

УДК 631.5

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СЕТЕВЫХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ИНТЕГРАЦИИ БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ В ЦИФРОВУЮ ИНФРАСТРУКТУРУ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА**

Куцевалов Дмитрий Сергеевич  
*ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ, г. Краснодар, РФ*  
 E-mail: [kutdmity@gmail.com](mailto:kutdmity@gmail.com)

Крепышев Дмитрий Александрович  
 доцент, канд. экон. наук  
*ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ, г. Краснодар, РФ*

Развитие цифрового сельского хозяйства сопровождается активным внедрением беспилотных авиационных систем (БАС). Ключевой проблемой является обеспечение стабильной связи для передачи больших объемов данных в реальном времени. В статье представлен сравнительный анализ трёх сетевых архитектур: 4G, 5G и самоорганизующихся Ad-Hoc сетей. Анализ выполнен по системе критериев, включающей технические, экономические и эксплуатационные параметры. Определены границы эффективного применения каждой технологии и сформулированы рекомендации по их использованию в зависимости от агротехнологических задач и экономических условий сельхозпредприятия

Ключевые слова: 5G, 4G, AD-HOC СЕТИ, БЕСПИЛОТНЫЕ АВИАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ (БАС), ТОЧНОЕ ЗЕМЛЕДЕЛИЕ, СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ, СЕТЕВАЯ ИНФРАСТРУКТУРА

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-215-024>

UDC 631.5

4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex

**THE ROLE OF LOW-LATENCY 5G NETWORKS IN THE DEVELOPMENT OF UNMANNED TECHNOLOGIES FOR AGRICULTURAL MONITORING AND FIELD PROCESSING**

Kutsevalov Dmitry Sergeevich  
*FSBEI HE Kuban SAU, Krasnodar, Russia*  
 E-mail: kutdmity@gmail.com

Krepyshev Dmitry Alexandrovich  
 Senior lecturer  
*FSBEI HE Kuban SAU*

The development of digital agriculture is accompanied by the active introduction of unmanned aerial systems (UAS). The key challenge is to ensure stable communication for the transmission of large amounts of data in real time. This article presents a comparative analysis of three network architectures: 4G, 5G, and self-organizing Ad-Hoc networks. The analysis is based on a system of criteria that includes technical, economic, and operational parameters. The article identifies the boundaries of effective application for each technology and provides recommendations for their use based on the agronomic objectives and economic conditions of the agricultural enterprise

Keywords: 5G, UNMANNED AERIAL SYSTEMS, PRECISION AGRICULTURE, FIELD MONITORING, LOW LATENCY, REAL-TIME DATA TRANSMISSION

## Введение

Современные сельхозпредприятия стоят перед выбором оптимального технологического решения для интеграции БАС в свои бизнес-процессы [7]. Если ранее основным ограничением были возможности самих беспилотников, то сегодня «узким местом» становится канал связи. Существующие сотовые сети 4G демонстрируют недостаточную производительность для задач, требующих работы в

реальном времени, в то время как развертывание сетей 5G сопряжено с высокими затратами [1]. Альтернативой являются децентрализованные Ad-Hoc сети, не зависящие от операторов связи, но имеющие свои технологические ограничения. Целью данной работы является проведение объективного сравнительного анализа сетевых решений (4G, 5G, Ad-Hoc) для определения их эффективности при решении типовых задач мониторинга и управления в точном земледелии.

## Основная часть

Для выбора оптимального сетевого решения при построении систем мониторинга на основе БАС необходим комплексный анализ технических, экономических и эксплуатационных аспектов. Проведена сравнительная оценка трёх ключевых технологий: сетей 4G/LTE-Advanced, 5G и самоорганизующихся Ad-Hoc/Mesh-сетей.

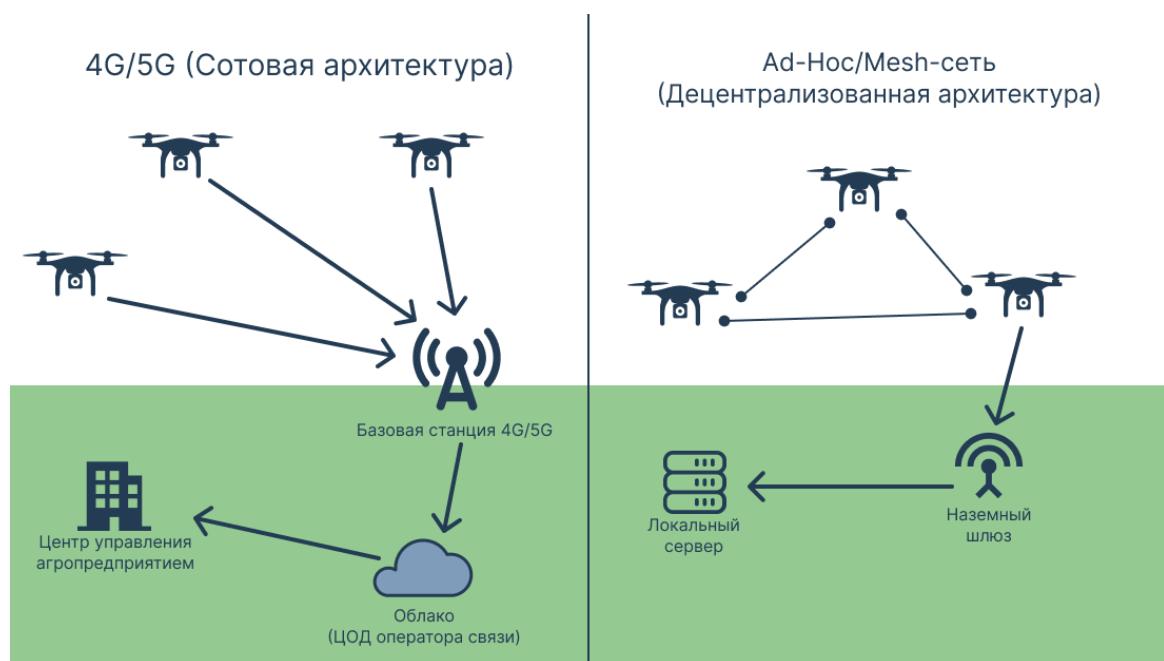


Рисунок 1 – Сравнение архитектур сетевых решений для БАС

На Рисунке 1 наглядно представлены принципиальные архитектурные различия рассматриваемых сетевых решений. Сотовая модель (4G/5G) реализует классическую звездообразную топологию, где каждый БАС устанавливает прямое соединение с базовой станцией

оператора связи. Такая архитектура обеспечивает высокую пропускную способность и стабильность соединения, однако создает полную зависимость от инфраструктуры. В противоположность этому, Ad-Hoc/Mesh-сеть функционирует по полностью децентрализованному принципу. В данной архитектуре беспилотные аппараты образуют динамическую сеть, ретранслируя данные друг другу, что позволяет создавать коммуникационные системы в условиях отсутствия традиционной инфраструктуры связи. Преимуществами такого подхода являются высокая автономность и отказоустойчивость, однако эти преимущества достигаются ценой увеличения задержки передачи данных. Эти различия определяют эксплуатационные характеристики, систематизированные в Таблице 1.

Таблица 1 - Сравнительные характеристики сетевых технологий

Параметр для сравнения	4G / LTE-Advanced	5G	Ad-Hoc / Mesh-сети
Пропускная способность	До 1 Гбит/с	До 20 Гбит/с	10-500 Мбит/с на узел
Задержка (Latency)	30 - 50 мс	1 - 4 мс	Нестабильная, от 10 до 100+ мс
Зона покрытия	Широкая, но с "мёртвыми зонами" в сельской местности	Требует плотного размещения базовых станций	Создается дронами; 1-5 км на звено
CAPEX (Капитальные затраты)	5–20 тыс. руб./БАС (модем, антенна)	Станция: от 4 млн руб. БАС: 30+ тыс. руб./узел	Оборудование: 10–50 тыс. руб./узел
OPEX (операционные расходы)	Абонплаты: 500–2000 руб./БАС (трафик)	1 000 – 3000 руб./БАС + дорогое обслуживание	500 руб./БАС (электроэнергия)
Трудозатраты на развертывание	Низкие, примерно 2000 руб./час	Проектирование и монтаж от 3 000–5 000 руб./задачу	Средние: 1500–2000 руб./узел
Гибкость и автономность	Низкая (зависимость от оператора)	Низкая. Зависимость от инфраструктуры.	Очень высокая (независимая сеть)
Масштабируемость	Линейная (в зоне покрытия)	Ограничена плотностью сети.	Ограничена пропускной способностью
Пригодность для группового управления (роем)	Ограниченнная (высокая задержка, коллизии)	Полная (идеальна для роя)	Хорошая (непредсказуемая задержка)

Примечание: Стоимостные показатели (CAPEX, OPEX) являются ориентировочными расчётными оценками на основе анализа среднерыночных цен на оборудование и услуги связи в РФ в 2024-2025 гг. и могут варьироваться в зависимости от региона, поставщика и масштаба проекта.

Архитектурные подходы, рассматриваемые в исследованиях по сетям для БАС [2], демонстрируют различные преимущества и стоимостные профили. Сети 4G/LTE-Advanced отличаются простотой и низкими стартовыми затратами (CAPEX), однако высокие операционные расходы (OPEX) на трафик и технические ограничения (задержка, риск коллизий [3]) делают их пригодными лишь для базового мониторинга одиночных БАС.

Технология 5G обладает беспрецедентными техническими характеристиками: сверхнизкая задержка и высокая пропускная способность позволяют реализовать сложные сценарии, такие как координация роя дронов [4]. Однако экстремально высокие капитальные затраты на инфраструктуру и повышенные OPEX ограничивают применение технологии, делая её экономически оправданной в основном для крупных агрохолдингов [7].

Ad-Hoc/Mesh-сети обеспечивают максимальную автономность и минимальные OPEX, оставаясь незаменимыми для мониторинга удаленных территорий [5]. Наряду с пригодностью для группового управления, технология имеет недостатки: нестабильная задержка, снижение пропускной способности с ростом сети и повышенное энергопотребление, компенсируемое отсутствием абонентской платы.

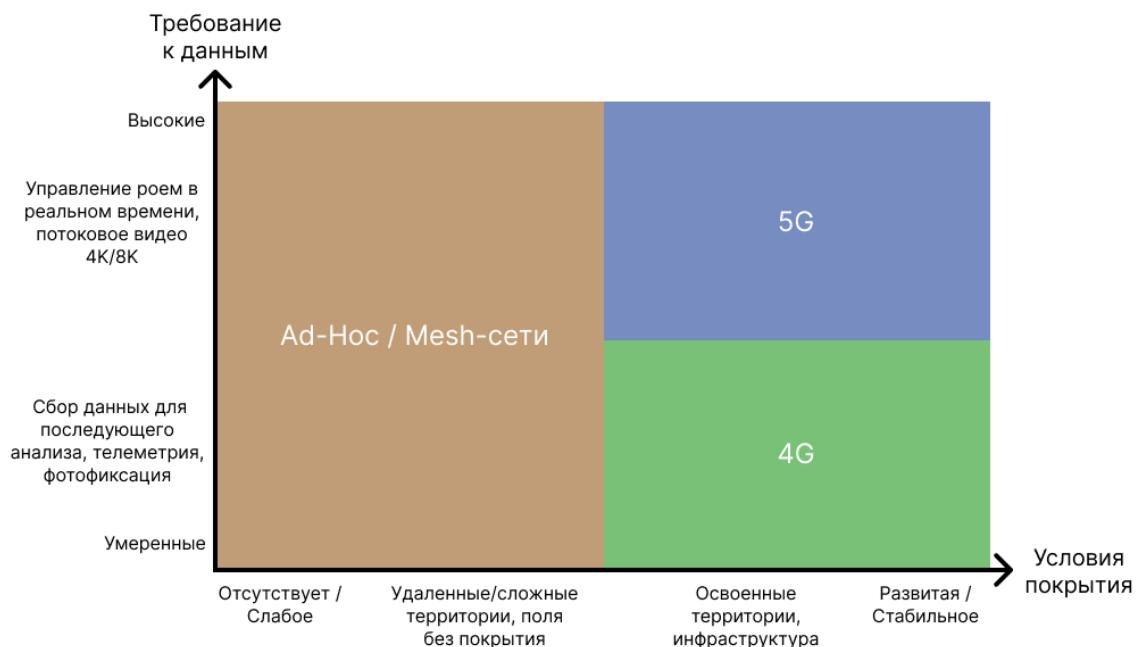


Рисунок 2 - Матрица выбора сетевого решения для БАС в зависимости от операционных задач и условий эксплуатации

На Рисунке 2 представлены три ключевые технологии, каждая из которых занимает определенную нишу. Ad-Hoc/Mesh-сети доминируют при отсутствии инфраструктуры, 5G оптимальна для задач с максимальными требованиями к производительности, а 4G остается решением для базового мониторинга.

На основе проведенного анализа и с учетом экономических аспектов [6] сформулированы рекомендации:

1. Для эпизодического мониторинга одиночным БАС в зоне покрытия 4G оптимально использование сетей 4G.
2. Для высокоинтенсивных операций в реальном времени на оснащенных предприятиях целесообразно развертывание частных сетей 5G [7].
3. Для работы в удаленных районах без сотовой связи основным решением являются Ad-Hoc/Mesh-сети.
4. Перспективным направлением считается разработка гибридных моделей (5G + Ad-Hoc) [7].

Такой подход позволяет объективно оценить потенциал технологий и сделать правильный выбор.

## **Заключение**

Проведенный сравнительный анализ показал, что не существует универсального сетевого решения для интеграции БАС в сельское хозяйство. Каждая из рассмотренных технологий имеет четко очерченную область эффективного применения, определяемую техническими требованиями агротехнологических операций и экономическими возможностями хозяйства. Выбор технологии должен основываться на тщательном анализе конкретных задач, таких как требуемая оперативность данных, площадь покрытия и бюджет проекта. Дальнейшие исследования целесообразно направить на разработку моделей гибридных сетевых архитектур [2, 6, 7] и адаптивных алгоритмов управления, способных динамически перераспределять трафик между различными каналами связи для достижения максимальной надежности и экономической эффективности.

## **Список литературы**

1. Гриднев А.Е., Карпов Л.К. Беспилотные авиационные системы в точном земледелии // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2022. – № 4. – С. 23-28.
2. Иванов А.А., Петров С.К. Цифровая трансформация агропромышленного комплекса: современные вызовы и перспективы // Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий. – 2022. – № 5. – С. 38-45.
3. Малашин Н.В., Паличев Д.К. Развитие и применение беспроводных сетей связи в сельском хозяйстве для удаленного управления техническими средствами // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2021. – № 3. – С. 34-39.
4. Сафонов М.П., Орлов В.Г. Точное земледелие: технологии и экономическая эффективность // Экономика сельскохозяйственных предприятий. – 2020. – № 7. – С. 41-48.
5. Тюрина В.А. Применение беспилотных летательных аппаратов для мониторинга сельскохозяйственных земель // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. – 2022. – № 6. – С. 45-51.
6. Юхнюк П.П. Тенденции изучения современных информационно-коммуникационных технологий сельского хозяйства в странах постсоветского

пространства: библиометрический анализ // Агроинформатика. – 2021. – № 4. – С. 25-34.

7. Золкин А. Л. Разработка и развёртывание средств сбора и диспетчеризации информации в агрокомплексах // Сельскохозяйственные технологии и автоматизация. – 2023. – № 2. – С. 52–59.

## References

1. Gridnev A.E., Karpov L.K. Bespilotnye aviacionnye sistemy v tochnom zemledelii // Sel'skoxozyajstvennye mashiny i texnologii. – 2022. – № 4. – S. 23-28.
2. Ivanov A.A., Petrov S.K. Cifrovaya transformaciya agropromyshlennogo kompleksa: sovremennye vy'zovy i perspektivy // Ekonomika sel'skoxozyajstvennyx i pererabatyvayushhix predpriyatiy. – 2022. – № 5. – S. 38-45.
3. Malashixin N.V., Palichev D.K. Razvitie i primenenie besprovodnyx setej svyazi v sel'skom xozyajstve dlya udalennogo upravleniya texnicheskimi sredstvami // Sel'skoxozyajstvennye mashiny i texnologii. – 2021. – № 3. – S. 34-39.
4. Safronov M.P., Orlov V.G. Tochnoe zemledelie: texnologii i ekonomiceskaya effektivnost // Ekonomika sel'skoxozyajstvennyx predpriyatiy. – 2020. – № 7. – S. 41-48.
5. Tyurina V.A. Primenenie bespilotnyx letatel'nyx apparatov dlya monitoringa sel'skoxozyajstvennyx zemel // Zemleustrojstvo, kadastr i monitoring zemel'. – 2022. – № 6. – S. 45-51.
6. Yuxnyuk P.P. Tendencii izucheniya sovremennyx informacionno-kommunikacionnyx texnologij sel'skogo xozyajstva v stranakh postsovetskogo prostranstva: bibliometricheskij analiz // Agroinformatika. – 2021. – № 4. – S. 25-34.