информация затем передается по прямой радиосвязи *городскому БПЛА*, который записывает и анализирует все данные, полученные от *районных БПЛА*. Учитывая большое расстояние между *районными БПЛА*, для установления связи между ними необходимо использовать вышку оператора мобильной связи. На основе данных

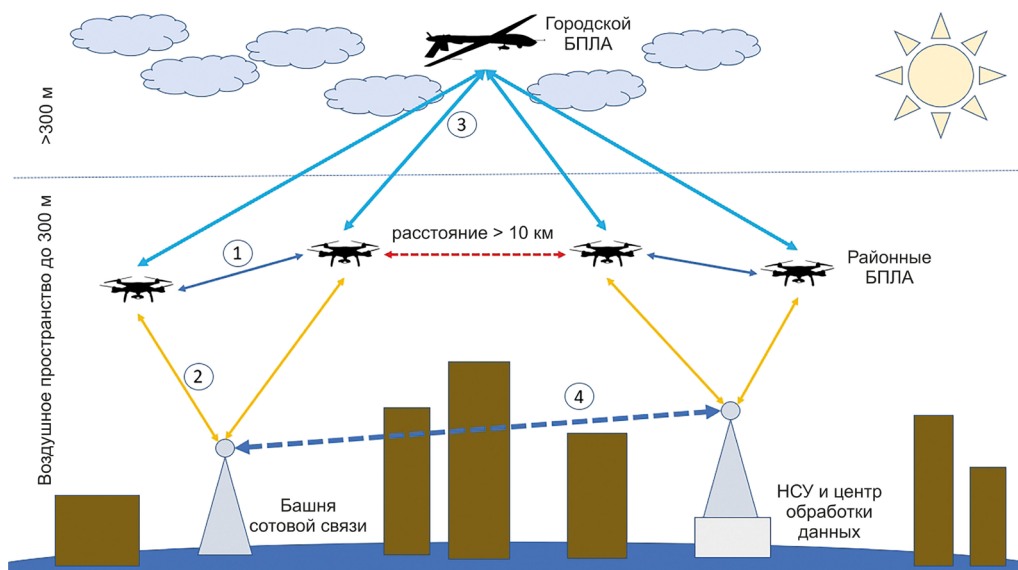


Рис. 7. Принцип работы системы управления и обмена информацией (концепция компании Aero Vision Ltd).



Рис. 8. Система обнаружения и предотвращения столкновений на малых высотах (LATAS).

НСУ о местоположении (NTRIP) корректирующий сигнал передается каждому *районному БПЛА* и обрабатывается. Благодаря этому каждому кадру отснятого видео и каждой сделанной фотографии присваивается геометка с максимальной высокой точностью позиционирования. В результате любой нарушитель воздушного пространства обнаруживается быстро и точно. Кроме того, высокая точность позиционирования позволяет четко и безопасно управлять *районными БПЛА* в городских условиях, а также обеспечивает меньшее энергопотребление и большую длительность полета по сравнению с обычным GPS-позиционированием.

Использование вышек сотовой связи для передачи данных увеличивает дальность передачи в пределах зоны покрытия сети мобильного оператора, в городских условиях являющейся практически безграничной. Вышеописанный способ передачи данных предлагает быстрое, точное и полностью интегрированное решение, тем самым снижая вес дополнительного оборудования *городского БПЛА* и *районных БПЛА*, представленного модемом с одной SIM-картой, позволяющим:

- передавать данные с датчиков — видеокadres, фотографии, лидарные изображения; изображения RGB/NDVI/NIR и т.д.;
- осуществлять корректировку точности, позиционирование и управление — позиционирование NTRIP с абсолютной точностью 2.5 см, присвоение геометок изображениям и кадрам;
- передавать *данные обнаружения и предотвращения столкновений* — эти данные содержат исчерпывающую информацию о местоположении

БПЛА, используемых сетью Dragnet, повышая безопасность и оптимизируя управление каждым отдельно взятым БПЛА.

*Данные обнаружения и предотвращения столкновений* представлены на рис. 8.

*Система обнаружения и предотвращения столкновений на малых высотах (LATAS)*, разработанная компанией PrecisionHawk, призвана повысить безопасность, используя сотовую сеть оператора мобильной связи с ее запасом мощности и высочайшим уровнем безопасности. Система LATAS от PrecisionHawk работает подобно радиопередатчикам обычных летательных аппаратов, передавая свое местоположение наземной станции управления и другим летательным аппаратам/БПЛА поблизости. В конечном итоге система LATAS способна обеспечить высокий уровень безопасности при эксплуатации БАС, помочь операторам в планировании полетов и сократить время предполетной подготовки. Учитывая возросшие требования к безопасности и новые правила, устанавливаемые повсеместно, в ближайшие годы эта система наверняка станет обязательной.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование модема с SIM-картой на каждом БПЛА дает множество преимуществ по сравнению с любой другой технологией передачи данных и связи во время полета, а именно:

- полная интеграция — один узел отвечает за связь, управление и позиционирование;
- малые габариты и вес — благодаря замене нескольких узлов одним;

— низкое энергопотребление, обусловленное SIM-модулем — на уровне среднего мобильного телефона;

— низкая задержка — менее секунды в радиусе 360 км между башнями сотовой связи;

— практически неограниченный охват — в пределах зоны покрытия мобильной сети;

— большой запас мощности — возможность использования нескольких SIM-карт для работы с разными провайдерами связи;

— полный контроль над БПЛА;

— передача нескольких типов данных — поддерживаются все необходимые типы данных, в том числе:

- данные о местоположение с точностью класса RTK (фазовые измерения);
- данные LATAS;
- данные, поступающие от бортовых датчиков;
- протокол управления БПЛА и план полета с возможностью загрузки/обновления неопосредственно во время полета.

В качестве заключения можно отметить, что описанная система представляется технологией нового поколения, которая окажет большое влияние на точность позиционирования и процесс передачи данных во время полета любому БПЛА в конкретной области, и именно на этом будут сосредоточены все будущие нормативные положения, касающиеся использования БПЛА в черте города.

**Благодарности.** Данное исследование проводилось на базе следующих проектов:

1. Проект BG161PO003—1.2.04—0053 “Информационный комплекс для аэрокосмического контроля за состоянием окружающей среды” (IKAMOS), финансируемый из средств оперативной программы “Повышение конкурентоспособности экономики Болгарии 2007—2013”, Европейского фонда регионального развития и национального бюджета Болгарской республики.

2. Проект “Укрепление и расширение Ведомства по передаче аэрокосмических технологий в области охраны здоровья граждан в случае чрезвычайных ситуаций” — BG161PO003—1.2.02 в рамках оперативной программы “Повышение конкурентоспособности экономики Болгарии 2007—2013”.

Авторы выражают благодарность Образовательному фонду К.Ч. Вонга за поддержку.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Low Altitude Tracking and Avoidance System (LATAS). Courtesy of Aero Vision ([www.aero-vision.net](http://www.aero-vision.net))

Courtesy of CNH Industrial (<http://www.cnhindustrial.com/en-us/Pages/homepage.aspx>)

Courtesy of Interagri Bulgaria JSC (<http://www.interagri.bg/>)

Courtesy of Precision Hawk (<http://www.precisionhawk.com/latas>)

Trimble Positioning Services ([http://www.trimble.com/positioning-services/pdf/whitepaper\\_rtx\\_fast.pdf](http://www.trimble.com/positioning-services/pdf/whitepaper_rtx_fast.pdf))

18th International Technical Meeting report ([http://www.geopp.com/pdf/ion2005\\_fw.pdf](http://www.geopp.com/pdf/ion2005_fw.pdf))

3DR Robotics (<https://3dr.com>)

### Precision Drones — Today and Tomorrow

P. Getsov<sup>1, 2\*</sup>, St. Nachev<sup>2</sup>, Wang Bo<sup>1\*\*</sup>, D. Zafirov<sup>2\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>*Ningbo University of Technology, Ningbo, China*

<sup>2</sup>*Space Research and Technology Institute, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria*

\**E-mail: director@space.bas.bg,*

\*\**E-mail: bo305@hotmail.com*

\*\*\**E-mail: zafirov@space.bas.bg*

Described are the possibilities for increasing accuracy in determining the location of unmanned aircraft. Compared are the capabilities of different coordinate systems to increased the accuracy to 2.5 cm. The methods for transmitting coordinate correlation data are described. In conclusion, it is assumed that for the accurate determination of the coordinates of mobile objects it is most appropriate to use the transmission of Real Time Kinematics corrections by network of a mobile operator.

**Keywords:** GNSS, GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, RTK, SBAS, Drognet, UAV, SIM

#### REFERENCES

Low Altitude Tracking and Avoidance System (LATAS). Courtesy of Aero Vision ([www.aero-vision.net](http://www.aero-vision.net))

Courtesy of CNH Industrial (<http://www.cnhindustrial.com/en-us/Pages/homepage.aspx>)

Courtesy of Interagri Bulgaria JSC (<http://www.interagri.bg/>)

Courtesy of Precision Hawk (<http://www.precisionhawk.com/latas>)

Trimble Positioning Services ([http://www.trimble.com/positioning-services/pdf/whitepaper\\_rtx\\_fast.pdf](http://www.trimble.com/positioning-services/pdf/whitepaper_rtx_fast.pdf))

18th International Technical Meeting report ([http://www.geopp.com/pdf/ion2005\\_fw.pdf](http://www.geopp.com/pdf/ion2005_fw.pdf))

3DR Robotics (<https://3dr.com>)