

ТРАНСПОРТ

05.22.01 – Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте;

05.22.08 – Управление процессами перевозок;

05.22.13 – Навигация и управление воздушным движением;

05.22.14 – Эксплуатация воздушного транспорта

УДК 621.396.96

DOI: 10.26467/2079-0619-2021-24-2-70-92

КЛЮЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СВЯЗИ ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ГРАЖДАНСКИХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ (ОБЗОР ЗАРУБЕЖНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ)

Е.А. ВИНОГРАДОВ¹

¹Католический университет Левена, г. Левен, Бельгия

Ожидается, что к 2035 году в Российском небе будут одновременно находиться не менее ста тысяч беспилотных летательных аппаратов (БЛА). Такая численность флота БЛА делает необходимым создание систем информационной поддержки, контроля и управления полетами БЛА (англ. Unmanned Aircraft System Traffic Management – UTM), подобных той, что уже существует для пилотной авиации. Проблемы, возникающие перед авиационным сообществом, не могут быть решены без помощи беспроводной связи. Целями данной статьи являются ознакомление специалистов связи с последними достижениями гражданской беспилотной авиации и описание проблем телекоммуникационного характера, стоящих перед разработчиками масштабных систем управления БЛА. Представлены архитектура и главные функции систем UTM, а также примеры их практической реализации. Особое внимание уделено повышению безопасности полетов путем рационального выбора технологий связи для осуществления управления конфликтными ситуациями (также известного как «избежание столкновений»). Проанализирована практичность применения широкого спектра беспроводных технологий: от Wi-Fi и автоматического зависимого наблюдения радиовещательного типа (АЗН-В) до сотовых сетей пятого поколения 5G, а также бессотовых сетей (англ. cell-free), являющихся кандидатами для создания сетей связи шестого поколения 6G. В результате проведенного анализа сформирован список перспективных направлений исследований на стыке областей беспроводной связи и гражданской беспилотной авиации.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, организация воздушного движения, управление конфликтными ситуациями, беспроводная связь, 5G, ИКАО.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно докладу Mordor Intelligence¹ мировой рынок гражданских беспилотных летательных аппаратов (БПЛА или БЛА, также известных как «дроны») составляет около 23 млрд долларов в 2020 году и достигнет 48 млрд долларов к 2025 году. Согласно дорожной карте «Аэронет»² в России к 2035 году должен появиться рынок информационных и логистических услуг, предоставляемых флотом беспилотников, объемом 35–40 млрд рублей. Более того, планируется, что над территорией Российской Федерации к 2035 году постоянно (в режиме 24/7/365) могут находиться не менее 100 000 БЛА. Эти цифры могут казаться впечатляющими, но есть вероятность того, что они несколько преуменьшают реальный потенциал этой техноло-

¹ Drones market – growth, trends, and forecasts (2020–2025) [Электронный ресурс] // Mordor Intelligence. 2020. URL: https://www.reportlinker.com/p05881491/Drones-Market-Growth-Trends-and-Forecast.html?utm_source=GNW (дата обращения: 10.11.2020).

² План мероприятий «Аэронет» Национальной технологической инициативы. Приложение № 2 к протоколу заседания президиума Совета при Президенте Российской Федерации по модернизации экономики и инновационному развитию России.

гии. Авторы [1] предположили, что в Париже к 2035 году может понадобиться около 180 000 полетов в час (и это только дронов-доставщиков). В среднем это означает 63 БЛА на квадратный километр. Мне кажется, что эти оценки завышены, но в любом случае такое количество дронов в воздухе ставит очень сложные задачи перед инженерами и конструкторами.

Стоит отметить, что внедрение дронов даже сейчас сталкивается с очень серьезными проблемами как в технической, так и регуляторной области. Более того, общественное мнение является серьезным фактором, влияющим на правила эксплуатации, а следовательно, и на экономический потенциал таких решений [2–4]. В то время как в некоторых странах (развивающихся в основном) дроны воспринимаются как «факторы, меняющие правила игры» и «способствующие развитию» [5], в других частях мира общественность скорее обеспокоена проблемами безопасности и защиты персональных данных, связанными с использованием БЛА [2]. Слабо отслеживаемое использование дронов вызывает тревогу органов охраны правопорядка. Кроме того, на данный момент не совсем понятно, как повсеместное применение дронов повлияет на действующие комплексы организации воздушного движения (ОрВД). Таким образом, можно сказать, что первоочередной задачей является обеспечение безопасной эксплуатации БЛА, что позитивно отразится на общественном мнении, регуляторных практиках и на экономической привлекательности решений на основе дронов. Первоочередной задачей на данный момент является разработка правил движения БЛА в воздушном пространстве и технологий, которые бы помогли эти правила соблюдать.

Национальные и международные регуляторные органы (например, Европейское агентство авиационной безопасности – EASA, Международная организация гражданской авиации – ICAO/ИКАО и т. д.) создали комитеты, занимающиеся разработкой и усовершенствованием стандартов полетов БЛА и правил пользования ими. Так, ИКАО опубликовала рамочный документ UTM³ (англ. Unmanned Aircraft System Traffic Management), где описываются обобщенные принципы и задачи Систем организации воздушного движения беспилотных судов (ОрВДБС), также называемых в отечественной литературе системами информационного обеспечения полетов БЛА. Здесь мы предлагаем использовать короткое сокращение УТБ (управление трафиком БЛА) как русскоязычный и созвучный аналог UTM. Хотелось бы отметить, что особое внимание в документе ИКАО уделено беспроводной связи и управлению конфликтными ситуациями (УКС).

Разработка систем УТБ является общепризнанной необходимостью. Этим заняты не только государственные ведомства (например, Национальное управление по авионавигации и исследованию космического пространства – NASA), крупные международные рамочные проекты (такие как Single European Sky ATM Research-SESAR) и крупные технологические корпорации (Amazon, Google, DJI и т. д.), но и малые компании, нацеленные на организацию движения в пределах отдельных муниципалитетов, промышленных или портовых зон (например, в Антверпене, Сингапуре и Роттердаме). В работе [6] подчеркивается необходимость создания четких правил пользования дронами на территории Российской Федерации. В декабре 2020 года АО «АСТРА» продемонстрировало макет системы RUTM (R – значит «российский»)⁴, хотя эта демонстрация и осуществление проекта вызывают некоторый скептицизм у членов Ассоциации эксплуатантов и разработчиков беспилотных авиационных систем (Аэронет). Однако стоит отметить, что у этих двух компаний есть явный конфликт интересов. Я скорее разделяю эти опасения: на данный момент нам не удалось осуществить экспертную оценку из-за отсутствия опубликованной документации. С другой стороны, ФГБУ «Защитаинфотранс Минтранса РФ» в ноябре 2020 года получило 52 млн рублей (в 10 раз меньше, чем бюджет RUTM) на создание «облика системы информационного обеспечения полетов беспилотных воздушных судов в РФ на основе

³ UTM – A Common framework with core boundaries for global harmonization [Электронный ресурс] // ICAO, 3rd ed. 2020. 45 с. URL: <https://www.icao.int/safety/UA/Documents/UTM%20Framework%20Edition%203.pdf> (дата обращения: 10.11.2020).

⁴ Проект RUTM отчитался о промежуточных результатах на пути интеграции ВБС [Электронный ресурс] // Аэронет. 2020. URL: https://aeronext.aero/press_room/news/201237189 (дата обращения: 10.11.2020).

технологий ГЛОНАСС и мультилатерации». Эта система будет направлена на обеспечение внедрения беспилотных судов в воздушное пространство страны⁵. Нельзя не приветствовать диверсификацию усилий по разработке систем УТБ, однако хотелось бы большей прозрачности выполнения проектов и наличия инструментов общественного контроля за их выполнением.

Как и любое сложное техническое решение, системы наподобие RUTM являются плодом работы большого числа специалистов в различных областях. Эта область науки и техники очень динамична и поставляет огромное количество интересных вызовов и проблем. В этой статье мы ограничимся проблемами осуществления беспроводной связи с БЛА, которая является сердцем систем информационного обеспечения полетов. Хотелось бы особо подчеркнуть необходимость установления междисциплинарной терминологии для упрощения коммуникации между экспертами в областях управления, авиации и телекоммуникаций [7].

Интерес к теме БЛА и связи с ними довольно широк. Результатом этого интереса стало огромное количество статей, опубликованных в отечественных и зарубежных источниках. Можно отметить англоязычные работы [8–13], предлагающие отличные обзоры нескольких сотен академических статей, и ставшие источником материала для тысяч публикаций, процитировавших эти обзоры. В русскоязычной литературе таких статей гораздо меньше. Можно отметить публикацию 2016 года [14], где авторы весьма точно предсказали направления развития связи с БЛА на последующие несколько лет, однако данная область динамична настолько, что эта работа уже теряет актуальность. Считаю, заслуживает внимания свежая статья [15], где авторы представляют свой взгляд на подход к созданию систем связи и управления БЛА. Техническая часть работы не вызывает вопросов, но в глаза бросается отсутствие учета новейших достижений в области гражданской авиации. Достаточно сложно использовать предложенные решения для удовлетворения нужд систем УТБ, описанных ИКАО в документе, упомянутом ранее. К сожалению, подобное можно сказать и о других документах [8–14].

Интерес к связи с БЛА в научно-техническом сообществе огромен, что выражается в тысячах статей. Однако мне представляется контрпродуктивным подход, в котором игнорируются принципы организации движения дронов. Это напрямую влияет на требования к сетям связи: к их архитектуре, интерфейсам, зонам покрытия, скорости передачи данных и так далее. Другими словами, технологии и системы связи имеют шанс на практическое применение только в том случае, если они опираются на знания, достижения и требования, предъявляемые авиационными экспертами. Мы должны говорить на одном языке, чтобы избежать путаницы, часто наблюдаемой в литературе, посвященной различным телекоммуникационным составляющим технических решений на основе БЛА, и систем УТБ в частности.

Другой проблемой разработок решений на основе дронов является их военная предыстория. Авторы [16] показывают, что до сих пор разработки решений для гражданской беспилотной авиации наследуют черты, присущие военному контексту, что негативно влияет: 1) на общественное мнение; 2) на соответствие технических решений требованиям к гражданским дронам; 3) на экономический потенциал технологии; 4) на этические, философские и социальные аспекты развития этой области. Несложно заметить, что значительная часть статей и книг, опубликованных на русском языке, посвящена применению БЛА в военном деле (например, самые цитируемые книги на эту тематику [17–19]). По моему глубокому убеждению, милитаризация этой области знания является тормозом развития очень перспективной сферы экономики. Хотелось бы подчеркнуть, что это влияние заключается не в разработке военных решений как таковых, а в попытке использовать те же подходы и методы для гражданской авиации, которая невообразимо сильно отличается от военной по целям использования, требованиям к инфраструктуре и системам связи. По отношению к безопасности людей на земле, в конце концов.

⁵ Потому, потому что беспилоты: Воздушные суда разных типов уравнивают в пространстве [Электронный ресурс] // Газета Коммерсантъ. 16.11.2020. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/4573976> (дата обращения: 18.11.2020).

В данной статье представлен обзор зарубежной литературы, которая необходима для понимания того, что собой представляют системы УТБ. Кроме того, доступно описывается одна из самых главных функций систем УТБ: разрешение конфликтных ситуаций (часто ошибочно называемое «предупреждением столкновений»). Далее произведен анализ возможности применения (прямого или после некоторой адаптации) различных технологий беспроводной связи (от Wi-Fi до сетей пятого поколения 5G) для нужд систем управления гражданскими БЛА. В конце статьи приведен набор проблем, которые требуют решения в будущем. Надеюсь, что эта статья станет источником вдохновения для специалистов в области беспроводной связи и систем управления БЛА.

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТРАФИКОМ БЛА

Несмотря на то что дроны являются высокотехнологичным продуктом, их использование, особенно на первых этапах широкого внедрения БЛА в воздушное пространство, будет подчиняться конвенциональным правилам пилотируемой авиации, которые являются плодом более чем векового опыта эксплуатации и развития технологий. Кроме того, мы не должны недооценивать регуляторную инерцию контролирующих органов, которые логично приоритизируют интересы пилотируемой авиации. Эта стадия становления рынка БЛА является необходимым шагом на пути к применению гражданских дронов в глобальных масштабах.

Архитектура и услуги систем УТБ

Система УТБ представляет собой комплексный инструмент управления движением БЛА, предоставляющий набор услуг системам ОрВД и операторам БЛА. Главной целью этой системы является достижение высоких безопасности и эффективности операций с применением гражданских дронов. В архитектуру УТБ (рис. 1) входят следующие элементы:

- операторы БЛА,
- регуляторные органы (Росавиация и ЕС ОрВД, NASA, EASA),
- провайдеры дополнительных данных и услуг (информация о погоде, карты местности, связь и т. д.),
- другие (органы охраны правопорядка, общественные организации, частные лица).

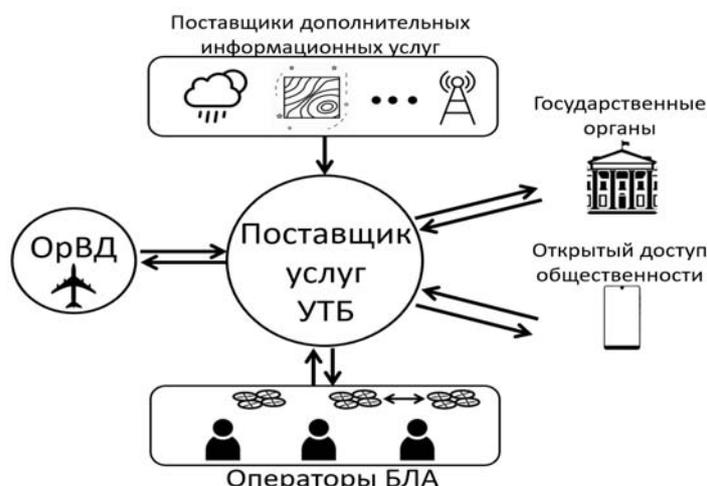


Рис. 1. Схематичная архитектура системы УТБ, демонстрирующая взаимодействия между различными агентами, вовлеченными в процесс управления полетами БЛА
Fig. 1. Schematic UTM architecture demonstrating the interactions between different air traffic agents

Система УТБ должна предоставлять услуги по обеспечению безопасности полетов БЛА: поддержка УКС; сообщение операторам БЛА об ограничениях, установленных на полеты системами ОрВД; предоставление информации о полетах по запросам частных лиц и регуляторных органов; поддержка осуществления и подготовки полетов для операторов БЛА и другие^{6,7}.

Суммируя вышесказанное, отметим, что УТБ позволит регуляторным органам и поставщикам услуг ОрВД управлять общим воздушным пространством без необходимости их вовлечения в непрерывный процесс управления беспилотным воздушным трафиком. В то же время регулятор будет иметь возможность получать по запросу данные о полетах (например, местоположение БЛА и план полета) как в реальном времени, так и по окончании миссии, если есть необходимость пост-полетного анализа происшествий.

В свою очередь системы ОрВД и УТБ должны будут взаимодействовать при предоставлении услуг:

- организации, структуризации и управления воздушным пространством,
- управления запросами и емкостью воздушных потоков,
- стратегического управления конфликтами,
- предоставления дополнительной информации.

Особенно хотелось бы отметить, что включение БЛА в воздушное пространство неизбежно приведет к изменениям в принципах и стратегиях управления воздушным пространством, применяемых в системах ОрВД, несмотря на их упорное сопротивление.

Что касается примеров работ, посвященных архитектуре УТБ, то тут можно отметить особую активность NASA в этой области: одна из самых влиятельных работ – [20], которая была развита в полноценную концепцию⁸. В 2020 году был представлен Европейский вариант демонстрационного проекта УТБ [21].

УПРАВЛЕНИЕ КОНФЛИКТНЫМИ СИТУАЦИЯМИ

Само понятие УТБ редко вызывает вопросы у представителей радиотехнического сообщества. Однако мы наблюдаем некоторую путаницу с термином «предупреждение столкновений». В авиационных регуляторных документах процесс избегания столкновений обычно называется УКС. Соответственно, УКС призвано снизить до приемлемого уровня риск столкновения между воздушными судами (включая беспилотные).

УКС будет осуществляться на трех уровнях (рис. 2), которые должны уменьшить вероятность столкновений: 1) стратегическое УКС (структуризация и организация воздушного пространства, согласование спроса и пропускной способности и синхронизация движения); 2) обеспечение эшелонирования; 3) предупреждение столкновений. Меры, принимаемые на каждом из уровней, должны снизить вероятность необходимости применения процедур следующего уровня системы УКС до уровня, определенного требованиями к УТБ. Например, стратегические меры УКС призваны снизить вероятность использования второго уровня – обеспечения эшелонирования и т. д. Несмотря на то что уровни четко разделены, необходимо обеспечить бесшовную процедуру от стадий раннего планирования полета до самых срочных

⁶ UTM – A Common framework with core boundaries for global harmonization [Электронный ресурс] // ICAO, 3rd ed. 2020. 45 с. URL: <https://www.icao.int/safety/UA/Documents/UTM%20Framework%20Edition%203.pdf> (дата обращения: 10.11.2020).

⁷ Организация движения беспилотных авиационных систем (БАС) (UTM) [Электронный ресурс] // ИКАО, 2019. 6 с. URL: https://www.icao.int/Meetings/a40/Documents/WP/wp_353_ru.pdf (дата обращения: 18.11.2020).

⁸ Unmanned aircraft systems (UAS) traffic management (UTM) concept of operations, V2.0 [Электронный ресурс] // Federal Aviation Administration, Washington, DC., 2020. 68 с. URL: https://www.faa.gov/uas/research_development/traffic_management/media/UTM_ConOps_v2.pdf (дата обращения: 18.11.2020).

мер по избеганию столкновений. Далее мы опишем уровни УКС, следуя рекомендациям ИКАО⁹.

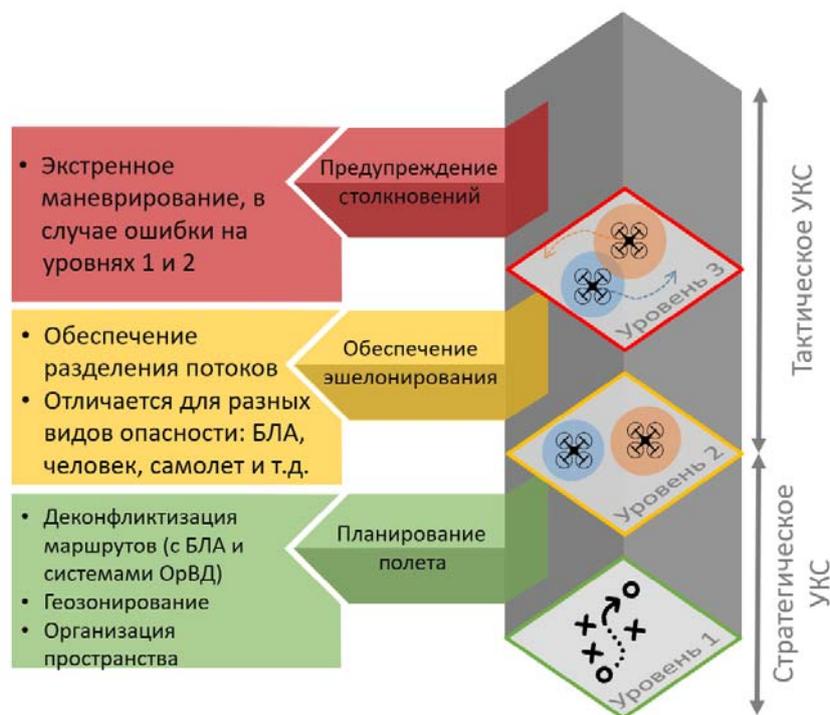


Рис. 2. Уровни и функции УКС
Fig. 2. Conflict Management layers and corresponding functions

Стратегическое управление конфликтными ситуациями (предполетное планирование) представляет собой первый уровень УКС и осуществляется в рамках компонентов структуризации и организации воздушного пространства, согласования спроса и пропускной способности и синхронизации движения. Действия стратегического характера обычно предпринимаются до вылета, однако они не ограничиваются предполетными мерами, особенно в отношении длительных рейсов.

Обеспечение эшелонирования (ОЭ) – второй уровень управления конфликтными ситуациями. ОЭ представляет собой тактический процесс отделения воздушного судна от источника опасности, по крайней мере путем применения соответствующих минимумов эшелонирования (сепарирования, разнесения). Обеспечение эшелонирования будет применяться только в том случае, если невозможно эффективно использовать средства стратегического УКС. Обеспечение эшелонирования представляет собой итеративный процесс, применяемый в пределах горизонта конфликтной ситуации. Шаги ОЭ:

- обнаружение конфликтной ситуации: основано на местоположении соответствующих воздушных судов в данный момент и их предполагаемых траекториях;
- формулирование решения: включает выбор режимов эшелонирования для выдерживания интервала между воздушным судном и всеми известными источниками опасности в пределах горизонта соответствующей конфликтной ситуации; новые траектории также должны быть проверены на предмет конфликтов;
- реализация решения: модификация траектории;
- контроль за выполнением решения: проверка того, что расстояние до источников опасности соответствует минимумам эшелонирования.

⁹ Doc 9854: Глобальная эксплуатационная концепция ОрВД // ИКАО, 1-е изд., 2005. 93 с.

Предупреждение столкновений (ПС) является третьим уровнем УКС, который должен задействоваться в том случае, если находится под угрозой режим эшелонирования. Предупреждение столкновений не является составной частью обеспечения эшелонирования, и системы предупреждения столкновений не участвуют в определении расчетного уровня безопасности полетов, требуемого для обеспечения эшелонирования. Тем не менее системы предупреждения столкновений будут считаться частью управления безопасностью полетов при УТБ. Функции предупреждения столкновений и применимый режим эшелонирования не зависят друг от друга, но должны быть совместимыми.

Обратите внимание на то, что уровни 2 и 3 часто называют тактическим УКС. Далее приведен обзор литературы, посвященной различным способам определения объемов и границ, соответствующих трем уровням УКС.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРОВНЕЙ УКС

Определение границ по времени до столкновения

Исторически сложилось, что в пилотируемой авиации границы между тремя вышеобозначенными уровнями УКС проводились на основе времени, оставшегося до потенциального столкновения. В [23] было предложено использовать тот же подход и для БЛА.

- Уровень 1 (стратегическое УКС): 24 часа – 2 минуты.
- Уровень 2 (обеспечение эшелонирования): 2 минуты – 30 секунд.
- Уровень 3 (предупреждение столкновений): 30 секунд – 0 секунд.

Критика. Этот подход к определению границ дает четкое разделение уровней и интуитивно понятен. К сожалению, в статье не указано, как оценивать влияние вертикального сепарирования, которое является одним из инструментов устранения конфликтов БЛА (в отличие от самолетов). Вдобавок, когда мы пытаемся пересчитать время до столкновения в расстояние (например, для оценки вероятности столкновения [23]), мы обнаруживаем, что границы уровней размываются из-за большого разброса скоростей малых БЛА (от 0 до 74 м/с [24]). Также не приведено никаких рекомендаций насчет того, какая скорость должна использоваться (мгновенная, планируемая, крейсерская или максимальная). Подобная неопределенность может привести к существенной ошибке при расчетах необходимого разделяющего расстояния. К примеру, возьмем два гоночных дрона DRL RacerX [25], летящих навстречу друг другу. В этом случае процедуры ОЭ должны применяться на расстоянии от 4,4 до 17,7 км, что кажется несколько неадекватным для БЛА размером с небольшого голубя. Эта интуитивная догадка подтверждается расчетами по методике, приведенной в [23], показывающими, что вероятность столкновения двух дронов, разделенных расстоянием 1 км, исчезающе мала благодаря малым размерам БЛА.

Определение границ по расстоянию до столкновения

Другой популярной метрикой, используемой для определения уровней УКС, является расстояние (пространственное разнесение). Схема, приведенная на рис. 3, названа «шайбой» из-за своей схожести со спортивным снарядом. Области ОЭ и ПС представляют собой цилиндры с диаметром $2d_H$ и высотой $2d_V$. Далее показано, как размеры могут быть определены для сред с городской и пригородной застройкой.

В работе [24], опубликованной экспертами из Массачусетского технологического института (MIT), предложено определение границ на основе сепарирующего расстояния (табл. 1). Авторы проанализировали около 500 БЛА (с жестким крылом и роторных) на предмет максимальной и крейсерской скоростей, а также динамику БЛА в зависимости от их миссии и реко-

мендаций производителя. Легко заметить, что расстояния довольно велики. Также авторы рассчитали вероятность того, что процедуры уровня 2 не сработают (конечно же, она обратно пропорциональна размеру цилиндров). Например, для минимального объема ОЭ вероятность применения процедур ПС (не путать с вероятностью столкновения – она теоретически нулевая) составляет 10 %.

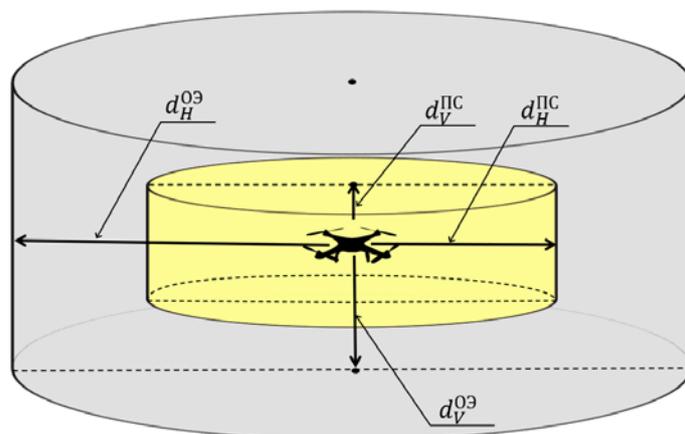


Рис. 3. Определение границ уровней УКС на основе расстояния по методу «шайбы»: ОЭ – внешний серый цилиндр, ПС – внутренний желтый цилиндр

Fig. 3. Determination of the boundaries for Conflict Management layers using the separation-based "Hockey puck" method; aircraft separation assurance – the outer gray cylinder; collision avoidance – the inner yellow cylinder

Критика. Такой подход чрезвычайно привлекателен своей простотой и наглядностью. Однако в случае широкомасштабного применения дронов в городской среде (доставка, наблюдение и т. д.) применение настолько консервативного подхода приведет к тому, что емкость воздушного пространства будет использоваться недостаточно эффективно для того, чтобы обеспечить коммерческую привлекательность решений на основе дронов. Мы уверены, что этот подход к УКС будет отличным первым шагом для различных сервисов на основе БЛА в пригородных и удаленных областях.

Таблица 1
Table 1

Сепарирующие расстояния для ОЭ и ПС в зависимости от застройки среды использования
Separation distances for aircraft separation assurance and collision avoidance depending on the environment development

	Горизонтальное разнесение, d_H	Вертикальное разнесение, d_V
Пригороды и удаленные области [25]		
ОЭ	600–1500 м	75–90 м
ПС	150 м	30 м
Городская среда [26]		
ОЭ	6 м	7,3 м
ПС	3 м	3,7 м

Рекомендации относительно городской среды были предложены в [26], где также были определены размеры цилиндров для объемов обеспечения эшелонирования и избегания столкновения (7,5–8 м на 6 м и 4 на 2 метра соответственно). В этой работе БЛА двигались между зданиями нескольких конфигураций. Как отмечают авторы, вероятность столкновения значительно уменьшается, если дроны обладают функционалом обнаружения объектов, потенциально способных нарушить объемы ОЭ и ПС заранее (с 6–8-секундным горизонтом обнаружения конфликтов). В статье описываются довольно сложные и адаптивные (приоритизация объектов и буферные объемы могут меняться во времени) методы разрешения конфликтов для избегания столкновений как со статичными, так и с мобильными объектами.

Критика. С одной стороны, эти рекомендации довольно либеральны и могут быть применены для УКС плотных воздушных потоков в городской среде. С другой стороны, алгоритм разрешения конфликтов весьма сложен, что может привести к высоким требованиям к вычислительным мощностям в случае большого количества потенциальных столкновений. К тому же необходим анализ более широкого набора конфигураций городской среды.

Если принять во внимание вышеописанные подходы к определению трех уровней УКС, то становится очевидным, что каждый из уровней выдвигает собственные требования к технологиям и системам связи, обеспечивающим успешную работу этого уровня.

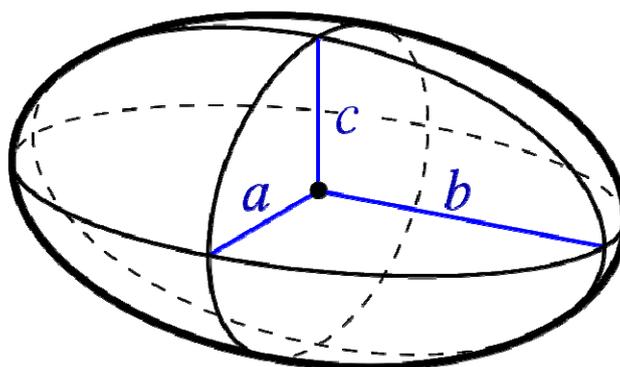


Рис. 4. Определение границ уровней УКС (показан один уровень) на основе расстояния по методу эллипсоида; размеры a , b , c зависят от вектора скорости движения и массы БЛА
Fig. 4. Determination of the boundaries for Conflict Management layers using the separation-based ellipsoid method (a single CM layer is given); dimensions a , b , c depend on the UAV velocity vector and weight

Работы [24, 26] используют цилиндрическую форму объемов ОЭ и ПС, так как эта модель довольно проста геометрически и привычна для авиационных экспертов из-за предыдущего опыта использования для УКС самолетов. БЛА обладают большей гибкостью в направлении и скорости движения, поэтому в [27] было предложено использовать эллипсоид, размеры которого менялись бы в зависимости от скорости и направления движения БЛА. Этот подход представляется наиболее подходящим для роторных БЛА. К сожалению, работа [27] не предоставляет методики расчета размеров этих эллипсоидов.

БЕСПРОВОДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ КОНФЛИКТОВ

Беспроводные системы связи играют огромную роль в системах ОрВД и УТБ. По очевидным причинам вся связь с летающими объектами – беспроводная. Например, ключевой технологией для пилотной авиации является автоматическое зависимое наблюдение радиовещания

тельного типа – АЗН-В (англ. Automatic Dependent Surveillance – Broadcast или ADS-B), проблематика применения которой рассматривается в [28]. Благодаря этой технологии авиасуда транслируют каждые 500 мс свое местоположение, оцененное с помощью спутников. Эта информация может быть принята и использована как наземными системами контроля и управления воздушным движением, так и другими бортами (для обеспечения ситуационной осведомленности и оперативной сепарации). Другим примером является коммуникация между пилотами и авиадиспетчерами.

В этой части статьи выделяются некоторые из технологий, которые могут быть использованы на разных уровнях УКС. Более того, описываются несколько АЗН-В-подобных решений для УТБ.

Технологии связи для стратегического разрешения конфликтов

Стратегическое УКС не предъявляет жестких требований к задержкам и емкости каналов. Наиболее важной характеристикой становится покрытие. В вышеупомянутом рабочем документе ИКАО, посвященном УТБ, особое внимание уделяется сотовым сетям четвертого поколения (Long Term Evolution – LTE), а также комбинированию наземных и спутниковых сетей, так как эти технологии позволяют добиться глобального покрытия. Действительно, сотовые сети предлагают широкие зоны покрытия, и их пропускной способности должно быть достаточно для каналов контроля и управления. К тому же консорциум 3GPP уже предпринял шаги по включению БЛА в сети сотовой связи^{10,11,12,13}.

Хотя сотовые сети кажутся идеальным кандидатом на роль технологии связи для УТБ, многие академические работы указывают на потенциальные проблемы при использовании пользовательского оборудования LTE на БЛА в полете. Такой режим использования понадобится для обмена информацией с системами УТБ (например, о погодных условиях). Так, авторы [29–31] демонстрируют посредством статистических или полудетерминистских симуляций, что БЛА всегда имеют канал прямой видимости (ПВ) с несколькими базовыми станциями (БС). Тогда как это является преимуществом при связи с обслуживающей БС, наличие каналов ПВ с другими БС вызывает повышение уровней интерференции и, следовательно, снижение надежности коммуникации. Эти выводы подтверждаются измерениями¹⁴ [32–34], сделанными в различных условиях (высота, тип застройки). Общим местом для теоретических и экспериментальных работ является наблюдение, что БЛА обслуживаются через боковые лепестки диаграмм направленности антенн БС. Это происходит из-за оптимизации данных сетей для обслуживания наземных абонентов. Широкий обзор других проблем и возможных решений может быть найден в [9–13].

¹⁰ Korhonen J., Meredith J.M. 36.777: Enhanced LTE support for aerial vehicles. Technical report (TR) [Электронный ресурс] // 3GPP TR Portal. 2017. URL: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3231> (дата обращения: 27.11.2020).

¹¹ Meredith J.M., Pope M. 22.125: Unmanned Aerial System (UAS) support in 3GPP [Электронный ресурс] // 3GPP TR Portal. 2018. URL: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3545> (дата обращения: 27.11.2020).

¹² Meredith J.M., Pope M. 23.754: Study on supporting Unmanned Aerial Systems (UAS) connectivity, Identification and tracking [Электронный ресурс] // 3GPP TR Portal. 2018. URL: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3575> (дата обращения: 27.11.2020).

¹³ Meredith J.M. 23.755: Study on application layer support for Unmanned Aerial Systems (UAS) [Электронный ресурс] // 3GPP TR Portal. 2018. URL: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3588> (дата обращения: 27.11.2020).

¹⁴ LTE Unmanned Aircraft Systems [Электронный ресурс] // Trial Report. 2017. 65 с. URL: <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/lte-unmanned-aircraft-systems-trial-report.pdf> (дата обращения: 27.11.2020).

Самым популярным решением является оптимизация высот полета [29, 30]. Но, пожалуй, самые перспективные решение – это формирование диаграмм направленности антенн БС [35–37] в направлении БЛА (в сетях 5-го поколения эта технология используется). Таким образом увеличивается мощность полезного сигнала и уменьшается интерференция в других направлениях.

Технологии связи для тактического разрешения конфликтов

Выбор технологий связи для поддержки УКС на двух уровнях тактического УКС нетривиален из-за различия в определении границ ОЭ и ПС. Пожалуй, ясно одно – предпочтение должно отдаваться системам, где нет необходимости устанавливать соединение со всеми БЛА поблизости, так как это занимает слишком много времени и к тому же крайне небезопасно (соединение открывает дверь атакам различного рода).

Идеальным вариантом могло бы стать использование АЗН-В. Это обеспечило бы совместимость с классической авиацией и сэкономило бы ресурсы, необходимые на разработку альтернативных решений. К сожалению, использование АЗН-В на БЛА вызовет перегруженность частотных ресурсов [38, 39], что вызовет понижение безопасности полетов самолетов. К тому же это дорогое оборудование. Однако понижение мощности передатчика АЗН-В (reduced power ADS-B – RP-ADS-B) несколько улучшает ситуацию [39]: расстояние передачи уменьшается (до 1,3 км), как и частота обновления данных (2–3 секунды). Другой авиационный протокол называется FLARM [40], он изначально разработан для небольших самолетов и вертолетов. Это решение немного дешевле и потребляет меньше энергии. Частота обновления данных: 3 сообщения в секунду. Однако даже самое доступное оборудование (несколько сотен долларов), использующее эти технологии, часто сравнимо с ценой БЛА.

Рассмотрим теперь оборудование, которое часто устанавливается на малые БЛА для связи с пультом управления. Как было показано в [13], Wi-Fi также подвержен интерференции, что отрицательно отражается на возможности установления надежного соединения между двумя приемопередатчиками (двумя БЛА или же БЛА и наземным пультом управления/системой УТБ). Однако при включении информации о координатах и идентификаторе БЛА в Wi-Fi Service Set Identifier (SSID – имя сети) возможно распространение этой критической информации через широкополосный канал в манере, напоминающей АЗН-В [7, 41]. Преимуществами такого решения являются: 1) отсутствие необходимости установления соединения между агентами и 2) БЛА могут обмениваться данными напрямую, без использования наземной инфраструктуры (сотовых сетей).

Так как большинство доступных Wi-Fi-модулей оснащены одной приемопередаточной цепью, операции сканирования и широкополосного SSID не могут быть выполнены одновременно. Анализ, приведенный в [41], показал, что наиболее подходящей схемой является ситуация, когда Wi-Fi модуль сканирует (50 % времени) один канал и транслирует сообщения по всем доступным каналам (оставшиеся 50 % времени). Подобная схема может быть адаптирована для других технологий, в том числе для перечисленных в табл. 2. Необходимо отметить, что многие из этих технологий дешевле в эксплуатации и выглядят более подходящими, чем АЗН-В и FLARM.

Таблица 2
Table 2

Список беспроводных технологий, использование которых рационально для целей УКС
List of wireless technologies that are rational for Conflict Management purposes

Название технологии	Расстояние	Частота отправки сообщений	
		минимальная	измеренная
Bluetooth	100 м	25 мс	
Bluetooth Low Energy	50 м	25 мс	
ZigBee	100 м	25 мс	
ANT	30 м	25 мс	
APRS [43]	20 км	5 с	11–33 с
A3H-B	370 км	0,5 с	
FLARM [41]	10 км	0,3 с	
RP ADS-B [40]	1200 м	0,5 с	2–3 с
Wi-Fi SSID [8, 42]	800 м	60 мс	0,1–0,8 с
LoRa	15 км	5,16 с	5,16–30 с

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Поддержка стратегического разрешения конфликтов

Этап предполетного планирования не ставит специфичных задач перед связью. Единственное, что необходимо сделать, – это разработать стандартизированный интерфейс связи дронов с УТБ. Остальное мало отличается от стандартных задач связи с наземными пользователями. Пожалуй, самая популярная задача, которая ставится регуляторными органами, – разработка радиотехнического идентификационного номера БЛА (англ. – Drone ID), который можно было бы сравнить с автомобильным номером. Этой проблемой занимаются многие, в том числе 3GPP (см. сноску 12). Обычно считается, что этот идентификатор будет передаваться совместно с данными о местоположении БЛА, что делает его неотъемлемой частью всех уровней УКС.

Если же мы говорим о стратегическом УКС во время полета, то ситуация становится интереснее. Как было показано выше, сотовые сети четвертого поколения на данный момент не готовы обеспечить надежную связь с БЛА. Можно отметить два основных направления решения этой проблемы: 1) использование других технологий или 2) рациональное использование ресурсов LTE.

Возможным решением может стать одновременное использование сетей нескольких операторов с последующей многопоточковой обработкой сигналов на борту одного БЛА. Благодаря тому, что операторы устанавливают оборудование на разных площадках, а также используют разные частоты, можно добиться дублирования и большей надежности связи. В то же время стоит оценить рациональность применения спутниковых каналов связи с точки зрения их энергоэффективности (включая массу и ее влияние на расход энергии) и задержек.

Наконец, нужно подготовиться к внедрению сетей 5G: особое внимание придется уделить техникам формирования диаграмм направленности (ДН) антенн, а также методам динамического изменения ДН для «слежения» за БЛА. Возможно, что полезно будет предсказывать траектории полета для более качественной подстройки параметров антенных систем. В реше-

нии этой задачи можно попробовать положиться на военные разработки (с соответствующей адаптацией к мирным условиям), где эта задача давно решается. Также, как показано в [37], из-за природы движения БЛА возникает проблема частых хендверов от одной БС к другой. Эту проблему можно попробовать решить кооперацией БС и пропуском некоторых переходов, если нет строгой необходимости в этом переходе [43].

Из-за высокой вероятности наличия канала ПВ с несколькими БС возникает интерференция на канале «пользователь – БС». Пилот-сигнал, посланный одним БЛА, может быть принят несколькими БС, что вызовет ошибки в оценке канальных матриц, а следовательно, снизит спектральную эффективность всей системы. Эта проблема станет еще более актуальной при увеличении количества дронов в воздухе.

Возможно, попытка совместить две рождающиеся технологии (например, системы УТБ и сети следующего поколения 6G) – не самая практичная исследовательская задача, но такая работа может стать прорывной. Одним из самых перспективных концептов для 6G является идея сетей, где центром процессов является пользователь (т. н. user-centric). Развитие этой идеи приводит к созданию бессотовых сетей (от англ. cell-free), описанных в [44–47]. На данный момент я встречал только две статьи, в которых БЛА были пользователями таких сетей [48] или использовались как носитель БС [49]. Динамика внимания к этим работам показывает определенный интерес к таким исследованиям.

Важнейшей частью систем УТБ является обнаружение и локализация БЛА. Во-первых, необходимо понимать, есть ли в воздушном пространстве дроны, не зарегистрированные в УТБ или с неисправным оборудованием. Во-вторых, даже при условии, что БЛА обменивается данными с УТБ, верификация данных необходима. Повсеместная установка наземных радаров не представляется рациональной с экономической точки зрения. Эту задачу можно решать на основе камер, звуковых и радиосенсоров [50–52]. Краткий обзор возможных решений может быть найден в [53], где также предложена система обнаружения, основанная на БЛА-наблюдателях. Действительно, применение латинского принципа *similia similibus curentur* (более известного, как «клин клином вышибают») оправдано в этом случае, так как БЛА имеет гораздо большую вероятность быть в прямой видимости с другим БЛА, нежели чем с наземным сенсором. Это повышает надежность обнаружения и точность локализации.

Интересной и важной практической задачей является локализация БЛА с помощью сигналов, полученных LTE БС. Эта задача тривиальна для наземных абонентов, однако модем, установленный на дрон, будет обслуживаться через боковые лепестки БС, что вносит непоправимые ошибки в существующие алгоритмы локализации. Решение этой задачи важно не только для стратегического УКС, но и для тактического.

Поддержка тактического разрешения конфликтов

В предыдущем абзаце я поднял проблему некооперирующих БЛА. Для успешного решения задач ОЭ и ПС (обнаружение конфликта, формирование решения, маневрирование) может понадобиться установка на борт БЛА пассивных и активных радаров [50, 54], разнообразных сенсоров [53, 55] и камер [56]. Интерес к этой области значителен, работа в этом направлении будет полезна. На данный момент непонятно, какой набор сенсоров будет использован и каким образом осуществлять совместную обработку данных от разных сенсоров.

В случае если все БЛА обмениваются информацией (напрямую или через УТБ), то одной из возможных тем исследований можно указать разработку протокола обмена координатами (наподобие адаптивного АЗН-В), в котором параметры бы менялись в зависимости от риска (рис. 4 и его описание). Аутентификация сообщений также должна быть обеспечена, что может быть нетривиально, особенно в системах, где производится широкоэвещательная рассылка, как в АЗН-В [28]. Конечно, очень привлекательной стала бы такая беспроводная технология, кото-

рую можно было бы использовать на всех уровнях УКС. Вполне возможно, что сети пятого поколения 5G смогут удовлетворить всем требованиям, однако эта гипотеза требует проверки (особое внимание советуем уделить интерфейсу PC5, используемому для прямой связи между телефонами в LTE). Не стоит игнорировать и спутниковую связь (особенно спутники на низкой околоземной орбите), хотя это и представляется очень нишевым решением, которое подойдет только довольно тяжелым БЛА (например, транспортникам) из-за их грузоподъемности и относительно больших объемов ОЭ и ПС.

Все перечисленные выше направления исследований связаны с разработкой новых идей и решений в области связи. Однако хотелось бы также отметить, что необходимо закрепить правила движения дронов: стандартные маневры, системы приоритизации движения разных БЛА, методы расчета сепарирующих расстояний в зависимости от параметров дрона и его полетного задания. Четкий подход к рациональной организации и структуризации воздушного пространства должен быть разработан и закреплен законодательно. Пищей для вдохновения могут стать несколько документов Европейского Союза^{15,16}. Наконец, срочно необходим перевод документов ИКАО (сноска 3) на русский язык (учитывая все тонкости и замечания, перечисленные, например, в [57]).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время задача построения систем управления движением множества (независимых) БЛА является чрезвычайно актуальной. Основные функции этих систем уже определены (и описаны в этой статье), но нам только предстоит разработать конкретные технические решения для осуществления этих функций. Управление конфликтными ситуациями – ключевая проблема, которая будет решаться системами УТБ. В этой статье дан обзор уровней УКС и обозначен набор беспроводных технологий, способных помочь обеспечить безопасность движения БЛА в системах управления будущего. Необходимо отметить, что сети 5G являются самым многообещающим кандидатом при условии, что можно будет перенести успешные решения из других технологий (например, широкополосную отправку сообщений, содержащих идентификационный номер БЛА и его местоположение). Однако отмечено, что актуальной проблемой также является разработка полезной нагрузки БЛА, которая помогла бы увеличить автономность БЛА через повышение осведомленности об окружающих объектах.

БЛАГОДАРНОСТИ

Я благодарю профессора Софи Поллан (KU Leuven) за поддержку идеи написания этой статьи, за очень важные и ценные дискуссии на тему развития технологий БЛА, выводы из которых частично отражены в данной работе. Хочу также поблагодарить Андрея Котусова, Дмитрия Ковалева и Валерию Савич за помощь в редактировании статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Doole M., Ellerbroek J., Hoekstra J.** Drone delivery: urban airspace traffic density estimation // Eighth SESAR Innovation Days, 3–7 December 2018. 8 p.

¹⁵ U-Space Concept of operations: Enhanced overview [Электронный ресурс] // SESAR-JU, 2019. 92 с. URL: <https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/u-space/CORUS%20ConOps%20vol2.pdf> (дата обращения: 27.01.2021).

¹⁶ Initial view on Principles for the U-space architecture [Электронный ресурс] // SESAR-JU, 2019. 19 с. URL: <https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/u-space/SESAR%20principles%20for%20U-space%20architecture.pdf> (дата обращения: 27.01.2021).

2. **Haddad C.** Factors affecting the adoption and use of urban air mobility / C. Haddad, E. Chaniotakis, A. Straubinger, K. Plötner, C. Antoniou // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2020. Vol. 132. Pp. 696–712. DOI: 10.1016/j.tra.2019.12.020
3. **PytlikZillig L.M.** Public opinions of unmanned aerial technologies in 2014–2019: a technical and descriptive report / L.M. PytlikZillig, J.C. Walther, C. Detweiler, S. Elbaum, A. Houston [Электронный ресурс] // University of Nebraska Public Policy Center, Lincoln. 2020. URL: <https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1000&context=lpz> (дата обращения: 10.11.2020).
4. **Cohn P.** Commercial drones are here: the future of unmanned aerial systems / P. Cohn, A. Green, M. Langstaff, M. Roller [Электронный ресурс] // McKinsey&Company. 2017. URL: <https://www.mckinsey.com/industries/travel-logistics-and-infrastructure/our-insights/commercial-drones-are-here-the-future-of-unmanned-aerial-systems> (дата обращения: 10.11.2020).
5. **Sandvik K.B.** African drone stories // *BEHEMOTH – A Journal on Civilisation*. 2015. Vol. 8, no. 2. Pp. 73–96. DOI: 10.6094/behemoth.2015.8.2.870
6. **Безбородова О.Е.** Экономические и правовые вопросы использования беспилотных воздушных судов для обеспечения техносферной безопасности / О.Е. Безбородова, В.В. Шерстнев, О.С. Виноградов, Н.А. Виноградова // *Fortus: экономические и политические исследования*. 2018. № 2 (2). С. 19–26.
7. **Vinogradov E., Minucci F., Pollin S.** Wireless communication for safe UAVs: from long-range deconfliction to short-range collision avoidance // *IEEE Vehicular Technology Magazine*. 2020. Vol. 15, iss. 2. Pp. 88–95. DOI: 10.1109/MVT.2020.2980014
8. **Motlagh N.H., Taleb T., Arouk O.** Low-altitude unmanned aerial vehicles-based internet of things services: comprehensive survey and future perspectives // *IEEE Internet of Things Journal*. 2016. Vol. 3, iss. 6. Pp. 899–922. DOI: 10.1109/JIOT.2016.2612119
9. **Gupta L., Jain R., Vaszkun G.** Survey of important issues in UAV communication networks [Электронный ресурс] // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2016. Vol. 18, iss. 2. Pp. 1123–1152. DOI: 10.1109/COMST.2015.2495297 (дата обращения: 10.11.2020).
10. **Hayat S., Yanmaz E., Muzaffar R.** Survey on unmanned aerial vehicle networks for civil applications: a communications viewpoint [Электронный ресурс] // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2016. Vol. 18, iss. 4. Pp. 2624–2661. DOI: 10.1109/COMST.2016.2560343 (дата обращения: 10.11.2020).
11. **Zeng Y., Wu Q., Zhang R.** Accessing from the sky: a tutorial on UAV communications for 5G and beyond // *Proceedings of the IEEE*. 2019. Vol. 107, iss. 12. Pp. 2327–2375. DOI: 10.1109/JPROC.2019.2952892
12. **Mozaffari M.** A tutorial on UAVs for wireless networks: applications, challenges, and open problems / M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, Y. Nam, M. Debbah [Электронный ресурс] // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2019. Vol. 21, iss. 3. Pp. 2334–2360. DOI: 10.1109/COMST.2019.2902862 (дата обращения: 14.11.2020).
13. **Vinogradov E.** Tutorial on UAVs: a blue sky view on wireless communication / E. Vinogradov, H. Sallouha, S. De Bast, M.M. Azari, S. Pollin // *Journal of Mobile Multimedia*. 2020. Vol. 14, iss. 4. Pp. 395–468. DOI: 10.13052/jmm1550-4646.1443
14. **Бондарев А.Н., Киричек Р.В.** Обзор беспилотных летательных аппаратов общего пользования и регулирования воздушного движения БПЛА в разных странах [Электронный ресурс] // *Информационные технологии и телекоммуникации*. 2016. Т. 4, № 4. С. 13–23. URL: <https://www.sut.ru/doci/nauka/review/20164/13-23.pdf> (дата обращения: 14.11.2020).
15. **Пантелеймонов И.Н.** Основные направления создания высоконадежной системы связи и управления БПЛА / И.Н. Пантелеймонов, А.В. Белозерцев, А.А. Монастыренко, В.В. Боцва, А.В. Наумкин // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2020. № 6 (723). С. 78–88. DOI: 10.18698/0536-1044-2020-6-78-88

- 16. Braun S., Friedewald M., Valkenburg G.** Civilizing drones: military discourses going civil? // *Science & Technology Studies*. 2015. Vol. 28, no. 2. Pp. 73–87. DOI: 10.23987/sts.55351
- 17. Веремеенко К.К.** Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов / К.К. Веремеенко, С.Ю. Желтов, Д.А. Козорез, М.Н. Красильщиков, Н.В. Ким и др. / Под ред. М.Н. Красильщикова, Г.Г. Себрякова. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 556 с.
- 18. Верба В.С., Татарский Б.Г.** Комплексы с беспилотными летательными аппаратами. В 2-х кн.: Кн. 1. Принципы построения и особенности применения комплексов с БЛА: монография / Под ред. В.С. Вербы, Б.Г. Татарского. М.: Радиотехника, 2016. 512 с.
- 19. Верба В.С., Татарский Б.Г.** Комплексы с беспилотными летательными аппаратами. В 2-х кн.: Кн. 2. Робототехнические комплексы на основе БЛА: монография / Под ред. В.С. Вербы, Б.Г. Татарского. М.: Радиотехника, 2016. 824 с.
- 20. Kopardekar P.** Unmanned aircraft system traffic management (UTM) concept of operations / P. Kopardekar, J. Rios, T. Prevot, M. Johnson, J. Jung, J.E. Robinson // 16th AIAA Aviation Technology Integration and Operations Conference. Washington, D.C., 13–17 June 2016. DOI: 10.2514/6.2016-3292
- 21. Lappas V.** EuroDRONE, a european UTM testbed for U-Space / V. Lappas, G. Zoumpopoulos, V. Kostopoulos, H. Shin and others // International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). Athens, Greece, 1–4 September 2020. Pp. 1766–1774.
- 22. Kunzi F.** Framework for risk-based derivation of performance and interoperability requirements for UTM avionics // IEEE/AIAA 35th Digital Avionics Systems Conference (DASC). Sacramento, CA, 2016. Pp. 1–10. DOI: 10.1109/DASC.2016.7778050
- 23. Belkhouche F.** Modeling and calculating the collision risk for air vehicles // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2013. Vol. 62, no. 5. Pp. 2031–2041. DOI: 10.1109/TVT.2013.2238265
- 24. Weinert A.** Well-clear recommendation for small unmanned aircraft systems based on unmitigated collision risk / A. Weinert, S. Campbell, A. Vela, D. Schuldt, J. Kurucar // *Journal of Air Transportation*. 2018. Vol. 26, no. 3. Pp. 113–122. DOI: 10.2514/1.D0091
- 25. Schroth F.** The DRL sets world record with drone whizzing at 179.6 mph [Электронный ресурс] // *dronelife*. 2017. URL: <https://dronelife.com/2017/07/14/drone-racing-league-drl-builds-fastest-racing-drone/#:~:text=The%20fastest%20racing%20drone%2C%20the,46%2C000%20RPMs> (дата обращения: 20.11.2020).
- 26. Johnson S.C., Petzen A., Tokotch D.** Exploration of detect-and-avoid and well-clear requirements for small UAS maneuvering in an urban environment // 17th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Denver, Colorado 5–9 June 2017. DOI: 10.2514/6.2017-3074
- 27. Geister D.** Concept for urban airspace integration DLR U-Space blueprint [Электронный ресурс] // *Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt*. 2017. URL: https://www.dlr.de/dlr/presse/Portaldata/1/Resources/documents/2017/Concept_for_Urban_Airspace_Integration.pdf (дата обращения: 20.11.2020).
- 28. Косьянчук В.В., Сельвесюк Н.И., Хамматов Р.Р.** Обзор основных путей повышения безопасности системы АЗН-В // *Научный Вестник МГТУ ГА*. 2019. Т. 22, № 1. С. 39–50. DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-1-39-50
- 29. Colpaert A., Vinogradov E., Pollin S.** Aerial coverage analysis of cellular systems at LTE and mmWave frequencies using 3D city models [Электронный ресурс] // *Sensors*. 2018. Vol. 18, no. 12. ID 4311. DOI: 10.3390/s18124311 (дата обращения: 20.11.2020).
- 30. Azari M.M.** Coexistence of terrestrial and aerial users in cellular networks / M.M. Azari, F. Rosas, A. Chiumento, S. Pollin // 2017 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). Singapore, 2017. Pp. 1–6. DOI: 10.1109/GLOCOMW.2017.8269068

- 31. Lyu J., Zhang R.** Network-connected UAV: 3-D system modeling and coverage performance analysis [Электронный ресурс] // IEEE Internet of Things Journal. 2019. Vol. 6, no. 4. Pp. 7048–7060. DOI: 10.1109/JIOT.2019.2913887 (дата обращения: 20.11.2020).
- 32. Van Der Bergh B., Chiumento A., Pollin S.** LTE in the sky: Tradingoff propagation benefits with interference costs for aerial nodes // IEEE Communications Magazine. 2016. Vol. 54, no. 5. Pp. 44–50. DOI: 10.1109/MCOM.2016.7470934
- 33. Fakhreddine A.** Handover challenges for cellular-connected drones / A. Fakhreddine, C. Bettstetter, S. Hayat, R. Muzaffar, D. Emini // Proceedings of the 5th Workshop on Micro Aerial Vehicle Networks, Systems, and Applications DroNet. Association for Computing Machinery, 2019. Pp. 9–14. DOI: 10.1145/3325421.3329770
- 34. Hayat S.** An experimental evaluation of LTE-A throughput for drones / S. Hayat, C. Bettstetter, A. Fakhreddine, R. Muzaffar, D. Emini // Proceedings of the 5th Workshop on Micro Aerial Vehicle Networks, Systems, and Applications DroNet. Association for Computing Machinery, 2019. Pp. 3–8. DOI: 10.1145/3325421.3329765
- 35. Huang Y.** 3D Beam tracking for cellular-connected UAV / Y. Huang, Q. Wu, T. Wang, G. Zhou, R. Zhang // IEEE Wireless Communications Letters. 2020. Vol. 9, iss. 5. Pp. 736–740. DOI: 10.1109/LWC.2020.2968312
- 36. Huang Y.** Massive MIMO for cellular-connected UAV: challenges and promising solutions / Y. Huang, Q. Wu, R. Lu, X. Peng, R. Zhang // IEEE Communications Magazine. 2021. Vol. 59, no. 2. Pp. 84–90. DOI: 10.1109/MCOM.001.2000552
- 37. Colpaert A., Vinogradov E., Pollin S.** 3D beamforming and handover analysis for UAV networks // 2020 IEEE Globecom Workshops. GC Wkshps, 2020. Pp. 1–6. DOI: 10.1109/GCWkshps50303.2020.9367570
- 38. Strohmeier M.** Realities and challenges of nextgen air traffic management: the case of ADS-B / M. Strohmeier, M. Schafer, V. Lenders, I. Martinovic // IEEE Communications Magazine. 2014. Vol. 52, no. 5. Pp. 111–118. DOI: 10.1109/MCOM.2014.6815901
- 39. Consiglio M.** Sense and avoid characterization of the independent configurable architecture for reliable operations of unmanned systems / M. Consiglio, B. Duffy, S. Balachandran, C. Munoz, L. Glaab [Электронный ресурс] // Thirteenth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM2019). NTRS – NASA Technical Reports Server. URL: http://www.atmseminar.org/seminarContent/seminar13/papers/ATM_Seminar_2019_paper_50.pdf (дата обращения: 27.11.2020).
- 40. Marques M.** Sense and avoid implementation in a small unmanned aerial vehicle / M. Marques, A. Brum, S. Antunes, J.G. Mota // 13th APCA International Conference on Automatic Control and Soft Computing (CONTROLO). Ponta Delgada, 2018. DOI: 10.1109/CONTROLO.2018.8514548
- 41. Minucci F., Vinogradov E., Pollin S.** Avoiding collisions at any (low) cost: ADS-B like position broadcast for UAVs [Электронный ресурс] // IEEE Access. 2020. Vol. 8. Pp. 121843–121857. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3007315 (дата обращения: 27.11.2020).
- 42. Lin C.E., Shao P.C., Lin Y.Y.** System operation of regional UTM in Taiwan [Электронный ресурс] // Aerospace. 2020. Vol. 7, iss. 5. Pp. 7–65. DOI: 10.3390/aerospace7050065 (дата обращения: 27.11.2020).
- 43. Arshad R.** Velocity-aware handover management in two-tier cellular networks / R. Arshad, H. ElSawy, S. Sorour, T.Y. Al-Naffouri, M. Alouini [Электронный ресурс] // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2017. Vol. 16, no. 3. Pp. 1851–1867. DOI: 10.1109/TWC.2017.2655517 (дата обращения: 27.11.2020).
- 44. Ngo H.Q.** Cell-free massive MIMO: uniformly great service for everyone / H.Q. Ngo, A. Ashikhmin, H. Yang, E.G. Larsson, T.L. Marzetta // 2015 IEEE 16th International Workshop on

Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), 2015. Pp. 201–205. DOI: 10.1109/SPAWC.2015.7227028

45. Buzzi S., D'Andrea C. Cell-free massive MIMO: user-centric approach // IEEE Wireless Communications Letters. 2017. Vol. 6, no. 6. Pp. 706–709. DOI: 10.1109/LWC.2017.2734893

46. Ngo H.Q. Cell-free massive MIMO versus small cells / H.Q. Ngo, A. Ashikhmin, H. Yang, E.G. Larsson, T.L. Marzetta // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2017. Vol. 16, no. 3. Pp. 1834–1850. DOI: 10.1109/TWC.2017.2655515

47. Zhang J. Cell-free massive MIMO: a new next-generation paradigm / J. Zhang, S. Chen, Y. Lin, J. Zheng, B. Ai, L. Hanzo [Электронный ресурс] // IEEE Access. 2019. Vol. 7. Pp. 99878–99888. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2930208 (дата обращения: 27.11.2020).

48. D'Andrea C. Cell-free massive MIMO for UAV communications / C. D'Andrea, A. Garcia-Rodriguez, G. Geraci, L.G. Giordano, S. Buzzi // 2019 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), 2019. Pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICCW.2019.8756714

49. Shokry M. Leveraging UAVs for coverage in cell-free vehicular networks: a deep reinforcement learning approach / M. Shokry, D. Ebrahimi, C. Assi, S. Sharafeddine, A. Ghryeb [Электронный ресурс] // IEEE Transactions on Mobile Computing. 2020. DOI: 10.1109/TMC.2020.2991326 (дата обращения: 11.12.2020).

50. Vinogradov E., Kovalev D.A., Pollin S. Simulation and detection performance evaluation of a UAV-mounted passive radar [Электронный ресурс] // IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2018. Pp. 1185–1191. DOI: 10.1109/PIMRC.2018.8580940 (дата обращения: 11.12.2020).

51. Sallouha H. Localization in ultra narrow band IoT networks: design guidelines and tradeoffs / H. Sallouha, A. Chiumento, S. Rajendran, S. Pollin [Электронный ресурс] // IEEE Internet of Things Journal. 2019. Vol. 6, no. 6. Pp. 9375–9385. DOI: 10.1109/IJOT.2019.2931628 (дата обращения: 11.12.2020).

52. Guvenc I. Detection, tracking, and interdiction for amateur drones / I. Guvenc, F. Koohifar, S. Singh, M.L. Sichitiu, D. Matolak // IEEE Communications Magazine. 2018. Vol. 56, no. 4. Pp. 75–81. DOI: 10.1109/MCOM.2018.1700455

53. Azari M.M. Key technologies and system trade-offs for detection and localization of amateur drones / M.M. Azari, H. Sallouha, A. Chiumento, S. Rajendran, E. Vinogradov, S. Pollin // IEEE Communications Magazine. 2018. Vol. 56, no. 1. Pp. 51–57. DOI: 10.1109/MCOM.2017.1700442

54. Hügler P. Radar taking off: new capabilities for UAVs / P. Hügler, F. Roos, M. Schartel, M. Geiger, C. Waldschmidt // IEEE Microwave Magazine. 2018. Vol. 19, no. 7. Pp. 43–53. DOI: 10.1109/MMM.2018.2862558

55. Gageik N., Benz P., Montenegro S. Obstacle detection and collision avoidance for a UAV with complementary low-cost sensors [Электронный ресурс] // IEEE Access. 2015. Vol. 3. Pp. 599–609. DOI: 10.1109/ACCESS.2015.2432455 (дата обращения: 27.01.2021).

56. Rozantsev A., Lepetit V., Fua P. Detecting flying objects using a single moving camera // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2017. Vol. 39, no. 5. Pp. 879–892. DOI: 10.1109/TPAMI.2016.2564408

57. Шаров В.Д., Елисеев Б.П., Воробьев В.В. Анализ недостатков в описании процедур управления риском безопасности полетов в документах ИКАО // Научный Вестник МГТУ ГА. 2019. Т. 22, № 2. С. 49–61. DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-2-49-61

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Виноградов Евгений Алексеевич, доктор философии (PhD), научный сотрудник кафедры электротехники факультета Инженерно-технических наук Левенского католического университета (KU Leuven), evgenii.vinogradov@kuleuven.be.

KEY WIRELESS COMMUNICATION TECHNOLOGIES TO SUPPORT TRAFFIC MANAGEMENT SYSTEMS OF UNMANNED AERIAL VEHICLES FOR CIVIL APPLICATION (REVIEW OF FOREIGN LITERATURE)

Evgenii A. Vinogradov¹
¹*KU Leuven, Leuven, Belgium*

ABSTRACT

Not less than one hundred thousand Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) are expected to perform flights simultaneously in Russia by 2035. The UAV fleet capacity triggers the development of the systems for informational support, operating control and management of UAV flights (Unmanned Aircraft System Traffic Management (UTM) systems) similar to that one already operating in manned aviation. The challenges arising in the sphere of civil aviation cannot be solved without wireless communication. The goals of this article are as follows: 1) familiarization of communication experts with the latest scientific developments of unmanned aerial technologies 2) description of the telecommunication-related problems of extensive systems of UAV control encountered by development engineers. In this article a schematic architecture and main functions of UTM systems are described as well as the examples of their implementation. Special emphasis is put on enhancing flight safety by means of a rational choice of communication technologies to manage conflicts (Conflict Management) known as "collision avoidance". The article analyzes the application of a wide range of wireless technologies ranging from Wi-Fi and Automatic Dependent Surveillance Broadcast (ADS-B) to 5G cellular networks as well as cell-free networks contributing to the development of 6G communication networks. As a result of the analysis, a list of promising research trends at the intersection of the fields of wireless communication and UAVs for civil application is made.

Key words: Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), Unmanned Aircraft System Traffic Management (UTM), conflict management, 5G, ICAO.

REFERENCES

1. **Doole, M., Ellerbroek, J. and Hoekstra, J.** (2018). *Drone delivery: urban airspace traffic density estimation*. Eighth SESAR Innovation Days, 8 p.
2. **Haddad, C., Chaniotakis, E., Straubinger, A., Plötner, K. and Antoniou, C.** (2020). *Factors affecting the adoption and use of urban air mobility*. Transportation Research Part A: Policy and Practice, vol. 132, pp. 696–712. DOI: 10.1016/j.tra.2019.12.020
3. **PytlíkZillig, L.M., Walther, J.C., Detweiler, C., Elbaum, S. and Houston, A.** (2020). *Public opinions of unmanned aerial technologies in 2014-2019: a technical and descriptive report*. University of Nebraska Public Policy Center, Lincoln. Available at: <https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1000&context=lpz> (accessed 10.11.2020).
4. **Cohn, P., Green, A., Langstaff, M. and Roller, M.** (2017). *Commercial drones are here: the future of unmanned aerial systems*. McKinsey&Company. Available at: <https://www.mckinsey.com/industries/travel-logistics-and-infrastructure/our-insights/commercial-drones-are-here-the-future-of-unmanned-aerial-systems> (accessed 10.11.2020).
5. **Sandvik, K.B.** (2015). *African drone stories*. BEHEMOTH – A Journal on Civilisation, vol. 8, no. 2, pp. 73–96. DOI: 10.6094/behemoth.2015.8.2.870
6. **Bezborodova, O.E., Sherstnev, V.V., Vinogradov, O.S. and Vinogradova, N.A.** (2018). *Economic and legal issues of the use of wrong motor aircraft to ensure technosphere safety*. Fortus: Economy & Political Researches, no. 2 (2), pp. 19–26. (in Russian)
7. **Vinogradov, E., Minucci, F. and Pollin, S.** (2020). *Wireless communication for safe UAVs: from long-range deconfliction to short-range collision avoidance*. IEEE Vehicular Technology Magazine, vol. 15, issue 2, pp. 88–95. DOI: 10.1109/MVT.2020.2980014

8. **Motlagh, N.H., Taleb, T. and Arouk, O.** (2016). *Low-altitude unmanned aerial vehicles-based internet of things services: comprehensive survey and future perspectives*. IEEE Internet of Things Journal, vol. 3, issue 6, pp. 899–922. DOI: 10.1109/JIOT.2016.2612119
9. **Gupta, L., Jain, R. and Vaszkun, G.** (2016). *Survey of important issues in UAV communication networks*. IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 18, issue 2, pp. 1123–1152. DOI: 10.1109/COMST.2015.2495297 (accessed 10.11.2020).
10. **Hayat, S., Yanmaz, E. and Muzaffar, R.** (2016). *Survey on unmanned aerial vehicle networks for civil applications: a communications viewpoint*. IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 18, issue 4, pp. 2624–2661. DOI: 10.1109/COMST.2016.2560343 (accessed 10.11.2020).
11. **Zeng, Y., Wu, Q. and Zhang, R.** (2019). *Accessing from the sky: a tutorial on UAV communications for 5G and beyond*. Proceedings of the IEEE, vol. 107, issue 12, pp. 2327–2375. DOI: 10.1109/JPROC.2019.2952892
12. **Mozaffari, M., Saad, W., Bennis, M., Nam, Y. and Debbah, M.** (2019). *A tutorial on UAVs for wireless networks: applications, challenges, and open problems*. IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 21, issue 3, pp. 2334–2360. DOI: 10.1109/COMST.2019.2902862 (accessed 14.11.2020).
13. **Vinogradov, E., Sallouha, H., De Bast, S., Azari, M.M. and Pollin, S.** (2020). *Tutorial on UAVs: a blue sky view on wireless communication*. Journal of Mobile Multimedia, vol. 14, issue 4, pp. 395–468. DOI: 10.13052/jmm1550-4646.1443
14. **Bondarev, A.N. and Kirichek, R.V.** (2016). *Overview of unmanned aerial apparatus for general use and regulation of air UAV movement in different countries*. Telecom IT, vol. 4, no. 4, pp. 13–23. Available at: <https://www.sut.ru/doci/nauka/review/20164/13-23.pdf> (accessed 14.11.2020). (in Russian)
15. **Panteleymonov, I.N., Belozertsev, A.V., Monastyrenko, A.A., Botsva, V.V. and Naumkin, A.V.** (2020). *The main trends in developing highly reliable communication and control systems for unmanned aerial vehicles*. BMSTU Journal of Mechanical Engineering, no. 6 (723), pp. 78–88. DOI: 10.18698/0536-1044-2020-6-78-88 (in Russian)
16. **Braun, S., Friedewald, M. and Valkenburg, G.** (2015). *Civilizing drones: military discourses going civil?* Science & Technology Studies, vol. 28, no. 2, pp. 73–87. DOI: 10.23987/sts.55351
17. **Veremeenko, K.K., Zheltov, S.Yu., Kozorez, D.A., Krasilshchikov, M.N. and others.** (2009). *Sovremennyye informatsionnye tehnologii v zadachakh navigatsii i navedeniya bespilotnykh manevrennykh letatelnykh apparatov* [Modern IT for UAV navigation and targeting], in M.N. Krasilshchikov, G.G. Sebryakov (Eds.). Moscow: FIZMATLIT, 556 p. (in Russian)
18. **Verba, V.S. and Tatarsky, B.G.** (2016). *Kompleksy s bespilotnymi letatelnyimi apparatami v 2-kh knigakh: Monografiya* [Complexes with unmanned aerial vehicles in 2 books: Monograph]. Kniga 1. Printsipy postroeniya i osobennosti primeneniya kompleksov s BLA [Principles of construction and usage features of complexes with UAVs]. Moscow: Radiotekhnika, 512 p. (in Russian)
19. **Verba, V.S. and Tatarsky, B.G.** (2016). *Kompleksy s bespilotnymi letatelnyimi apparatami v 2-kh knigakh: Monografiya* [Complexes with unmanned aerial vehicles in 2 books: Monograph]. Kniga 2. Robototekhnicheskie komplekсы na osnove BLA [Robotic systems based on UAVs]. Moscow: Radiotekhnika, 824 p. (in Russian)
20. **Kopardekar, P., Rios, J., Prevot, T., Johnson, M., Jung, J. and Robinson, J.E.** (2016). *Unmanned aircraft system traffic management (UTM) concept of operations*. 16th AIAA Aviation Technology Integration and Operations Conference, Jun. 2016. DOI: 10.2514/6.2016-3292
21. **Lappas, V., Zoumponos, G., Kostopoulos, V., Shin, H. and others.** (2020). *Euro-DRONE, a european UTM testbed for U-Space*. International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Athens, Greece, pp. 1766–1774.

22. **Kunzi, F.** (2016). *Framework for risk-based derivation of performance and interoperability requirements for UTM avionics*. IEEE/AIAA 35th Digital Avionics Systems Conference (DASC), Sacramento, CA, pp. 1–10. DOI: 10.1109/DASC.2016.7778050
23. **Belkhouche, F.** (2013). *Modeling and calculating the collision risk for air vehicles*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 62, no. 5, pp. 2031–2041. DOI: 10.1109/TVT.2013.2238265
24. **Weinert, A., Campbell, S., Vela, A., Schuldt, D. and Kurucar, J.** (2018). *Well-clear recommendation for small unmanned aircraft systems based on unmitigated collision risk*. Journal of Air Transportation, vol. 26, no. 3, pp. 113–122. DOI: 10.2514/1.D0091
25. **Schroth, F.** (2017). *The DRL sets world record with drone whizzing at 179.6 mph*. dronelife. 2017. Available at: <https://dronelife.com/2017/07/14/drone-racing-league-drl-builds-fastest-racing-drone/#:~:text=The%20fastest%20racing%20drone%2C%20the,46%2C000%20RPMs> (accessed 20.11.2020).
26. **Johnson, S.C., Petzen, A. and Tokotch, D.** (2017). *Exploration of detect-and-avoid and well-clear requirements for small UAS maneuvering in an urban environment*. 17th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, June 2017. DOI: 10.2514/6.2017-3074
27. **Geister, D.** (2017). *Concept for urban airspace integration DLR U-Space blueprint*. Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt. Available at: https://www.dlr.de/dlr/presse/Portaldata/1/Resources/documents/2017/Concept_for_Urban_Airspace_Integration.pdf (accessed 20.11.2020).
28. **Kosianchuk, V.V., Selvesiuk, N.I. and Khammatov, R.R.** (2019). *An overview of the main ways to improve the ads-b system security*. Civil Aviation High Technologies, vol. 22, no. 1, pp. 39–50. DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-1-39-50 (in Russian)
29. **Colpaert, A., Vinogradov, E. and Pollin, S.** (2018). *Aerial coverage analysis of cellular systems at LTE and mmWave frequencies using 3D city models*. Sensors, vol. 18, no. 12, ID 4311. DOI: 10.3390/s18124311 (accessed 20.11.2020).
30. **Azari, M.M., Rosas, F., Chiumento, A. and Pollin, S.** (2017). *Coexistence of terrestrial and aerial users in cellular networks*. 2017 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), Singapore, pp. 1–6. DOI: 10.1109/GLOCOMW.2017.8269068
31. **Lyu, J. and Zhang, R.** (2019). *Network-connected UAV: 3-D system modeling and coverage performance analysis*. IEEE Internet of Things Journal, vol. 6, no. 4, pp. 7048–7060. DOI: 10.1109/JIOT.2019.2913887 (accessed 20.11.2020).
32. **Van Der Bergh, B., Chiumento, A. and Pollin, S.** (2016). *LTE in the sky: trading off propagation benefits with interference costs for aerial nodes*. IEEE Communications Magazine, vol. 54, no. 5, pp. 44–50. DOI: 10.1109/MCOM.2016.7470934
33. **Fakhreddine, A., Bettstetter, C., Hayat, S., Muzaffar, R. and Emini, D.** (2019). *Handover challenges for cellular-connected drones*. Proceedings of the 5th Workshop on Micro Aerial Vehicle Networks, Systems, and Applications DroNet, Association for Computing Machinery, pp. 9–14. DOI: 10.1145/3325421.3329770
34. **Hayat, S., Bettstetter, C., Fakhreddine, A., Muzaffar, R. and Emini, D.** (2019). *An experimental evaluation of LTE-A throughput for drones*. Proceedings of the 5th Workshop on Micro Aerial Vehicle Networks, Systems, and Applications DroNet, Association for Computing Machinery, pp. 3–8. DOI: 10.1145/3325421.3329765
35. **Huang, Y., Wu, Q., Wang, T., Zhou, G. and Zhang, R.** (2020). *3D beam tracking for cellular-connected UAV*. IEEE Wireless Communications Letters, vol. 9, issue 5, pp. 736–740. DOI: 10.1109/LWC.2020.2968312
36. **Huang, Y., Wu, Q., Lu, R., Peng, X. and Zhang, R.** (2021). *Massive MIMO for cellular-connected UAV: challenges and promising solutions*. IEEE Communications Magazine, vol. 59, no. 2, pp. 84–90. DOI: 10.1109/MCOM.001.2000552

37. Colpaert, A., Vinogradov, E. and Pollin, S. (2020). *3D beamforming and handover analysis for UAV networks*. 2020 IEEE Globecom Workshops, GC Wkshps, pp. 1–6. DOI: 10.1109/GCWkshps50303.2020.9367570
38. Strohmeier, M., Schafer, M., Lenders, V. and Martinovic, I. (2014). *Realities and challenges of nextgen air traffic management: the case of ADS-B*. IEEE Communications Magazine, vol. 52, no. 5, pp. 111–118. DOI: 10.1109/MCOM.2014.6815901
39. Consiglio, M., Duffy, B., Balachandran, S., Munoz, C. and Glaab, L. (2019). *Sense and avoid characterization of the independent configurable architecture for reliable operations of unmanned systems*. Thirteenth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM2019). NTRS – NASA Technical Reports Server. Available at: http://www.atmseminar.org/seminarContent/seminar13/papers/ATM_Seminar_2019_paper_50.pdf (accessed 27.11.2020).
40. Marques, M., Brum, A., Antunes, S. and Mota, J.G. (2018). *Sense and avoid implementation in a small unmanned aerial vehicle*. 13th APCA International Conference on Automatic Control and Soft Computing (CONTROLO), Ponta Delgada. DOI: 10.1109/CONTROLO.2018.8514548
41. Minucci, F., Vinogradov, E. and Pollin, S. (2020). *Avoiding collisions at any (low) cost: ADS-B like position broadcast for UAVs*. IEEE Access, vol. 8, pp. 121843–121857. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3007315 (accessed 27.11.2020).
42. Lin, C.E., Shao, P.C. and Lin, Y.Y. (2020). *System operation of regional UTM in Taiwan*. Aerospace, vol. 7, issue 5, pp. 7–65. DOI: 10.3390/aerospace7050065 (accessed 27.11.2020).
43. Arshad, R., ElSawy, H., Sorour, S., Al-Naffouri, T.Y. and Alouini, M. (2017). *Velocity-aware handover management in two-tier cellular networks*. IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 16, no. 3, pp. 1851–1867. DOI: 10.1109/TWC.2017.2655517 (accessed 27.11.2020).
44. Ngo, H.Q., Ashikhmin, A., Yang, H., Larsson, E.G. and Marzetta, T.L. (2015). *Cell-free massive MIMO: uniformly great service for everyone*. 2015 IEEE 16th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), pp. 201–205. DOI: 10.1109/SPAWC.2015.7227028
45. Buzzi, S. and D'Andrea, C. (2017). *Cell-free massive MIMO: user-centric approach*. IEEE Wireless Communications Letters, vol. 6, no. 6, pp. 706–709. DOI: 10.1109/LWC.2017.2734893
46. Ngo, H.Q., Ashikhmin, A., Yang, H., Larsson, E.G. and Marzetta, T.L. (2017). *Cell-free massive MIMO versus small cells*. IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 16, no. 3, pp. 1834–1850. DOI: 10.1109/TWC.2017.2655515
47. Zhang, J., Chen, S., Lin, Y., Zheng, J., Ai, B. and Hanzo, L. (2019). *Cell-free massive MIMO: a new next-generation paradigm*. IEEE Access, vol. 7, pp. 99878–99888. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2930208 (accessed 27.11.2020).
48. D'Andrea, C., Garcia-Rodriguez, A., Geraci, G., Giordano, L.G. and Buzzi, S. (2019). *Cell-free massive MIMO for UAV communications*. 2019 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICCW.2019.8756714
49. Shokry, M., Ebrahimi, D., Assi, C., Sharafeddine, S. and Ghrayeb, A. (2020). *Leveraging UAVs for coverage in cell-free vehicular networks: a deep reinforcement learning approach*. IEEE Transactions on Mobile Computing. DOI: 10.1109/TMC.2020.2991326 (accessed 11.12.2020).
50. Vinogradov, E., Kovalev, D.A. and Pollin, S. (2018). *Simulation and detection performance evaluation of a UAV-mounted passive radar*. IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), pp. 1185–1191. DOI: 10.1109/PIMRC.2018.8580940 (accessed 11.12.2020).
51. Sallouha, H., Chiumento, A., Rajendran, S. and Pollin, S. (2019). *Localization in ultra narrow band IoT networks: design guidelines and tradeoffs*. IEEE Internet of Things Journal, vol. 6, no. 6, pp. 9375–9385. DOI: 10.1109/JIOT.2019.2931628 (accessed 11.12.2020).

52. Guvenc, I., Koohifar, F., Singh, S., Sichitiu, M.L. and Matolak, D. (2018). *Detection, tracking, and interdiction for amateur drones*. IEEE Communications Magazine, vol. 56, no. 4, pp. 75–81. DOI: 10.1109/MCOM.2018.1700455

53. Azari, M.M., Sallouha, H., Chiumento, A., Rajendran, S., Vinogradov, E. and Pollin, S. (2018). *Key technologies and system trade-offs for detection and localization of amateur drones*. IEEE Communications Magazine, vol. 56, no. 1, pp. 51–57. DOI: 10.1109/MCOM.2017.1700442

54. Hügler, P., Roos, F., Schartel, M., Geiger, M. and Waldschmidt, C. (2018). *Radar taking off: new capabilities for UAVs*. IEEE Microwave Magazine, vol. 19, no. 7, pp. 43–53. DOI: 10.1109/MMM.2018.2862558

55. Gageik, N., Benz, P. and Montenegro, S. (2015). *Obstacle detection and collision avoidance for a UAV with complementary low-cost sensors*. IEEE Access, vol. 3, pp. 599–609. DOI: 10.1109/ACCESS.2015.2432455 (accessed 27.01.2021).

56. Rozantsev, A., Lepetit, V. and Fua, P. (2017). *Detecting flying objects using a single moving camera*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 39, no. 5, pp. 879–892. DOI: 10.1109/TPAMI.2016.2564408

57. Sharov, V.D., Eliseev, B.P. and Vorobyov, V.V. (2019). *Analysis of deficiencies in the procedures for the risk management of safety in the ICAO documents*. Civil Aviation High Technologies, vol. 22, no. 2, pp. 49–61. DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-2-49-61 (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Evgenii A. Vinogradov, Doctor of Philosophy (PhD), Researcher, Electrical Engineering Chair, Faculty of Engineering, KU Leuven, evgenii.vinogradov@kuleuven.be.

Поступила в редакцию 30.12.2020
Принята в печать 25.03.2021

Received 30.12.2020
Accepted for publication 25.03.2021