

Планирование городского низколетного пространства: элементы, пути реализации и планировочные решения для координации «земля — воздух»

Хуан Цзяньчжун, Хэ Цзявэнь, Чжан Вэйцун, Сяо Цзопэн, У Чжицян

Аннотация. Развитие экономики низколетного пространства порождает новые требования к комплексному использованию наземных территорий и воздушного пространства. В контексте планирования городского низколетного пространства координация «земля — воздух» становится необходимым условием формирования эффективных сетей низколетного обслуживания. Однако существующие исследования преимущественно сосредоточены на технических аспектах и не содержат системного анализа элементов и путей реализации с позиций пространственной организации. На примере логистики доставки дронами, с использованием методов аналитического обзора литературы и исследования практических кейсов, в настоящей статье проанализированы элементы, характеристики и пути реализации координации «земля — воздух», рассмотрены практические трудности и предложены соответствующие стратегии планирования. Установлено, что координация «земля — воздух» характеризуется следующими особенностями: многосубъектная координация сценариев, многокритериальная координация сетей и многоуровневая координация узлов. В аспекте реализации она следует логике, включающей: определение потребностей и формирование спектра сервисных сценариев; привязку наземных элементов и организацию маршрутных сетей; интеграцию узловых объектов в застроенную среду. На этом основании сформулированы рекомендации для городского низколетного планирования: выявлять реальные потребности и продвигать иерархическое планирование; совершенствовать управление воздушным пространством и координировать развитие маршрутов; формировать инновационные механизмы управления и интегрировать объекты в сеть. Указанные меры призваны обеспечить пространственные условия для скоординированного развития наземных и воздушных операций.

Ключевые слова: экономика низколетного пространства; доставка дронами; координация «земля — воздух»; новая инфраструктура; новые производительные силы

После включения экономики низколетного пространства в «Контур государственного комплексного трёхмерного транспортного каркаса» (2021) [1] низколетная лётная деятельность стремительно стимулировала развитие смежных отраслей, включая производство летательных аппаратов [2]. Технологии находят применение в различных областях: логистическая доставка, инспекция инфраструктуры, аварийно-спасательные операции, сельскохозяйственные работы, культурно-туристическая сфера. Среди них наиболее динамично развивается доставка дронами, чему способствует деятельность таких компаний, как China Post, JD.com, Meituan и SF Express. Услуги доставки дронами всё активнее применяются в условиях высокоплотной городской коммерческой застройки, отдалённых сельских районов, туристических зон, промышленных парков, островных территорий и зон ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций,

обеспечивая оперативную доставку продуктов питания, скоропортящихся товаров, медикаментов и экстренных материалов. В сравнении с традиционными логистическими системами доставка дронами в меньшей степени зависит от наземной транспортной инфраструктуры, способна преодолевать географические барьеры и существенно повышать эффективность перевозок. Будучи значимым примером вклада экономики низколётного пространства в развитие новых производительных сил [2], доставка дронами стала ключевым феноменом, требующим внимания при планировании городского низколётного пространства.

Стремительное распространение доставки дронами свидетельствует о том, что низколётные ресурсы способны эффективно связывать и реорганизовывать наземные системы предложения и спроса [3–5]. Несмотря на то что дроны и низколётные полёты выступают основными носителями и операционными моделями низколётной логистики, их функционирование по-прежнему в значительной мере опирается на наземные объекты, операторов, информационные системы и пространственные условия. Лётные маршруты и взлётно-посадочные объекты также ограничены наземными факторами. Следовательно, доставка дронами представляет собой не просто процесс соединения и транспортировки в воздушном пространстве, а является расширением наземных ресурсов в низколётное пространство и пространственным встраиванием воздушных ресурсов в городскую среду. Иными словами, развитие экономики низколётного пространства неотделимо от наземных пространственных систем, а исследование низколётных перевозок должно акцентировать скоординированные отношения между наземными и воздушными системами.

Обзор существующих исследований координации «земля — воздух» в развитии низколётного пространства позволяет выделить три основных направления. Во-первых, изучается влияние наземных ресурсов и систем управления на пропускную способность воздушного пространства [6], оценку рисков [7], планирование маршрутов [8–9] и операционное управление [10–11]. Во-вторых, исследуется координация дронов с наземными транспортными средствами [12], включая взаимодействие с грузовиками [13], электромобилями [14–15], беспилотными автомобилями [16] и роботами [17]. В-третьих, анализируются стратегии оптимизации размещения узлов [18–19], проектирования маршрутов и распределения задач с позиций координации «земля — воздух» [20–21]. Тем не менее существующие исследования преимущественно сосредоточены в области авиации и транспорта, делая акцент на разработке алгоритмов и технологической оптимизации. При этом сравнительно мало работ используют реальные примеры для исследования пространственной организации координации «земля — воздух», включая состав наземных и воздушных элементов, механизмы координации и планировочные импликации. Соответственно, взаимосвязь между землепользованием, пространственным развитием, конфигурацией инфраструктуры и низколётным планированием остаётся недостаточно изученной.

Для устранения данного пробела в настоящем исследовании проанализированы структурные элементы и технические требования координации «земля — воздух» при низколётных полётах, выявлены характеристики и внутренние механизмы координации при доставке дронами. На основе изучения практических кейсов ведущих предприятий исследованы пути реализации координации «земля — воздух», обсуждены практические вызовы и предложены планировочные решения. Цель

работы — предоставить методологические и политические ориентиры для интеграции координации «земля — воздух» в практику городского низколётного планирования.

1. Элементы и требования координации «земля — воздух»

1.1. Элементы и технические требования координации «земля — воздух» при низколётных полётах

В понятийном отношении координация «земля — воздух» восходит к более широкой концепции «Интегрированной космическо-воздушно-наземной сети» (Space-Air-Ground Integrated Network, SAGIN) [13, 17, 22] (рис. 1). Данная архитектура опирается на коммуникационные и информационные системы, обеспечиваемые космическими технологиями, в сочетании с наземными инфраструктурными системами и унифицированными стандартами данных, что позволяет осуществлять обмен информацией в реальном времени и скоординированное распределение полётных задач во временном и пространственном измерениях. Благодаря интеграции и использованию разнородных ресурсов она обеспечивает транспортную деятельность с участием пилотируемых воздушных судов, дронов и дирижаблей, формируя тем самым эффективную и устойчивую систему координированного функционирования [24].

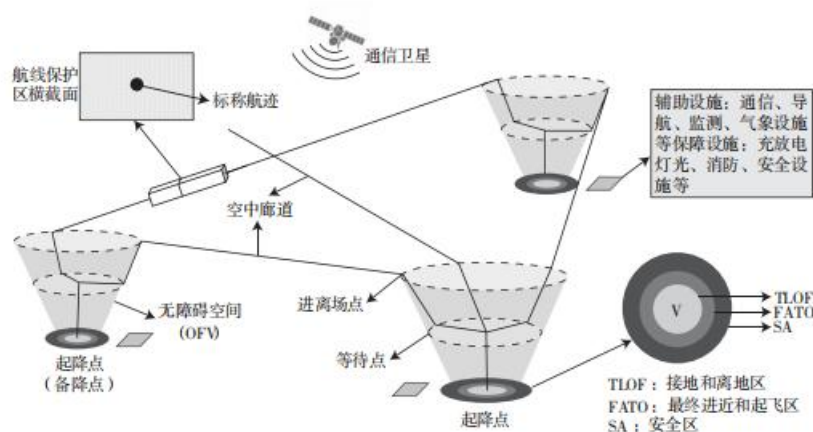


Рис. 1. Система координации «земля — воздух» и её элементы для низколётных полётов

Воздушная система включает преимущественно: свободные от препятствий объёмы (Obstacle-Free Volumes, OFV), необходимые для вертикального взлёта и посадки летательных аппаратов; воздушные коридоры, соединяющие различные точки взлёта и посадки; классификацию воздушного пространства, устанавливаемую для обеспечения безопасности полётов. Под свободным от препятствий объёмом понимается воронкообразная воздушная зона над площадкой вертикального взлёта и посадки, предназначенная для снижения воздействия окружающей среды, шума и препятствий на операции летательных аппаратов [25].

Воздушное пространство, как правило, подразделяется по уровням разрешённости полётов на: зоны разрешённых полётов, контролируемые зоны и запретные зоны. Лётные маршруты обычно пролегают в пределах разрешённых зон, где полёты дронов могут осуществляться без дополнительных процедур согласования; контролируемые зоны требуют предварительного разрешения; запретные зоны исключают любую дронную активность. Наземная система преимущественно представлена взлётно-посадочными объектами, обеспечивающими операции дронов по погрузке, разгрузке

грузов и посадке пассажиров. К ним относятся: хабово-ориентированные посадочные площадки; пункты выдачи или точки спуска грузов; аварийные посадочные зоны, резервируемые на случай неблагоприятных метеоусловий или электромагнитных помех. В пространственном отношении взлётно-посадочные объекты включают: зоны наземного контакта и взлёта (TLOF), зоны конечного захода и взлёта (FATO), охранные зоны (SA) и сопутствующую инфраструктуру [22]. Зона TLOF обеспечивает физическую платформу для посадки и взлёта воздушного судна [26]; зона FATO поддерживает режимы зависания, посадки и взлёта; охранные зоны служат защитными буферными пространствами, снижающими риски, связанные с отклонениями от рабочих зон [25]. Вспомогательные объекты включают парковочные места, системы связи и навигации, мониторинга и метеорологического обеспечения, командные центры, платформы обработки данных, складские зоны, зарядные станции, осветительные системы и противопожарное оборудование. В совокупности указанные элементы формируют базовую пространственную основу координации «земля — воздух» при низколётных полётах.

1.2. Характеристики и внутренние требования координации «земля — воздух» при доставке дронами

Представленная выше модель раскрывает ключевые элементы систем координации «земля — воздух» в низколётных полётах в вертикальной перспективе и уточняет технические требования к координации между элементами. Вместе они задают фундаментальную операционную модель координации «земля — воздух» (рис. 2). Вместе с тем с точки зрения реальных операций доставки дронами координация «земля — воздух» включает более сложные измерения и требования.

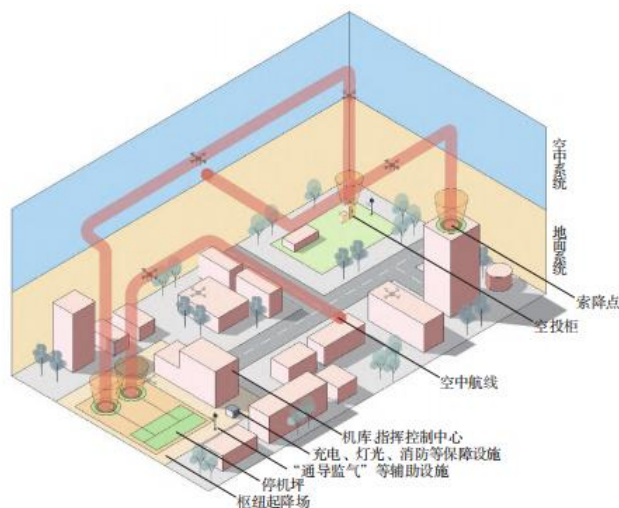


Рис. 2. Схема системы низколётных полётов с координацией «земля — воздух»

1.2.1. Многосубъектная координация сценариев

Доставка с помощью дронов, по сути, представляет собой логистическую услугу, предоставляемую третьей стороной, которая связывает поставщиков товаров и потребителей (рис. 3). Таким образом, основное значение координации «земля-воздух» заключается в согласовании товаров, участников рынка спроса и предложения, а также пространственных сценариев в рамках процессов доставки с помощью дронов.

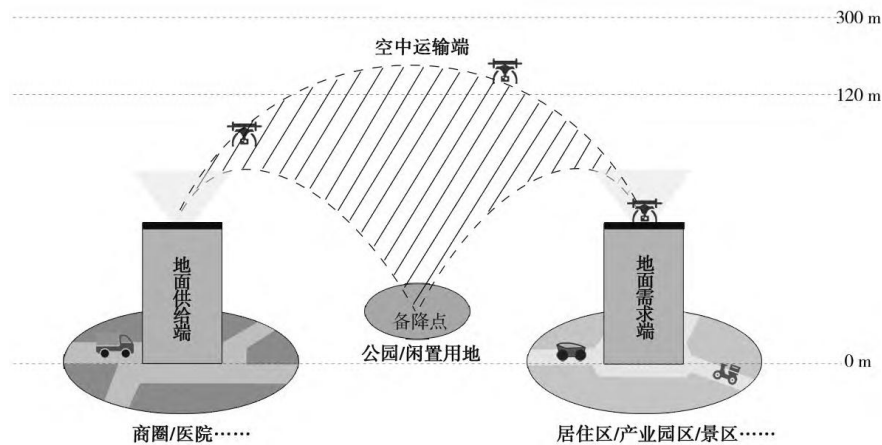


Рис. 3. Координация «земля — воздух» при доставке дронами

Примеры сценариев включают: доставку продуктов питания и напитков из коммерческих зон клиентам — городской сценарий мгновенной доставки; транспортировку медицинских образцов из районных пунктов приёма в городские лаборатории — низколётную медицинскую логистику; доставку товаров повседневного спроса с прибрежных баз на островные сообщества — морскую низколётную транспортировку; перемещение экстренных грузов из хранилищ в зоны бедствия — экстренную доставку дронами; перевозку строительного оборудования с сервисных станций на строительные площадки — инженерную логистику; транспортировку сельскохозяйственной продукции с полей на приёмные станции — сельскохозяйственную логистику.

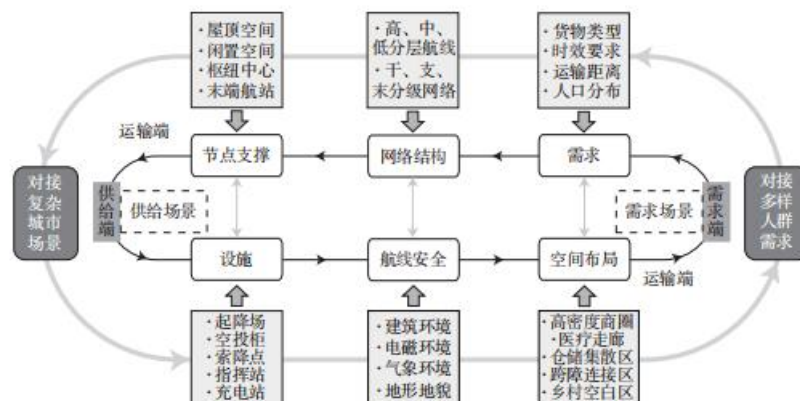


Рис. 4. Логика пути реализации координации «земля — воздух» при доставке дронами
Характеристики товаров, субъектов спроса и предложения, а также пространственные условия совместно определяют частоту доставок, распределение «источник — назначение», дальность полёта, время реакции и операционную структуру сетей типа «магистраль — ответвление — терминал» (рис. 4). Указанные факторы составляют

основу для проектирования маршрутных сетей и формирования систем координации «земля — воздух».

1.2.2. Многокритериальная координация сетей

Существующие исследования координации «земля — воздух», ориентированные преимущественно на технические аспекты, концентрируются главным образом на обеспечении лётной безопасности и надёжности маршрутов с позиций воздушно-транспортных систем. В сравнении с традиционной авиационной транспортировкой доставка дронами осуществляется на существенно меньших высотах, поэтому вопросы безопасности полётов должны учитывать более широкий круг наземных факторов: рельеф, характер землепользования, застроенную среду, поверхностную активность и расселение населения (рис. 4). Помимо соображений безопасности, данные факторы влияют и на иные критерии. В частности, прокладка маршрутов с учётом наземной активности повышает экономическую эффективность; учёт пространственных различий городского спроса и предложения расширяет доступность услуг доставки дронами в зонах высокого спроса и территориях с недостаточным покрытием; интеграция дронов с грузовиками, автобусами и рельсовым транспортом улучшает операционную эффективность и экономичность за счёт использования преимуществ различных видов транспорта; подобная интеграция укрепляет устойчивость сети. Следовательно, маршруты доставки дронами не являются независимыми системами воздушного пространства, а находятся в глубокой взаимосвязи с наземными социально-экономическими и пространственными сетями.

1.2.3. Многоуровневая координация узлов

Доставка дронами организует операционные сети посредством интеграции наземных пространственных сценариев, формируя различные типы узлов — от макроуровневых точек сервисного развёртывания до микроуровневых объектов, встраиваемых в здания или городские пространства (рис. 4). Эти встроенные узлы выполняют функцию пространственных якорей деятельности доставки дронами: выступают физическими носителями, обеспечивающими операционную организацию, и служат трансферными хабами, связывающими доставку дронами с иными видами транспорта. Тем самым они напрямую определяют операционную эффективность и отзывчивость сервиса в сетях координации «земля — воздух».

2. Исследуемые кейсы и методология

2.1. Исследуемые кейсы

В настоящем исследовании применяется метод изучения практических случаев. С учётом текущего состояния развития доставки дронами в Китае в качестве объектов исследования отобраны предприятия, представляющие сценарии мгновенной доставки, логистических перевозок и медицинской транспортировки, — далее именуемые М, S и Y (табл. 1).

Табл. 1. Основные сведения об исследуемых предприятиях

Предприятие	Основной бизнес	Число пунктов взлёта-посадки	Число маршрутов	Средняя протяжённость маршрута, км	Высота полёта, м
М	Мгновенная доставка	61	49	2,0	120

	торговых зонах				
S	Курьерская логистика между отделениями	222	549	6,3	120–300
Y	Транспортировка материалов между больницами	100	2550	7,2	120

Примечание: данные по М — на август 2025 г., пункты включают посадочные площадки и грузовые терминалы; данные по S — на конец мая 2025 г.; данные по Y — на апрель 2025 г., пункты включают посадочные площадки и точки спуска.

Предприятие М является одной из крупнейших в Китае платформ мгновенной розничной торговли. С 2017 г. оно приступило к освоению лёгких малотоннажных услуг доставки дронами на короткие расстояния (менее 3 км). В начале 2021 г. был успешно выполнен первый реальный заказ доставки дронами. В феврале 2023 г. компания получила разрешение на экспериментальную эксплуатацию дронов специальной категории и лицензию на осуществление общей авиационной деятельности, после чего в Шэньчжэне начались пилотные операции доставки дронами. К концу 2024 г. компания М развернула в Китае 53 маршрута доставки дронами, преимущественно в Шэньчжэне, а также в Пекине, Шанхае, Гуанчжоу и ряде других городов. Сервисные сценарии охватывают офисные пространства, жилые комплексы, туристические зоны, городские парки, кампусы, библиотеки и иные типы городских пространств.

Предприятие S — один из крупнейших в Китае комплексных логистических провайдеров, оказывающий услуги экспресс-доставки, грузовых перевозок, холодильной логистики, медицинской логистики и внутригородской доставки. Разработка грузовых дронов начата в 2015 г.; в 2017 г. компания стала первым пилотным предприятием, утверждённым Управлением гражданской авиации Китая. В марте 2018 г. ею получена первая в Китае лицензия на экспериментальную авиационную операцию с дронами, выданная Управлением гражданской авиации. К концу 2024 г. предприятие S создало 549 дронных маршрутов по всей стране, выполнив свыше 1,1 млн полётов, перевезя более 6,2 млн посылок при совокупном налёте, превышающем 5,7 млн км.

Предприятие Y основано в 2015 г. В октябре 2019 г. оно первым в мире получило от Управления гражданской авиации Китая разрешение на экспериментальную эксплуатацию дронов специальной категории и лицензию на логистическую доставку дронами. Основными направлениями деятельности служат: медицинское реагирование, внутригородская логистика, доставка свежих продуктов, почтовые услуги и логистика промышленных парков. По состоянию на 14 августа 2025 г. выполнено свыше 310 000 полётов общей продолжительностью почти 59 000 часов при совокупном налёте более 2 млн км. Медицинские приложения составляют около 85 % городских операций доставки дронами; сервис охватывает более 50 городов и обслуживает свыше сотни медицинских альянсов и больниц уровня муниципалитета и выше.

2.2. Методология исследования

В период с марта 2024 г. по июнь 2025 г. осуществлялось непрерывное отслеживание указанных трёх предприятий и связанных с ними компаний. Во-первых, сбор данных о развитии предприятий, масштабах деятельности, пространственном развёртывании и эксплуатационных затратах проводился через корпоративные веб-сайты, информационные платформы, годовые и финансовые отчёты. Во-вторых, полевые исследования включали посещение объектов и интервью с руководителями и ответственными сотрудниками предприятий. Особое внимание уделялось: процессам развития предприятий, основным бизнес-направлениям, эксплуатационному оборудованию, лётным маршрутам, сервисным моделям, условиям эксплуатации, требованиям безопасности. Были получены документы планирования маршрутов, эксплуатационные руководства и планы перспективного развития. Проводилось также полевое обследование посадочных площадок, командных платформ, центров обработки данных, складских и ремонтных объектов в целях понимания земельных требований и пространственных потребностей. В-третьих, на основе корпоративных веб-сайтов, визуализационных платформ и мобильных приложений дополнительные сведения о маршрутах, посадочных объектах и провайдерах услуг собирались посредством методов тестовой эксплуатации. Для трёхмерной визуализации и моделирования применялись инструменты пространственного анализа, в частности ArcGIS.

3. Пути реализации координации «земля — воздух» при доставке дронами

3.1. Дифференциация характеристик спроса и формирование спектра сценариев координации «земля — воздух»

Первоочередной задачей достижения координации «земля — воздух» при доставке дронами является выявление характеристик спроса конкретных пространственных контекстов и формирование соответствующих сервисных моделей. Согласно кейсам трёх предприятий, современные модели координации «земля — воздух» преимущественно ориентированы на специфические операционные потребности предприятий, при этом дроны используются для усиления существующих сервисных систем (табл. 2).

Табл. 2. Профиль спроса низколётной логистики и модель координации «земля — воздух»

场景需求	地空协同模式	示意图
商圈即时配送	商圈无人机配送+末端空投柜 骑手接驳配送/用户自取	
商圈集合配送	商圈骑手配送+枢纽站间无人机 运输+末端骑手配送	
景区即时配送	商场无人机配送+景区索降点/ 自动枢纽站用户自取	
快速物流配送	枢纽站间无人机转运/配送+末端 航站骑手接驳配送/用户自取	
医疗物资转运	区域中心血站无人机配送+ 各级医疗机构专员自取	
海洋海岛运输	枢纽站无人机运输+末端航站 骑手配送/用户自取	

В частности, предприятие М преимущественно ориентировано на сервис доставки продуктов питания. Соответственно, система координации «земля — воздух» организуется вокруг коммерческих зон: посадочные объекты размещаются в торговых центрах с высокой концентрацией магазинов, а грузовые терминалы — в зонах высокого спроса (жилые комплексы, офисные районы, туристические зоны) в радиусе примерно 0,5–2 км. Формируется радиальная сервисная сеть, в которой дроны выполняют одностороннюю доставку из коммерческих центров до терминальных грузовых пунктов. Жители по своему усмотрению могут выбрать данный сервис, получить груз в терминале или заказать дополнительную доставку курьером.

Напротив, предприятие S преимущественно оказывает услуги по доставке ценных посылок и срочной логистики. Модель координации «земля — воздух» базируется на существующих логистических станциях, где организуются взлётно-посадочные объекты и формируется взаимосвязанная сетевая структура станций. Быстрая низколётная транспортировка между станциями (на расстояниях порядка 7 км) развивается как сервисный продукт, выбираемый пользователями по потребности. Основными целевыми грузами служат ценные товары (ювелирные изделия и др.), а также скоропортящаяся продукция (морепродукты, свежие фрукты).

Предприятие Y концентрируется на медицинских транспортировках, прежде всего на потребностях в перемещении биологических образцов, вакцин и медицинских материалов в пределах медицинских сетей. Посадочные объекты создаются в медицинских учреждениях, формируя многоуровневую двунаправленную сервисную сеть координации «земля — воздух».

Сравнительный анализ трёх кейсов показывает, что фундаментальная цель координации «земля — воздух» посредством дронов состоит в замещении традиционной наземной ручной доставки низколётной транспортировкой. Данное замещение обусловлено главным образом характеристиками товаров и требованиями к сервису. В товарном аспекте доставка дронами преимущественно применима для грузов, требующих соблюдения временных условий или обладающих высокой экономической ценностью. В аспекте сервисного спроса доставка дронами вводится, когда традиционные наземные перевозки не способны эффективно удовлетворить операционные потребности. Подобные ситуации включают: (1) Сложные и высокоплотные городские дорожные сети, снижающие эффективность наземного транспорта. (2) Географические барьеры (горы, реки, моря), замедляющие доставку. (3) Многоэтажная застройка, где неэффективность вертикального транспорта (в частности, ожидание лифта) снижает темпы доставки. (4) Специфические территории (туристические объекты, культурно-спортивные площадки, кампусы), где локальное предложение не может в достаточной мере удовлетворить спрос. (5) Проблемы пространственной доступности на территориях (туристические зоны, университеты, парки), где поиск входов или проникновение в пространство затрудняют доставку. (6) Ситуации, когда экстремальные погодные условия или стихийные бедствия прерывают наземное сообщение.

Перед лицом указанных сценариев предприятия применяют различные стратегии — от самостоятельного формирования до совместной разработки систем доставки дронами в соответствии со своими операционными особенностями и ресурсными преимуществами.

3.2. Привязка наземных элементов и организация маршрутных сетей координации «земля — воздух»

Маршрутные сети составляют ядро координации «земля — воздух». Согласно практике предприятий S, M и Y, планирование дронных маршрутов охватывает полётные пути при различных эксплуатационных состояниях: взлёт, посадка, крейсерский полёт и зависание. При этом маршруты должны учитывать множество наземных факторов: природный ландшафт, характер землепользования, застроенную среду и человеческую деятельность (табл. 3).

Табл. 3. Факторы влияния и их положительное/отрицательное воздействие на формирование низколётных логистических маршрутов с позиций координации «земля — воздух»

要素		安全性	可靠性	公共接受度
自然地貌	山体/绿地	★★★★	☆☆	★★★★★
	水体	★★★★	★★★★	★★★★★
土地利用	道路	★★★★	★★★	★★★★
	铁路、高速铁路	☆☆☆☆	☆☆	
	机场	☆☆☆☆	☆☆	
	核电站、油库	☆☆☆☆	☆☆☆☆	
	高等级居住区	☆☆☆☆	★★★	☆☆☆☆
	学校、政府机关	☆☆☆☆		☆☆☆☆
	工业、物流仓储区	★★★	☆☆	★★★★★
	空地荒地、未利用地	★★★	★★★★★	★★★★★
建成环境	高层建筑	☆☆		☆☆☆☆
	建筑物风口	☆☆	☆☆	
	铁塔、高压线、电力线	☆☆	☆☆	
	通信基站	☆☆	☆☆☆☆	
地面活动	建筑工地(塔吊)	☆	☆☆	
	市民活动(风筝、人群活动)	☆☆☆☆	☆☆	☆☆☆☆

注：★为正向效应，☆为负向效应

Указанные факторы могут позитивно или негативно влиять на безопасность, надёжность маршрутов и общественное принятие. Безопасность означает защиту людей и объектов на земле, включая потенциальный ущерб от аварий воздушных судов, вторичные риски, а также сложность обнаружения аварийных дронов или перевозимых грузов. Надёжность отражает способность поддерживать стабильные операции в условиях изменчивых погодных условий, электромагнитной обстановки и препятствий. Общественное принятие связано с воздействием дронных операций на жителей, прежде всего в аспектах шумового загрязнения и опасений относительно приватности^①.

(1) Факторы природного ландшафта. Горы, зелёные насаждения и водные поверхности могут снизить потенциальный ущерб для наземных пользователей в случае отказа летательного аппарата и потому рассматриваются как позитивные факторы для планирования маршрутов. Однако горные районы характеризуются нестабильными метеоусловиями, что может снижать эксплуатационную надёжность. Кроме того, горные районы, зелёные массивы и водные поверхности затрудняют поиск аварийных аппаратов и требуют тщательной оценки возможных вторичных рисков.

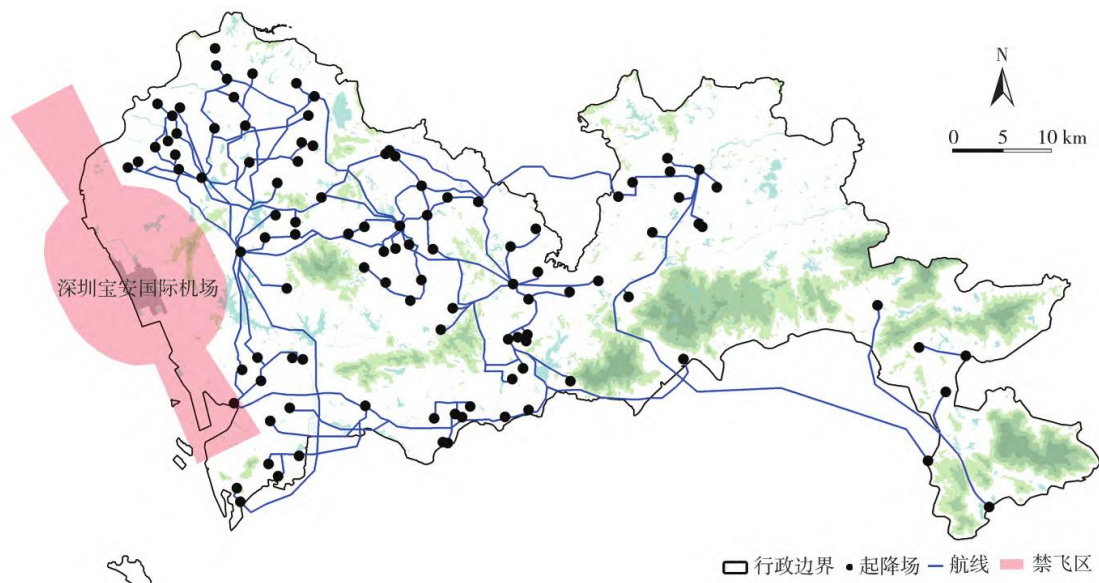
(2) Факторы землепользования. Дорожное пространство под маршрутами дронов обеспечивает относительно открытую среду, повышая безопасность, надёжность маршрутов и общественное принятие. Поэтому маршруты дронов предприятий M, S и Y, как правило, выравниваются вдоль основных транспортных коридоров (рис. 5)②.

Рис. 5. Схема низколётных маршрутов доставки дронами в трёхмерной среде района Наньшань (Шэньчжэнь)



Вместе с тем визуальные помехи, создаваемые взлётом и посадкой дронов, могут негативно влиять на дорожное движение и общественное принятие. Стратегически значимые объекты или объекты с повышенными требованиями безопасности — гражданские и военные аэропорты, атомные электростанции, нефтехранилища, высокоскоростные железные дороги — формируют запретные зоны для маршрутов доставки дронами (рис. 6).

Рис. 6. Текущее состояние сети доставки дронами предприятия S в Шэньчжэне



Государственные объекты и элитные жилые комплексы могут негативно влиять на планирование маршрутов из-за опасений относительно приватности и общественного неприятия. Шумовые ограничения также затрагивают чувствительные зоны — детские сады, школы, дома престарелых, жилые комплексы. В противовес этому промышленные парки, логистические склады, пустующие и неиспользуемые территории могут рассматриваться как благоприятные локации вследствие большей толерантности к шуму и наличия аварийных посадочных зон.

(3) Факторы застроенной среды. Высотные здания и иные физические препятствия влияют на безопасность полётов, создавая потенциальные риски столкновений. Архитектура застройки может генерировать зоны сдвига ветра, воздействующие на

локальные метеоусловия. Телекоммуникационные вышки, линии электропередач и энергетические объекты представляют собой не только физические препятствия, но и изменяют электромагнитную среду, влияя тем самым на безопасность маршрутов.

(4) Факторы наземной деятельности. Динамические препятствия — птицы, воздушные змеи, воздушные шары, башенные краны на строительных площадках — могут негативно воздействовать на безопасность низколётных полётов и потому учитываются в качестве ограничений при планировании маршрутов.

3.3. Встраивание в застроенную среду и расширение узлов координации «земля — воздух»

В сопоставлении с лётными маршрутами, преимущественно использующими низколётное общественное пространство, взлётно-посадочные объекты занимают более разнообразные пространственные типы (табл. 4).

Табл. 4. Типы и пространственное распределение посадочных площадок

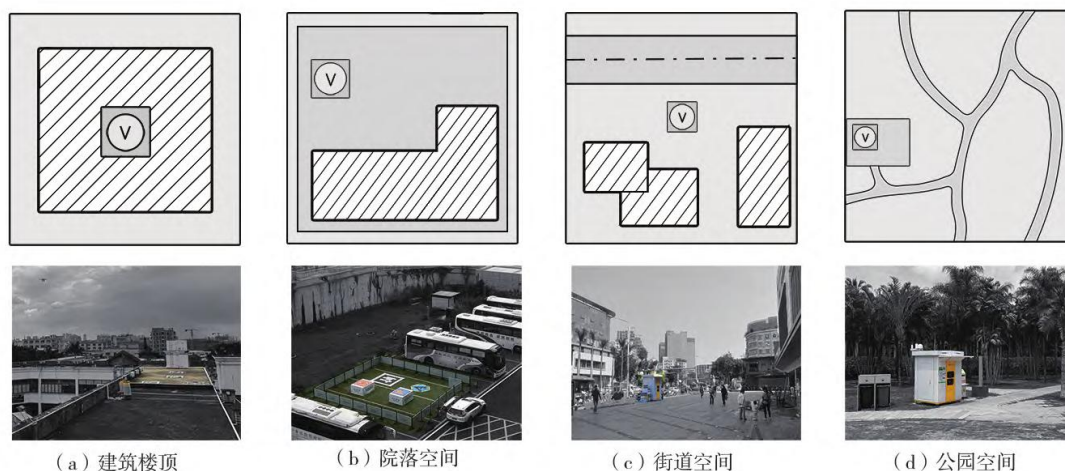
空间类型	M		S	Y
	起降场 / 个	空投柜 / 个	起降场 / 个	起降场 / 个
建筑楼顶	10	0	91	0
院落空间	0	4	2	16
街道空间	0	21	0	2
公园空间	0	20	0	6
总计	10	45	93	24

注：报告的数据是M公司、S公司在深圳，Y公司在合肥的统计数据

В настоящее время объекты доставки дронами подразделяются на три основных типа. Посадочные площадки обеспечивают множество функций — взлёт и посадку дронов, хранение, управление, погрузку и разгрузку; оснащаются системами связи, навигации, мониторинга, метеооборудованием, зарядными станциями, противопожарными системами, командными платформами, складскими зонами и несколькими посадочными позициями; требуемая площадь, как правило, превышает 300 м². Грузовые терминалы преимущественно выполняют функции интеллектуальных объектов приёма и выдачи грузов; занимают площадь порядка 10 м²; оснащаются энергоснабжением и управляющими устройствами; служат трансферными объектами и точками самообслуживания. Точки спуска представляют собой более простые объекты: дроны используют геопозиционирование и технологии распознавания изображений для идентификации конкретных локаций и осуществляют спуск груза посредством подвесных систем без необходимости в дополнительном оборудовании. Данный тип объектов пригоден для крупномасштабного развёртывания в целях расширения зоны покрытия сервиса.

В аспекте реализации предприятия доставки дронами преимущественно опираются на существующую застроенную среду — кровли зданий, внутриквартальные пространства, уличное пространство и городские парки — для организации посадочных объектов и связанных с ними узлов (рис. 7).

Рис. 7. Типы застроенной среды, задействованной для размещения узлов доставки дронами с координацией «земля — воздух»



В частности, предприятие М применяет два подхода: ① аренда открытых пространств на кровлях торговых комплексов (подиумные здания, офисные башни) для организации посадочных площадок или точек спуска; ② размещение грузовых терминалов или точек спуска в уличном и парковом пространствах после получения согласований от соответствующих административных органов. В силу обширной сети собственных или арендованных логистических объектов предприятия S посадочные площадки формируются преимущественно на кровлях или внутриквартальных территориях существующих логистических станций. Помимо указанных подходов, предприятие Y применяет альтернативную модель: организации-заказчики доставки дронами (например, больницы, станции переливания крови) самостоятельно инвестируют в собственные пространственные ресурсы, тогда как предприятие Y обеспечивает строительство посадочных объектов.

Различные стратегии пространственного развёртывания свидетельствуют о том, что на начальном этапе расширения отрасли предприятия доставки дронами концентрируются на наращивании сетей посадочных объектов и контроле издержек. На основе различий в доступности пространственных ресурсов сформировались разнообразные пути реализации.

4. Вызовы и планировочные решения

4.1. Оценка реального спроса и продвижение иерархического планирования координации «земля — воздух»

Доставка дронами по своей сути представляет собой грузовую транспортную деятельность, обеспечивающую пространственное перемещение товаров посредством низколётных полётов. Возникновение подобной транспортной потребности требует сопоставления доставки дронами с альтернативными транспортными моделями для выявления применимых сценариев. Пригодные сценарии определяются множеством измерений: характеристиками перевозимых грузов, требуемым временем реакции и пространственными условиями. Пригодность определяется не только технической осуществимостью и безопасностью, но и экономической эффективностью. Иными словами, доставка дронами должна обеспечивать большие экономические выгоды по сравнению с традиционными способами транспортировки для обеспечения долгосрочной устойчивости.

С позиций характеристик товаров устойчивые коммерческие приложения доставки дронами предприятий М, S и Y охватывают грузы со следующими отличительными чертами: срочность, труднодоступность, повышенный риск, высокая ценность. Это внутригородская срочная доставка, грузы, труднодоступные для наземного транспорта, продукция, требующая дополнительных временных гарантий, и ценные товары. На основе указанных товарных характеристик и соответствующих временных и пространственных сценариев доставка дронами формирует добавленную стоимость, отличающую низколётную транспортировку от наземной, порождая тем самым подлинный спрос.

Следовательно, городское низколётное планирование должно оценивать «технико-экономическую» логику, лежащую в основе координации «земля — воздух», а не постулировать универсальный спрос или бездумно продвигать инфраструктурное развёртывание. В частности, планирование должно выстраивать оценочные индикаторы и аналитические рамки для различных сценариев спроса, определять приоритеты развития в соответствии со спецификой сценариев и формулировать кратко-, средне- и долгосрочные стратегии. Приоритет следует отдавать поддержке приложений доставки дронами в таких областях, как медицинское экстренное реагирование и ценная холодовая логистика, обеспечивая для них пространственную поддержку и инфраструктуру. На уровне реализации планирование должно выявлять потенциальные сценарии применения в процессах городского обновления и заблаговременно резервировать соответствующие пространственные условия, обеспечивая постепенный переход доставки дронами от изолированных пилотных проектов к масштабному внедрению.

Кроме того, ряд предприятий полагает, что доставку дронами следует рассматривать в более широкой и долгосрочной перспективе в соотношении с иными видами транспорта. Например, в условиях старения населения, снижения рождаемости и совершенствования систем социального обеспечения совокупная стоимость труда наземной доставки будет, вероятно, продолжать расти, тогда как стоимость производства дронов — снижаться. Расширение грузоподъёмности, коллективные модели доставки и масштабные приложения способны уменьшить предельные издержки на единицу перевозки. Посредством интеграции с грузовиками, рельсовым транспортом и иными системами доставка дронами может в полной мере реализовать свои преимущества в рамках мультимодальных перевозок. Более того, после масштабного внедрения низколётных пассажирских систем, прежде всего электрических аппаратов вертикального взлёта и посадки (eVTOL), вероятно формирование интегрированных систем пассажирских и грузовых перевозок [28].

Следовательно, городское низколётное планирование должно выдерживать взвешенный и открытый подход к перспективам развития доставки дронами, учитывая возможные организационные трансформации, обусловленные масштабным внедрением. Планирование должно заблаговременно выявлять потенциальные сценарии, резервировать пространственные условия и устанавливать критерии доступа для будущего развития. На уровне реализации результаты оценки низколётных сценариев применения должны интегрироваться в территориальное планирование и комплексное транспортное планирование; наземные и низколётные ресурсы — координироваться; низколётное воздушное пространство и маршруты —

классифицироваться и лицензироваться; эффективные механизмы координации «земля — воздух» — учреждаться.

4.2. Совершенствование управления воздушным пространством и координация развития маршрутов

На начальном этапе развития экономики низколётного пространства маршруты дронов, как правило, независимо обследуются, планируются, согласовываются и эксплуатируются отдельными предприятиями. Данный феномен особенно выражен в сфере доставки дронами: исследуемые предприятия инвестировали значительные ресурсы в разработку маршрутов и рассматривают эти сети как свои ключевые активы. В более широкой перспективе низколётные сервисные платформы, создаваемые в различных провинциях и городах, обслуживают преимущественно локальные предприятия и остаются разрозненными, что затрудняет достижение межкорпоративных и межрегиональных интегрированных операций. С дальнейшим развитием экономики низколётного пространства возможна конкуренция за маршрутные ресурсы, снижающая эффективность использования низколётных ресурсов.

Для решения данной проблемы в академических и отраслевых исследованиях предложены различные стратегии: оптимизация классификации воздушного пространства, формирование общественных маршрутов, продвижение совместного использования воздушного пространства и динамическое высвобождение воздушных ресурсов. В частности, ряд исследований предлагает классифицировать воздушное пространство в соответствии с различными эксплуатационными требованиями и высотами полётов: потребительские дроны — ниже 120 м; дроны мгновенной доставки — 120–200 м; логистические дроны — 200–300 м.

На основе анализа практики корпоративного планирования маршрутов настоящее исследование утверждает, что зонирование воздушного пространства и планирование маршрутов не должны рассматриваться исключительно как вопросы авиационного транспорта. Их соотношение с наземными системами не должно пониматься как простое «сверху вниз» проецирование воздушного пространства на землю. Напротив, планирование должно применять «снизу вверх» подход, распространяя наземные пространственные системы вверх в низколётное пространство. Реализация данного подхода требует теоретических инноваций и технической адаптации.

С технической точки зрения доставка дронами представляет собой трансформацию мобильности городских элементов из двумерного в трёхмерное пространство. Следовательно, планирование должно анализировать препятствия и их динамические изменения в трёхмерной среде [28–30]; оценивать доступность и стратегии маршрутизации с учётом факторов безопасности и экономичности; выявлять малозатратные и высокобезопасные коридоры над реками и водоёмами. Одновременно планирование должно классифицировать шумочувствительные и приватночувствительные зоны в соответствии с условиями землепользования и устанавливать нормативы отступов маршрутов для снижения негативных воздействий дронных операций^③.

На местном уровне города могут разрабатывать специализированные планы классификации низколётного воздушного пространства и управления маршрутами с опорой на трёхмерную городскую среду и условия землепользования. Такие планы

должны определять: методы классификации воздушного пространства; планировку маршрутов; охранные буферные зоны и служить базой для последующего строительства инфраструктуры и согласования маршрутов.

В более фундаментальном плане необходимы теоретические исследования прав использования и механизмов пространственного управления низколётным пространством. С позиций собственности низколётные ресурсы, подобно воздушному пространству, принадлежат государству и коллективно — обществу. С позиций использования права развития в настоящее время осуществляются государством от имени общества [31]. Однако реализация подобных «публичных прав» сталкивается с практическими затруднениями, особенно в контексте дискуссий о воздушных правах [32]. В Соединённых Штатах Америка права на воздушное пространство ниже 500 футов (около 150 м), как правило, связываются с правами землевладения, тогда как вышележащее пространство квалифицируется как навигационное. Землевладельцы обладают правами на «непосредственные примыкающие части» воздушного пространства над своими владениями, включая право использования пространственного объёма, сопоставимого с площадью занимаемого или контролируемого земельного участка [33]. В Китае соответствующие нормативные акты остаются относительно неопределёнными. Закон КНР «О вещном праве» (2007) ввёл концепцию сервитутов в рамках прав пользования в отношении строительных земель. Гражданский кодекс КНР (2021), статья 345, уточняет: «Права использования строительных земель могут устанавливаться отдельно на поверхности, в надземном или подземном пространстве земельного участка». Нормативные акты о соседских отношениях далее разъясняют практическое применение прав, связанных с освещением, доступом и иными пространственными сервитутами [32, 34]. Следовательно, можно полагать, что воздушное пространство зданий и прилегающие территории могут подпадать под действие сервитутных прав, хотя действующее законодательство ещё не определило их правовые формы и отношения собственности. Соответственно, будущее городское низколётное планирование, включая планирование доставки дронами, должно уточнить соотношение публичных и частных прав в отношении низколётных пространственных ресурсов. Необходимо заложить правовые основы для: трёхмерных кадастровых систем; трёхмерных баз данных городского пространства; определения общественных маршрутов; регулирования использования низколётных ресурсов; механизмов платного использования.

4.3. Инновации в политике планирования и управления в целях продвижения интеграции объектов в сеть

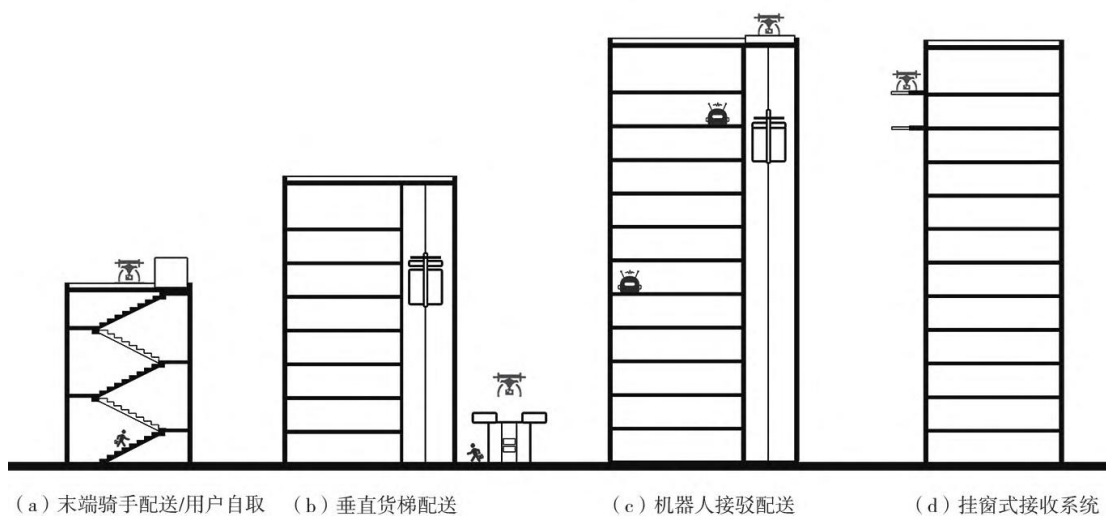
Выступая точками связи координации «земля — воздух», взлётно-посадочные объекты составляют критически важную инфраструктуру доставки дронами. В настоящее время эти объекты преимущественно зависят от кровель зданий и общественных пространств. С позиций прав собственности государственные здания, как правило, имеют чётко определённую структуру собственности; кровли жилых зданий относятся к общей долевой собственности; уличные общественные пространства принадлежат государству [35]. Однако в целом указанные наземные общественные пространства и воздушное пространство над кровлями характеризуются неопределённостью отношений собственности, что затрудняет их функциональную трансформацию и становится основным препятствием, сдерживающим развитие доставки дронами.

Следовательно, пространственное планирование должно не только заблаговременно организовывать маршруты и посадочные объекты в техническом отношении, но и формировать институциональные механизмы, обеспечивающие реализацию объектов. В частности, планирование должно заимствовать опыт уже существующих 社区嵌入式服务设施 (встроенных в 社区 сервисных объектов) и координировать с первоначальными собственниками и муниципальными органами распределение прав, обязанностей и экономических выгод. Для нового строительства или проектов редевелопмента объекты для дронов могут включаться в механизмы стимулирования через показатели плотности (площадь застройки / коэффициент использования территории) [36]. На основе оценки спроса, рассмотренной в разделе 4.1, в зонах высокого спроса должны резервироваться выделенные пространства для доставки дронами, а посадочные платформы — включаться в регуляторные детальные планы. С позиций системы планирования посадочные объекты и необходимые им земельные пространства должны интегрироваться в: системы классификации землепользования; нормативы совместимости застройки; рамки инфраструктурного планирования.

Благодаря этим мерам можно развивать новые типы инфраструктуры и постепенно интегрировать их в городские сети. Помимо пространственной интеграции, следует также создать условия для интеллектуальной и автоматизированной связи посадочных объектов с другими транспортными системами и функциональными пространствами. Посадочные объекты не только соединяют воздушное и наземное пространство, но и связывают первоначальных поставщиков с конечными потребителями, образуя первые и последние 100–300 метров логистического процесса. В настоящее время эти начальные и конечные этапы транспортировки по-прежнему в значительной степени зависят от ручной доставки курьерами или самостоятельного получения пользователями [рис. 8(a)]. Хотя эти расстояния составляют всего 100–300 метров, затраты времени на их преодоление могут превышать время полета дрона, а затраты — стоимость воздушной доставки. Поэтому эти этапы стали критическими узкими местами, ограничивающими эффективность и экономическую целесообразность доставки с помощью дронов. Для поддержки будущего широкомасштабного применения доставки с помощью низковысотных дронов необходимо, чтобы процессы городской реконструкции и управления зданиями были лучше адаптированы к особенностям логистики с использованием дронов. Возможные меры включают: установку грузовых лифтов [рис. 8(b)]; внедрение логистических роботов [рис. 8(c)]; внедрение оконных систем приема грузов [рис. 8(d)]; а также другие интеллектуальные системы, повышающие эффективность на начальном этапе отправки и конечных этапах получения.

Для поддержки масштабного внедрения низкорельсной доставки дронами городское обновление и управление зданиями должны адаптироваться к специфике дронной логистики. Возможные меры включают: установку грузовых лифтов [Рис. 8(b)]; развёртывание логистических роботов [Рис. 8(c)]; внедрение оконных приёмных систем [Рис. 8(d)]; а также иные интеллектуальные решения для повышения эффективности на этапах первичной отправки и конечного получения.

Рис. 8. Вертикальная планировка узлов координации «земля — воздух» при доставке дронами



5. Заключение и перспективы

Представленная доставкой дронами экономика низколётного пространства развивается беспрецедентными темпами. Она продвигает формирование систем координации «земля — воздух» в разнообразных и сложных географических условиях, связывая предложение и спрос через различные сценарии применения и обеспечивая масштабное тиражирование и расширение низколётных сервисов.

Эти новые низколётные сервисы преобразуют модели городского производства и повседневной жизни, одновременно порождая новые вызовы для городского пространственного планирования. Традиционные подходы к планированию, как правило, оптимизируют наземные ресурсы с двумерной точки зрения и не способны эффективно отвечать на пространственно-временное распределение потребностей, порождаемых доставкой дронами и иными низколётными приложениями. Следовательно, низколётное пространство должно быть включено в предметную область пространственного планирования. Будущие исследования должны изучить механизмы формирования, правила использования и подходы к планированию низколётных пространств, исследовать координированные взаимодействия наземных и воздушных систем, разрабатывать новые пространственные модели, адаптированные к экономике низколётного пространства. Эти усилия обогатят концептуальный аппарат и методологический инструментарий городского низколётного планирования и обеспечат отклик на возникающие инфраструктурные и пространственные требования стремительного низколётного развития [37–39].

На основе аналитического обзора литературы, полевых исследований и имитационного моделирования настоящая работа обобщает элементы и характеристики координации «земля — воздух» при доставке дронами, проводит углублённые кейс-стади трёх ведущих предприятий доставки дронами, выявляет пути реализации и вызовы, предлагает планировочные решения. Основные выводы заключаются в следующем:

(1) Координация «земля — воздух» требует не только технологической интеграции данных и операционных систем между воздушными и наземными элементами, но и пространственного согласования сценариев, сетевых систем и узлов. Координация «земля — воздух» не должна пониматься лишь как технологическая цель; она представляет собой прототип развития новой инфраструктуры, одновременно

учитывающий экономические, технологические и пространственные задачи.

(2) В практических приложениях координация «земля — воздух» демонстрирует пути реализации, характеризующиеся: формированием систем сервисных сценариев в соответствии с характеристиками спроса; организацией маршрутных сетей на основе наземных пространственных условий; встраиванием и расширением узловых объектов в застроенной среде. Указанные пути отражают фундаментальный процесс экономики низколётного пространства как интеграции «простираения вверх и связывания вниз», что должно стать ключевым фокусом городского низколётного планирования.

(3) В отклик на вызовы, связанные с идентификацией спроса, развитием маршрутов и строительством посадочных объектов, городское планирование должно инновировать механизмы пространственного управления и технические методы. Планирование должно: совершенствовать управление низколётными ресурсами; продвигать координацию низколётных маршрутов и наземных транспортных систем; осуществлять иерархическое и категоризованное развёртывание пространственной инфраструктуры; модернизировать существующие городские пространства посредством интеллектуальной трансформации.

Посредством указанных мер может быть расширена широта, глубина и темп внедрения низколётных сервисов. Координация «земля — воздух» при низколётных полётах представляет собой многомерное пространственное сотрудничество, основанное на пространственных системах, и многоуровневый механизм координации, укоренённый в городской среде. В процессе пространственной реструктуризации, инициированной доставкой дронами, городское планирование способно сыграть ключевую роль в формировании операционной структуры пространств будущего города. Посредством интеграции знаний планирования и инструментов управления — иерархического и упреждающего пространственного регулирования; координированного распределения пространственных ресурсов; глубинных механизмов пространственных ресурсов — городское планирование способно учредить специализированную область городского низколётного планирования и обеспечить техническую поддержку пространственной реализации и эволюции экономики низколётного пространства. Будущие исследования должны *further strengthen empirical analysis through additional case studies, develop technological tools, and simulate governance effectiveness.*

Примечания

① Риски, связанные с дронными операциями, включая угрозы безопасности жизни и имущества, а также опасения относительно приватности, вызванные бортовыми камерами, являются важными факторами, влияющими на общественное принятие. В международной практике ряд предприятий применяет технологии обработки изображений, в частности преобразование в градации серого, для снижения опасений относительно приватности и реагирования на растущие общественные жалобы и обращения.

② Шум является одним из основных факторов, влияющих на общественное принятие. В особенности шум, генерируемый при взлёте и посадке дронов, оказывает значительное воздействие на шумочувствительные зоны — дома престарелых, школы, жилые комплексы, государственные учреждения. Согласно существующим измерениям, низколётные дронные операции создают шум порядка 60–85 дБ(А), превышая пределы, установленные «Стандартом качества окружающей среды по шуму» Министерства

охраны окружающей среды КНР [40]. Стандарт устанавливает следующие дневные и ночные пределы шума: для зон категории 0 (реабилитационные и оздоровительные территории) — 50 и 40 дБ(А) соответственно; для зон категории 1 (жилые, образовательные, правительственные территории) — 55 и 45 дБ(А) соответственно.

Библиографические ссылки

- [1] Central Committee of the Communist Party of China, State Council. Outline of the National Comprehensive Three-dimensional Transportation Network Planning[EB/OL]. (2021-02-24) [2025-07-05]. https://www.gov.cn/zhengce/202203/content_3635479.htm.
- [2] Wu Z Q, Yan J, Xu H W, et al. Ten Key Issues in the Annual Development of Urban and Rural Planning Discipline (2024–2025)[J]. Urban Planning Forum, 2024(6): 8–11.
- [3] Liao X H, Qu W Q, Xu C C, et al. Review of Urban Air Mobility and New Infrastructure Low-altitude Public Air Routes[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(24): 1–29.
- [4] Liao X H, Zhang J, Huang Y H. Preliminary Discussion on the Characteristics of Low-altitude Geography and Its Expansion of Geographic Research[J]. Acta Geographica Sinica, 2024, 79(3): 551–564.
- [5] Liao X H, Huang Y H, Xu C C. Research on Low-altitude Airspace Resources for UAV Applications[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(11): 2607–2620.
- [6] Zhang H H, Yi J, Li S, et al. A Review of Low-altitude Airspace Capacity Evaluation Research[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2023, 23(6): 78–93.
- [7] Li A, Hansen M, Zou B. Traffic Management and Resource Allocation for UAV-based Parcel Delivery in Low-altitude Urban Space[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2022, 143: 103808.
- [8] Zhang Q R, Wei R X, He R K, et al. UAV Route Planning in Dense Urban Irregular Obstacle Environments[J]. Control Theory & Applications, 2015, 32(10): 133–139.
- [9] Liu Q, Chen Y Y, Hong X W, et al. International Experiences of Urban Low-altitude Airspace Planning for UAV Applications[J]. Urban Planning Forum, 2024(5): 64–70.
- [10] Safadi Y, Geroliminis N, Haddad J. Integrated Departure and Boundary Control for Low-altitude Air City Transport Systems[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2024, 189: 103020.
- [11] Chen D, Tang C, Xie Y, et al. Two-level Real-time Trajectory Planning of UAVs for Urban Low-altitude Logistics Delivery[J/OL]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2025: 1–20 [2025-07-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20250417.1126.002.html>.
- [12] Ding Y, Xin B, Chen J. A Review of Recent Advances in Coordination Between Unmanned Aerial and Ground Vehicles[J]. Unmanned Systems, 2021, 9(2): 97–117.
- [13] Huang S H, Huang Y H, Blazquez C A, et al. Solving the Vehicle Routing Problem with Drone for Delivery Services Using an Ant Colony Optimization Algorithm[J]. Advanced Engineering Informatics, 2022, 51: 101536.
- [14] Dukkanci O, Campbell J F, Kara B Y. Facility Location Decisions for Drone Delivery with Riding: A Literature Review[J]. Computers & Operations Research, 2024, 167: 106672.
- [15] Li Y, Liu M, Hu H, et al. A Cost Analysis of the Collaborative Delivery Mode of Drones and Riders in Food Delivery Scenarios[J]. International Journal of Logistics Research and Applications, 2025, 28(2): 1–30.
- [16] Wang X Y, Wang H M, Sun Q Q. Multi-task Cooperative Control of UAV–UGV Unmanned

- Cluster Systems[J]. Unmanned Systems Technology, 2023, 6(6): 70–79.
- [17] Liu C, Zhao J, Sun N. A Review of Collaborative Air-ground Robots Research[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2022, 106(3): 60.
- [18] Qin R, Yang Z B. Research on Location Optimization of UAV Delivery Landing Sites in Urban Areas[J]. Scientific and Technological Innovation, 2024(15): 50–54.
- [19] Xiao Z P, Zhang W C, Li Y Y, et al. Organizational Characteristics and Challenges of Ground-air Coordination for Low-altitude UAV Delivery: A Case Study of Shenzhen[J]. Resources Science, 2025, 47(8): 1663–1674.
- [20] Shavarani S M, Golabi M, Izbirak G. A Capacitated Biobjective Location Problem with Uniformly Distributed Demands in the DAV-supported Delivery Operation[J]. International Transactions in Operational Research, 2019, 26(4): 1–24.
- [21] Chang Y S, Lee H J. Optimal Delivery Routing with Wider Drone-delivery Areas Along a Shorter Truck-route[J]. Expert Systems with Applications, 2018, 104: 307–317.
- [22] FAA. Engineering Brief No.105A, Vertiport Design, Supplemental Guidance to Advisory Circular 150/5390-2D, Heliport Design[R/OL]. (2024-12-27) [2025-07-07]. https://www.faa.gov/airports/engineering/engineeringbriefs/eb105a_vertiports.
- [23] Civil Aviation Administration of China. Specification for Route Planning of Light and Small Unmanned Aircraft Logistics Operations in Urban Scenarios[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2022.
- [24] Sheng J, Cai X, Li Q, et al. Space-air-ground Integrated Network Development and Applications in High-speed Railways: A Survey[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 23(8): 10066–10085.
- [25] CASA. Guide to Vertiport Design[R/OL]. (2024-05-29). <https://www.casa.gov.au/sites/default/files/2024-05/guide-to-vertiport-design.pdf>.
- [26] China Civil Airports Association. Technical Requirements for Electric Vertical Take-off and Landing Aircraft (eVTOL) Landing Facilities[S]. Beijing: China Civil Airports Association, 2024.
- [27] China Mobile, Xunyi. Logistics Capillaries of Future Cities: 5G Robot Transportation Network White Paper[R/OL]. (2019-01) [2025-06-25]. https://xyi-web.oss-cn-hangzhou.aliyuncs.com/files/5G_机器人运力网络白皮书20210901.pdf.
- [28] Liu J M, Su X J, Shen Z J. Exploration of Coordinated Development Models of Urban Low-altitude Airspace and Above-ground/Underground Space from the Perspective of UAV Traffic Governance[J]. International Urban Planning, 2024, 39(3): 1–16.
- [29] Chen J, Gao Y, Guo C Y, et al. Basic Ideas and Key Tasks of Real-world 3D Scene Empowering Low-altitude Economy[J]. Journal of Spatial Information, 2025, 32(1): 1–10.
- [30] Li X, Gan W, Shen C, et al. Impact Assessment and Facility Renewal of Urban Air Mobility from the Perspective of Low-altitude Economy[J]. Planners, 2025, 41(3): 33–41.
- [31] Chen B H, Xie Y. Types and Legislative Models of Spatial Rights in Property Law[J]. Journal of Finance and Law, 2018(3): 15–30.
- [32] Chen X J. Low-altitude Use Rights under the Background of Low-altitude Airspace Opening[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics (Social Sciences Edition), 2016, 29(1): 47–57.
- [33] United States Congress. The Air Commerce Act of 1926[S]. (1926-05-20) [2025-07-15]. https://archive.org/download/UnitedStatesAirCommerceAct1926/United%20States%20Air%20Commerce%20Act%20-%201926_text.pdf.

- [34] Zhao X M. Forms and Analysis of Land Spatial Rights Utilization[J]. Tribune of Political Science and Law, 2011, 29(2): 90–99.
- [35] Zhang J, Zhao Z L, Wang Y N, et al. Difficulties and Operational Mechanisms of Community-embedded Service Facilities Construction from the Perspective of Urban Renewal[J]. Urban Planning Forum, 2025(1): 71–77.
- [36] Zhou G K, Zhuo J. Theoretical Logic and Institutional Construction of Development Rights Transfer and Incentives under Urban Renewal[J]. Urban Planning Forum, 2023(3): 66–74.
- [37] Liu T T, Dai S Z, Song H Y. Exploration of New Types of Smart Society Infrastructure and Data Infrastructure Planning[J]. Urban Planning Forum, 2019(4): 95–101.
- [38] Wang K, Zhao Y J, Zhang J X, et al. Academic Discussion on "New Quality Productive Forces and Urban-rural Planning"[J]. Urban Planning Forum, 2024(4): 1–10.
- [39] Wang G T, Liu X, Li F, et al. Reflections on Urban Studies in the New Era: Urban Problems—Urban Science—Urbanology[J]. Urban Planning Forum, 2025(3): 9–15.
- [40] Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Environmental Quality Standard for Noise[S]. (2008-08-19) [2025-07-15]. <https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/wlhj/shjzlbz/200809/W020111121351590491445.pdf>.

Ai 辅助翻译