

Методика оценки энергетических потерь в спутниковых системах квантовых коммуникаций с учетом атмосферных воздействий

М.В. Сапожников, НИЦ «Курчатовский институт», младший научный сотрудник; к.т.н.; msapozh@jssc.ru
Ю.Б. Миронов, НИЦ «Курчатовский институт», ведущий научный сотрудник; к.т.н.; ymironov@jssc.ru

УДК 535.2; 621.391.6; 621.391.8

DOI: 10.34832/ELSV.2026.78.4.005

Аннотация. Статья посвящена описанию и верификации разработанной методики оценки энергетических потерь, обусловленных влиянием атмосферных явлений при реализации спутникового квантового распределения ключей (КРК), учитывающей воздействие атмосферной турбулентности для расчёта эффективности КРК в спутниковых системах квантовых коммуникаций. Применение разработанной методики в рамках численного моделирования экспериментов по КРК обеспечило повышение точности оценки показателей эффективности КРК по сравнению с существующими подходами. Разработанная и апробированная методика позволяет повысить достоверность результатов количественного расчёта энергетического бюджета спутниковых систем квантовых коммуникаций и, как следствие, улучшить прогнозирование основных показателей эффективности КРК, что способствует обеспечению технико-экономической обоснованности развёртывания отечественных глобальных квантовых коммуникационных сетей.

Ключевые слова: оптическая связь в свободном пространстве, оптическая спутниковая связь, атмосферная турбулентность, вертикальный профиль структурной постоянннй, квантовое распределение ключей, КРК, эффективность КРК, методика оценки потерь.

Для цитирования: Сапожников, М.В. Методика оценки энергетических потерь в спутниковых системах квантовых коммуникаций с учетом атмосферных воздействий / М.В. Сапожников, Ю.Б. Миронов // Электросвязь. – 2026. – № 4. – С. 44-54.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие спутниковых систем квантовых коммуникаций в Российской Федерации определено как стратегическая приоритетная задача и институционально закреплено в рамках государственной научно-технологической политики. Ключевым инструментом реализации этой задачи является «дорожная карта» развития высокотехнологичного направления «Квантовые коммуникации», разработанная ОАО «РЖД» совместно с ведущими научными организациями, экспертным сообществом и отраслевыми участниками рынка, утверждённая Министерством цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации в 2020 г. и актуализированная в 2022 г. [1].

В контексте указанной стратегии особое значение приобретает интеграция технологий квантового распределения ключей [2–5] в многоуровневую телекоммуникационную инфраструктуру: от наземных волоконно-оптических и атмосферных линий к спутниковым каналам, обеспечивающим масштабирование квантовых сетей для организации устойчивого функционирования распределённых сетей в условиях геополитической и технологической неопределённости.

На текущем этапе научно-исследовательская активность российских учёных в области квантовых коммуникаций сосредоточена преимущественно на создании и развитии наземных квантовых сетей [6–8]. Важным направлением сопутствующего развития выступает интеграция оборудования атмосферной оптической связи [9–11] с технологией КРК (а именно, КРК оборудованием). Экспериментальные исследования подтвердили принципиальную совместимость отечественных серийных терминалов атмосферной оптической связи с оборудованием КРК [12, 13].

Однако дальнейшее масштабирование квантовых коммуникаций за пределы региональных сетей требует перехода к глобальной инфраструктуре, обеспечивающей устойчивую и защищённую передачу информации между удалёнными узлами, что потенциально возможно лишь при задействовании космической группировки. Так, согласно Концепции регулирования отрасли квантовых коммуникаций в Российской Федерации до 2030 г. [1] (п. 4 раздела III «Отраслевые направления совершенствования регулирования применения квантовых коммуникаций») включение в линии квантовых коммуникаций космического сегмента