

Методика оценки потерь, обусловленных атмосферной турбулентностью в квантовом канале связи с КРК

М.В. Сапожников, НИЦ «Курчатовский институт», младший научный сотрудник; msapozh@jssc.ru

Ю.Б. Миронов, НИЦ «Курчатовский институт», ведущий инженер; k.t.n.; ymironov@jssc.ru

С.Ю. Казанцев, Московский технический университет связи и информатики, профессор, д.ф.-м.н.; s.i.kazantsev@mtuci.ru

УДК 535.2; 621.391.6; 621.391.8

DOI: 10.34832/ELSV.2025.70.8.007

Аннотация. В статье рассматриваются существующие методы расчета атмосферных потерь в оптическом канале связи, а также новый метод, учитывающий влияние турбулентных ячеек (вихрей) атмосферы различных масштабов. В результате применения новой методики повышается точность расчета атмосферных потерь и, как следствие, точность оценки эффективности спутникового квантового распределения ключей. Сравниваются экспериментальные данные скорости генерации просеянной квантовой ключевой последовательности при нисходящем излучении между спутником и наземной станцией с результатами, полученными при помощи описанной методики оценки потерь, учитывающей влияние вихревой структуры атмосферы.

Ключевые слова: оптическая связь в свободном пространстве, атмосферная турбулентность, вихревая структура, эффективность КРК, методика оценки потерь.

Для цитирования: Сапожников, М.В. Методика оценки потерь, обусловленных атмосферной турбулентностью в квантовом канале связи с КРК / М.В. Сапожников, Ю.Б. Миронов, С.Ю. Казанцев // Электросвязь. – 2025. – № 8. – С. 60–69.

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшим достоинством оптической связи в свободном пространстве является обеспечение безопасности благодаря переходу на перспективные методы защиты информации [1, 2], которые устойчивы к атакам злоумышленников независимо от того, какой вычислительной мощностью они будут располагать (в том числе квантовыми компьютерами) [2–4]. Перспективной технологией, обеспечивающей обмен криптографическими ключами шифрования, устойчивыми к атакам со стороны перехватчиков в канале связи, является технология квантового распределения ключей (КРК), подробно описанная в [1, 5–8].

Создание систем квантовой спутниковой связи — передовая практическая и научно-техническая задача, которую решают многие страны, владеющие высокими технологиями. В том числе в России реализация спутникового сегмента квантовой связи и построение коммерческих квантовых сетей отмечены в качестве приоритетных задач в дорожной карте развития «сквозной» цифровой технологии «Квантовые технологии». Одним из успешных примеров реализации спутниковой квантовой связи является запущенный в 2016 г. Китайской Народной Республикой спутник Micius (Mozi, Мо-цзы) [9–12].

Основными источниками потерь в атмосферном канале являются эффекты поглощения, рассеяния и

турбулентности [13–15]. Атмосферное поглощение и рассеяние происходят при взаимодействии лазерного луча с молекулами газов и частицами аэрозолей [16, 17]. В то же время изменение температуры и давления воздушных масс по ходу распространения оптического излучения, приводит к флуктуации плотности и впоследствии к флуктуациям показателя преломления (атмосферной турбулентности). Таким образом, перераспределение энергии излучения вызывает случайные колебания интенсивности и фазы принимаемого сигнала, что в результате приводит к ухудшению или полному подавлению связи [13].

При восходящем (Земля-спутник) направлении излучения источник искажения находится близко к излучателю и, таким образом, накапливаются искажения, что приводит к большим потерям, чем при нисходящем (спутник-Земля) направлении излучения.

Влияние описанных факторов на потери в атмосферном канале связи должно учитываться на этапе проектирования системы с учетом изменения траектории спутника и потенциального географического местоположения наземного терминала.

Исследование различных факторов, влияющих на эффективность КРК между спутником и наземной приемной станцией из-за быстрого изменения параметров оптического канала в течение сеанса связи