

# АНАЛИЗ ОРГАНИЗАЦИИ СВЯЗИ С ПРИМЕНЕНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ МАЛОЙ ДАЛЬНОСТИ

**В. В. Каштанов, В. А. Немтинов**

*Кафедра «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»,  
nemtinov@mail.tstu.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

**Ключевые слова:** архитектура передачи сигналов; беспилотные летательные аппараты малой дальности; организация связи в чрезвычайных ситуациях; ретрансляция сигналов; характеристики каналов связи.

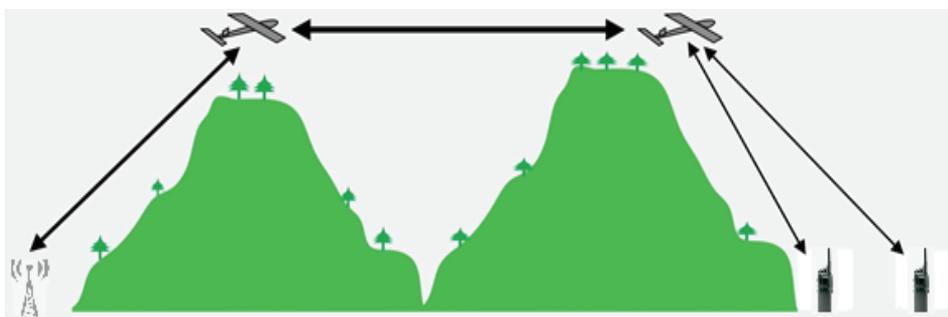
**Аннотация:** Проведен обзор на применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для ретрансляции. Дано описание базовой сетевой архитектуры и основных характеристик каналов связи. Рассмотрены различные виды передачи данных с помощью БПЛА, подход к организации связи с использованием беспилотных летательных аппаратов – ретрансляторов малой дальности, позволяющий обеспечить информационный обмен в условиях чрезвычайных ситуаций, апробация которого выполнена на примере установления связи между отдельными подразделениями во время проведения учебных мероприятий в горной местности.

---

## Введение

В настоящее время различные службы, обеспечивающие национальную безопасность РФ, проявляют большой интерес к комплексам воздушного наблюдения и мониторинга природной среды и технических объектов с использованием малогабаритных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

Благодаря высокой степени мобильности и низкой себестоимости БПЛА за последние несколько десятилетий нашли широкое применение в различных областях [1]. В первую очередь БПЛА всегда использовались в военной отрасли, выполняя различные задачи на вражеской территории и сокращая потери среди пилотов. С уменьшением стоимости и миниатюризации их компонентов малоразмерные БПЛА (с массой, обычно не превышающей 25 кг) стали доступны для более широкого применения, вследствие чего чаще используются в гражданских и коммерческих целях: мониторинг погоды, обнаружение возгораний в лесах, отслеживание автомобильных пробок, транспортировка грузов, использование в спасательных операциях, ретрансляция сигналов связи и т.д. [2]. Беспилотные летательные аппараты могут быть разделены на две категории: самолетного и вертолетного типа. Каждая из них имеет свои достоинства и недостатки. Например, БПЛА самолетного типа обладают высокой скоростью и способны нести большой вес, однако они должны поддерживать постоянное движение вперед, чтобы сохранять высоту. Как следствие, они не могут быть использованы для ряда задач, таких как тщательный осмотр местности. Беспилотные летательные аппараты вертолетного типа, напротив, обладают ограниченной степенью



**Рис. 1. Применение БПЛА для ретрансляции сигнала**

мобильности и переносимого веса, но способны осуществлять движение в любом направлении, а также оставаться в одной точке в течение длительного времени. Таким образом, выбор БПЛА зависит от цели применения.

Среди различных областей использования БПЛА их применение в качестве ретрансляторов в системах беспроводной коммуникации является одним из важнейших (рис. 1) [3]. Системы связи, использующие БПЛА, обладают важнейшим преимуществом – в отличие от наземных систем ретрансляции сигналов, их функционирование не может быть затруднено затенением городской или горной местностью или повреждением инфраструктуры связи, вызванным природными катастрофами [4].

Стоит отметить, что помимо использования БПЛА альтернативным решением для обеспечения беспроводной коммуникации является применение иных объектов, таких как, например, воздушные шары. Обычно они функционируют, находясь в стратосфере, что примерно в десятках километров над земной поверхностью. Однако БПЛА (обычно функционирующие на высоте, не превышающей нескольких километров) имеют ряд преимуществ по сравнению с подобными системами и их наземными и спутниковыми аналогами. Во-первых, применение связано с меньшими материальными затратами и более быстрой подготовкой, что делает их подходящим вариантом для кратковременного использования. Кроме того, эксплуатация БПЛА для подобных целей часто обеспечивает прямую видимость объектов связи для БПЛА, что приводит к повышению качества связи.

Высокая степень маневренности подобных аппаратов также отражается на улучшении связи благодаря возможности адаптации к особенностям местности, в которой они действуют. Более того, возможен вариант функционирования БПЛА, при котором качество связи может оказывать влияние на особенности процесса их полета. Например, при наличии стабильной связи с наземными объектами скорость полета аппарата будет уменьшаться, чтобы обеспечить передачу большего количества данных. Благодаря данным преимуществам БПЛА могут стать важнейшим компонентом систем беспроводной коммуникации в будущем.

### **Области применения**

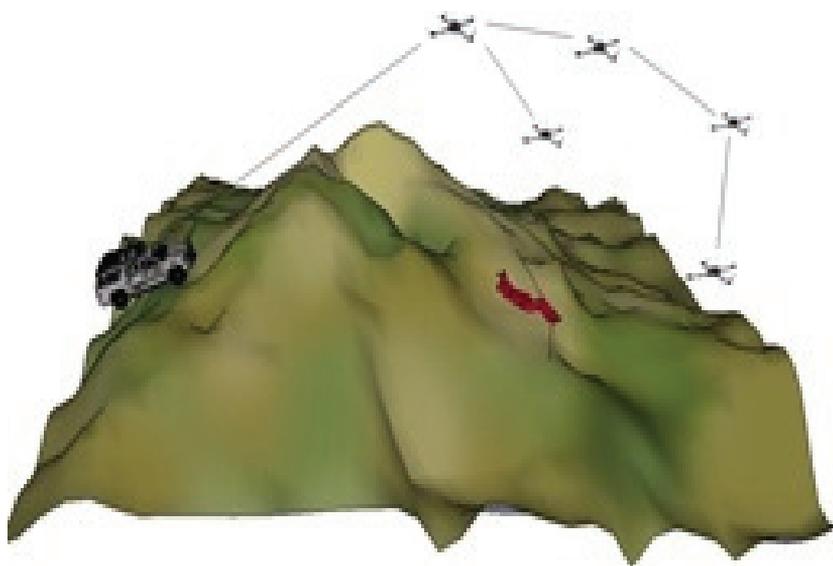
В последнее время БПЛА стали использоваться во многих областях, которые подразумевают применение аппарата в роли ретранслятора: использование в спасательных операциях, тушение лесных пожаров, аэрофотосъемка, охрана территорий, логистика и многие др. Во всех подобных вариантах применения БПЛА выполняют задачи в местах, отдаленных от наземной коммуникационной инфраструктуры, что требует наличия одного или нескольких аппаратов, выполняющих функции ретрансляции.

Использование БПЛА в спасательных и поисковых операциях способно значительно уменьшить время поиска и снизить количество жертв при катастрофах и авариях. Беспилотные летательные аппараты, благодаря их маневренности, скорости и автономности действий, способны выполнять задачи, которые не могут быть выполнены пилотируемыми аппаратами (рис. 2). При наиболее типичном сценарии БПЛА отправляются на заданную территорию, с помощью фото- и других видов съемки собирают данные о количестве обнаруженных жертв, после чего передают их спасательным командам или системам ретрансляции сигналов, в качестве которых может применяться другая группа БПЛА.

Беспилотные летательные аппараты уже доказывали свою эффективность в данном направлении, помогая спасательным командам сузить зону поиска, избегав при этом возможных опасностей. В 2006 году при поиске жертв после урагана «Катрина» два БПЛА были использованы для обнаружения людей, застрявших под завалами.

Еще одним перспективным вариантом использования БПЛА является выполнение различных задач при тушении пожаров. Пожарные службы высоко оценивают потенциал применения БПЛА. По прибытию пожарной команды к месту возгорания БПЛА могут быть использованы для того, чтобы тщательно изучить область пожара, снизив при этом риск для работников пожарной службы. Беспилотные летательные аппараты могут быть оснащены термостойкой камерой, что позволяет обнаружить с их помощью очаги возгорания. Кроме того, такие факторы, как задымленность и слабая видимость, не могут помешать их работе. Также данные аппараты могут использовать фонари и прожекторы для того, чтобы помочь пожарной команде при тушении огня в условиях слабой видимости. После тушения пожара БПЛА способны облегчить оценку ущерба от огня. Помимо этого, БПЛА способны обнаруживать лесные возгорания на ранних стадиях, что облегчает задачу по их тушению. Так, в 2017 году БПЛА был применен пожарной службой Лос-Анджелеса при тушении огромных по площади лесных пожаров, бушевавших вблизи города [5].

При тушении пожаров в отдаленных местах также необходимо применение систем ретрансляции. В условиях отсутствия соответствующей инфраструктуры на земле использование БПЛА для этих целей является наиболее рациональным решением.



**Рис. 2. Применение БПЛА в ходе поисковой операции**

### Базовая архитектура передачи сигналов

На рисунке 3 показана общая архитектура беспроводной коммуникации с помощью БПЛА, состоящая из двух типов каналов обмена информацией – каналы управления и передачи данных [3].

*Канал управления.* Данный канал связи необходим для успешного и безопасного функционирования БПЛА. Подобные каналы должны обеспечивать надежную и безопасную двустороннюю передачу информации с низкой задержкой, так как информация, передаваемая с их помощью, критически важна для работы БПЛА. При этом обмен подобной информацией может происходить как между разными БПЛА, так и между БПЛА и наземным пунктом управления. Информация, транслируемая по данному каналу, может быть разделена на 3 основные категории: команды, передаваемые БПЛА с наземных пунктов управления; отчеты о статусе аппарата, отправляемые с борта БПЛА на землю, и информация о препятствиях и опасностях, передаваемая между БПЛА. Каналы управления необходимы даже в случае использования автономных беспилотных летательных аппаратов, способных выполнять работу, используя бортовые компьютеры и не нуждаясь в постоянном контроле со стороны оператора, так как в экстренных случаях все же возникает потребность ручного управления.

Так как информация, передаваемая по каналу управления, является критически важной, она должна транслироваться с помощью защищенных спектров частот. На сегодняшний день используются два частотных диапазона – диапазон L (960...977 МГц) и диапазон C (5030...5091 МГц) [6]. Важно отметить, несмотря на то что БПЛА управляются в первую очередь с наземных пунктов, спутниковые системы также применяются для этой цели, что повышает надежность и качество связи. Еще одним ключевым вопросом является безопасность каналов управления. Отсутствие эффективных механизмов безопасности может привести к так называемому «призрачному управлению» БПЛА – ситуации, при которой управление БПЛА осуществляется неавторизованным оператором. Как следствие, для получения доступа к системам контроля БПЛА необходимы надежные методы аутентификации.



**Рис. 3. Общая архитектура коммуникации с помощью БПЛА:**

1, 2, 3 – каналы управления соответственно основной, дополнительный и передачи данных

*Канал передачи данных.* Данные каналы, напротив, предназначены для передачи информации, связанной с выполняемыми БПЛА задачами. Информация передается наземным терминалам, которыми, в зависимости от задачи, могут быть наземные станции, мобильные терминалы, узлы хранения данных, беспроводные датчики и т.д. Каналы передачи данных должны поддерживать следующие режимы связи: прямая коммуникация между БПЛА и мобильными терминалами, в случаях перегрузки или отказа наземных станций; связь между БПЛА и наземными станциями и между БПЛА и узлами хранения данных, а также связь между двумя БПЛА. Требования к скорости передачи данных зависят от цели и могут варьироваться от нескольких кБ/с для передачи между БПЛА и датчиками до десятков ГБ/с для связи между БПЛА и узлами хранения данных. В сравнении с каналами управления, к каналам передачи данных не предъявляется настолько жесткие требования к возможным задержкам и безопасности передачи. Что касается используемого диапазона частот, он, как правило, зависит от конкретных задач БПЛА. Например, при обеспечении покрытия сотовой связи БПЛА используют частоты диапазона LTE. Однако возможно использование и других диапазонов частот, например, диапазона миллиметровых волн для обеспечения устойчивой связи между двумя БПЛА [7].

### **Характеристики каналов связи**

Для каналов связи характерно наличие двух типов передачи информации: БПЛА–земля и БПЛА–БПЛА. Оба типа обладают характеристиками, выделяющими их на фоне передачи между наземными системами.

*Передача типа БПЛА–земля.* Данный тип передачи несколько отличается, по сравнению с передачей информации наземным объектам, от пилотируемых летательных аппаратов [6, 8]. В отличие от подобных аппаратов, передающих сигналы наземным пунктам, расположенным на открытой местности и имеющим мощные антенные системы, БПЛА вынуждены осуществлять передачу в районах, где подобная инфраструктура чаще всего отсутствует. Несмотря на преимущество в виде возможности установления прямой видимости с объектами передачи, различные препятствия в виде рельефа местности, зданий или корпуса аппарата могут затруднять передачу. В частности, исследования показывают, что в случае выполнения БПЛА маневров задержка в передаче данных, обусловленная возникновением препятствия в виде корпуса БПЛА, может составлять до десятков секунд, что должно учитываться при планировании задач БПЛА [8]. В случае использования низколетящих БПЛА связь также может быть затруднена по причине преломления, рассеивания и отражения сигнала от гор, земной поверхности, листвы деревьев и т.д. При выполнении БПЛА своих задач над пустыней или морем передачу сигнала затрудняют только отражения от поверхности. При этом возникающие затухания могут быть описаны рэйсовым моделью затухания, характеризующей воздействие рассеянного компонента сигнала на передачу при наличии прямой видимости между объектами передачи. В зависимости от условий местности, где расположены объекты связи, и используемой частоты, степень воздействия рэйсовых факторов может варьироваться. Таким образом, отношение между передаваемыми сигналами и их рассеиваемыми компонентами может принимать значение около 15 дБ для диапазона L и 28 дБ для диапазона C при действии БПЛА в холмистой местности [6].

*Передача типа БПЛА–БПЛА.* При передаче данных между БПЛА объекты передачи чаще всего находятся в прямой видимости. Несмотря на то что отражения сигнала от поверхности могут в некоторой степени вызывать затухание, их

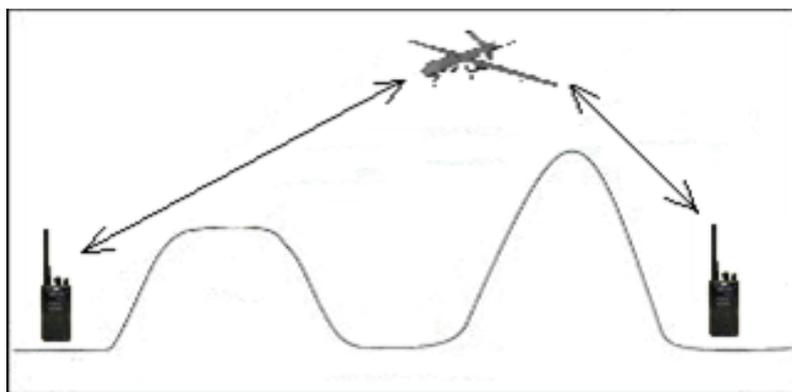
влияние гораздо слабее, чем при передаче БПЛА–земля или при передаче между наземными объектами. Однако в этом случае наблюдается гораздо более сильное влияние доплеровского эффекта, чем при передаче сигнала между БПЛА и наземными объектами, благодаря высоким значениям относительной скорости БПЛА. Данные факторы необходимо учитывать при выборе частотного диапазона для связи между БПЛА. С одной стороны, благодаря почти постоянному наличию прямой видимости между объектами передачи возможно использование миллиметрового диапазона в целях обеспечения устойчивой связи между БПЛА, с другой – при использовании данного диапазона может наблюдаться высокая степень доплеровского сдвига частот, обусловленная большими значениями относительной скорости БПЛА. Благодаря своим особенностям данный вид передачи на сегодняшний день является предметом многих исследований, направленных на поиск эффективных методов его применения.

#### **Адаптация и практическая апробация методов использования БПЛА для ретрансляции сигналов связи**

Представленные методы использования БПЛА адаптированы для ретрансляции сигналов связи и были применены в ходе командно-штабных учений, основной целью которых являлась проверка степени готовности руководящего состава и органов военного управления объединенного стратегического командования Южного военного округа, командного состава воинских контингентов, тактических (оперативных) групп к управлению группировками войск (сил), соединениями и подразделениями в ходе совместных операций по локализации и разрешению вооруженных конфликтов, связанных с противодействием терроризму.

Основная часть учений проходила в горной местности. Наличие горного рельефа часто затрудняет использование традиционных схем связи, так как горные структуры обычно являются препятствием на пути радиоволн. В подобных условиях применение для этих целей БПЛА является наиболее рациональным шагом (рис. 4).

В ходе испытаний БПЛА поставленной задачей являлось установление связи с подразделениями по другую сторону горного массива. Попытки установить связь традиционными методами не принесли значимых результатов. Очевидно, что причина была в горных структурах, отражающих и рассеивающих радиоволны. В связи с этим применен низколетящий БПЛА типа DJI Mavic Pro 2 с навесным оборудованием для ретрансляции радиосигналов SURECOM SR-112.



**Рис. 4. Использование БПЛА для ретрансляции сигналов в горной местности**

Подобный шаг обеспечил успешное выполнение поставленной задачи – между подразделениями по разные стороны горного массива была установлена устойчивая (разборчивость речи составляет 100 %) и стабильная радиосвязь.

### Заключение

Проанализированы общие принципы функционирования БПЛА при их применении для мониторинга погоды, обнаружения возгораний в лесах, отслеживания автомобильных пробок, транспортировки грузов, использования в спасательных операциях и т.д. Дано описание преимуществ и недостатков подобного использования БПЛА, общей архитектуры систем коммуникации и место БПЛА в ней, а также общих характеристик каналов связи и видов передачи данных.

Одним из перспективных направлений использования БПЛА является ретрансляция сигналов при передаче данных. Представленные методы использования БПЛА адаптированы для ретрансляции сигналов связи и апробированы при установлении связи между подразделениями во время проведения учебных мероприятий в условиях горной местности. Дальнейшие исследования в данной области способны обеспечить совершенствование систем беспроводной коммуникации и более эффективное использование БПЛА в подобных системах.

#### *Список литературы*

1. Valavanis, K. P. Handbook of Unmanned Aerial Vehicles / K. P. Valavanis, G. J. Vachtsevanos. – Springer Netherlands, 2015. – 3022 p.
2. Unmanned Aircraft System (UAS) Service Demand 2015 – 2035: Literature Review & Projections of Future Usage. – Текст : электронный // US Department of Transportation. – 2013. – 151 p. – URL : <https://info.publicintelligence.net/USAF-UAS-ServiceDemand.pdf> (дата обращения: 31.10.2022).
3. Zeng, Y. Wireless Communications with Unmanned Aerial Vehicles: Opportunities and Challenges / Y. Zeng, R. Zhang, T. J. Lim // IEEE Communications Magazine. – 2016. – Vol. 54, No. 5. – P. 36 – 42. doi: 10.1109/MCOM.2016.7470933
4. Merwaday, A. UAV Assisted Heterogeneous Networks for Public Safety Communications / A. Merwaday, I. Guvenc // Proceedings IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops, 09 – 12 March 2015, New Orleans, LA, USA. – IEEE, 2015. – P. 329 – 334. doi: 10.1109/WCNCW.2015.7122576
5. Vimalkular, R. Design and Development of Heavy Drone for Fire Fighting Operation / R. Vimalkular, K. K. Shaw // International Journal of Engineering and Technical Research. – 2020. – Vol. 9, No. 6. – P. 572 – 576. doi: 10.17577/IJERTV9IS060433
6. Matolak, D. W. Unmanned Aircraft Systems: Air-Ground Channel Characterization for Future Applications / D. W. Matolak, R. Sun // IEEE Vehicular Technology Magazine. – 2015. – Vol. 10, No. 2. – P. 79 – 85. doi: 10.1109/MVT.2015.2411191
7. Millimeter Wave Wireless Communications / T. S. Rappaport, R. C. Heath, J. Daniels, J. N. Murdock. – Prentice Hall, 2014. – 704 p.
8. Sun, R. Initial Results for Airframe Shadowing in L- and C-band Air-Ground Channels / R. Sun, D. W. Matolak // Proceedings Integrated Communication, Navigation and Surveillance Conference, 21 – 23 April 2015, Herdon, VA, USA. – IEEE, 2015. – P. 1 – 8. doi: 10.1109/ICNSURV.2015.7121271

## The Analysis of the Organization of Communication Using Small-Range Unmanned Aerial Vehicles

V. V. Kashtanov, V. A. Nemtinov

*Department of Computer-Integrated Systems in Mechanical Engineering,  
nemtinov@mail.tstu.ru; TSTU, Tambov, Russia*

**Keywords:** architecture of signal transmission; short-range unmanned aerial vehicles; organization of communication in emergency situations; signal relaying; characteristics of communication channels.

**Abstract:** A review was made on the use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for relaying. The description of the basic network architecture and the main characteristics of communication channels are given. Various types of data transmission using UAVs and an approach to organizing communication using unmanned aerial vehicles - short-range repeaters, which allow for information exchange in emergency situations, the approbation of which was carried out through the example of establishing communication with between individual units during training events under conditions mountainous area are considered.

### References

1. Valavanis K.P., Vachtsevanos G.J. *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*, Springer Netherlands, 2015, 3022 p.
2. <https://info.publicintelligence.net/USAF-UAS-ServiceDemand.pdf> (accessed 31 October 2022).
3. Zeng Y., Zhang R., Lim T. J. Wireless Communications with Unmanned Aerial Vehicles: Opportunities and Challenges, *IEEE Communications Magazine*, 2016, vol. 54, no. 5, pp. 36-42, doi: 10.1109/MCOM.2016.7470933
4. Merwaday A., Guvenc I. UAV Assisted Heterogeneous Networks for Public Safety Communications, Proceedings IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops, 09 - 12 March 2015, New Orleans, LA, USA, IEEE, 2015, pp. 329-334, doi: 10.1109/WCNCW.2015.7122576
5. Vimalkular R., Shaw K.K. Design and Development of Heavy Drone for Fire Fighting Operation, *International Journal of Engineering and Technical Research*, 2020, vol. 9, no. 6, pp. 572-576, doi: 10.17577/IJERTV9IS060433
6. Matolak D.W., Sun R. Unmanned Aircraft Systems: Air-Ground Channel Characterization for Future Applications, *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2015, vol. 10, no. 2, pp. 79-85, doi: 10.1109/MVT.2015.2411191
7. Rappaport T.S., Heath R.C., Daniels J., Murdock J.N. *Millimeter Wave Wireless Communications*, Prentice Hall, 2014, 704 p.
8. Sun R., Matolak D.W. Initial Results for Airframe Shadowing in L- and C-band Air-Ground Channels, Proceedings Integrated Communication, Navigation and Surveillance Conference, 21 - 23 April 2015, Herdon, VA, USA, IEEE, 2015, pp. 1-8, doi: 10.1109/ICNSURV.2015.7121271

---

### Analyse der Organisation der Kommunikation bei der Verwendung von unbemannten Luftfahrzeugen der kurzen Reichweite

**Zusammenfassung:** Es ist eine Überprüfung der Verwendung von unbemannten Luftfahrzeugen (UAVs) für die Weiterleitung vorgenommen. Die Beschreibung der grundlegenden Netzwerkarchitektur und der Hauptmerkmale

von Kommunikationskanälen ist gegeben. Es sind verschiedene Arten der Datenübertragung mit UAVs untersucht, der Ansatz zur Organisation der Kommunikation mit unbemannten Luftfahrzeugen – Kurzstrecken-Repeatern, der den Informationsaustausch in Notfallsituationen ermöglicht, dessen Bewährung am Beispiel des Aufbaus der Kommunikation zwischen einzelnen Einheiten bei Trainingsveranstaltungen unter Bergbedingungen getestet worden ist.

---

### **Analyse des communications avec les drones de courte portée**

**Résumé:** Est exécuté un examen de l'utilisation des véhicules aériens sans pilote (VASP) pour la retransmission. Est donnée une description de l'architecture du réseau de base et des caractéristiques de base des canaux de communication. Sont examinés les différents types de transmission des données par VASP, l'approche envers l'organisation de la communication avec l'utilisation des véhicules aériens sans pilote-répéteurs à courte portée, permettant l'échange d'informations dans les situations d'urgence, dont l'approbation a été testée à l'exemple de l'établissement des liens avec des unités individuelles lors des activités de formation dans des conditions de terrain montagneux.

---

**Авторы:** *Каишанов Вячеслав Вячеславович* – магистрант; *Немтинов Владимир Алексеевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.