

ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ АТМОСФЕРНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ ДЛЯ РЯДА СХЕМ ПЕРЕДАЧИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

Кузяков Борис Алексеевич

канд. физ.-мат. наук, доц., Лазерная ассоциация Российской Федерации, РТУ МИРЭА, РФ, г. Москва

CAPACITY OF ATMOSPHERIC OPTICAL COMMUNICATION LINES FOR A NUMBER OF TRANSMISSION SYSTEMS OF TELECOMMUNICATION SIGNALS

Boris Kuzyakov

Candidate of Physical and Mathematical Science, Associate Professor, MIREA – Russian Technological University, Moscow; Laser Association of the Russian Federation, Russia, Moscow

Аннотация. Представлены основные преимущества использования систем атмосферной оптической линии связи (АОЛС). Показаны отличия пропускной способности АОЛС для разных конфигураций системы и разнообразных параметров. Приведены варианты ряда аппроксимаций пропускной способности разными функциями для условий относительно сильной турбулентности.

Abstract. The article presents the main advantages of using atmospheric optical communication line (AOCL) systems. The article shows the differences in the AOCL capacity for different system configurations and various parameters. The article presents variants of a number of approximations of the capacity by different functions for conditions of relatively strong atmospheric turbulence.

Ключевые слова: атмосферная, оптическая, линия связи, преимущества, пропускная способность, отличия, варианты, аппроксимация, функция, турбулентность атмосферы.

Keywords: atmospheric, optical, communication line, advantages, throughput, differences, options, approximation, function, atmospheric turbulence.

Введение. Работа системы Free Space Optics (FSO) или атмосферной оптической линии связи (АОЛС) основана на беспроводной передаче данных в оптическом диапазоне в земной атмосфере. Верхняя граница радиоспектра, на который необходимо получать разрешение на его использование, - 400 ГГц. Частоты, используемые в АОЛС, на несколько порядков выше. Поэтому использование оборудования АОЛС не требует никаких дополнительных разрешительных мероприятий, что доказывает большую привлекательность применения такой технологии и оборудования в телекоммуникационных системах.

Базовые особенности. В основе беспроводных оптических систем лежат технологии организации высокоскоростных каналов связи посредством инфракрасного излучения, которые делают возможной передачу данных (текстовые, звуковые, графические данные)

между объектами через атмосферное пространство, предоставляя оптическое соединение без использования стекловолокна [3-4, 11]. Лазерная связь двух объектов осуществляется только посредством соединения типа «точка - точка». Технология основывается на передаче данных модулированным излучением в инфракрасной части спектра через атмосферу. Передатчиком, как правило, служит высокомогущный полупроводниковый лазерный диод. Входной электрический сигнал поступает в приёмно-передающий модуль, в котором кодируется различными помехоустойчивыми кодами, модулируется оптическим лазерным излучателем и фокусируется оптической системой передатчика в узкий коллимированный лазерный луч и передается в атмосферу. На принимающей стороне оптическая система фокусирует оптический сигнал на высокочувствительный фотодиод (или лавинный диод), который преобразует оптический пучок в электрический сигнал. Далее сигнал демодулируется и преобразуется в сигналы выходного интерфейса. Длина волны в большинстве реализованных систем варьируется в диапазонах 700 - 950 нм или 1530 - 1560 нм (рисунок 1).



Рисунок 1. Варианты конструкции передающего и приёмного (справа) модулей системы АОЛС

Оборудование поддерживает определённые стандарты: Ethernet, FastEthernet, G.703 и его работане зависит от действующих протоколов. Универсальность интерфейсов и широкая полоса пропускания позволяют использовать самые различные передовые криптографические алгоритмы. Стандартные системы АОЛС имеют скорость передачи данных от 6 Мб/с до 1,25 Гб/с. На реальном объекте в большинстве систем скорость передачи ограничивается пропускной способностью локальной сети, которую она может поддерживать. Однако, беспроводная система АОЛС реагирует на ослабление мощности принимаемого сигнала некоторым уменьшением скорости передачи данных. Если в ясную погоду, канал на оборудовании FSO работает со скоростью 24 Мб/с, то в условиях, например, моросящего дождя его скорость может снизиться до 18 Мб/с и менее. Обеспечение безопасности имеет особое значение во всех системах беспроводной связи. Поскольку радиочастотные системы излучают сигналы во всех направлениях, то сигналы можно просто и легко перехватывать. Поэтому для повышения безопасности радиочастотных сетей обычно применяют кодирование и различные средства защиты передаваемой информации. Однонаправленный узкий луч света атмосферной оптической линии связи без прерывания передачи данных, перехватить практически невозможно. При этом, беспроводная оптика без труда преодолевает

значительные водные пространства (рисунок 2).

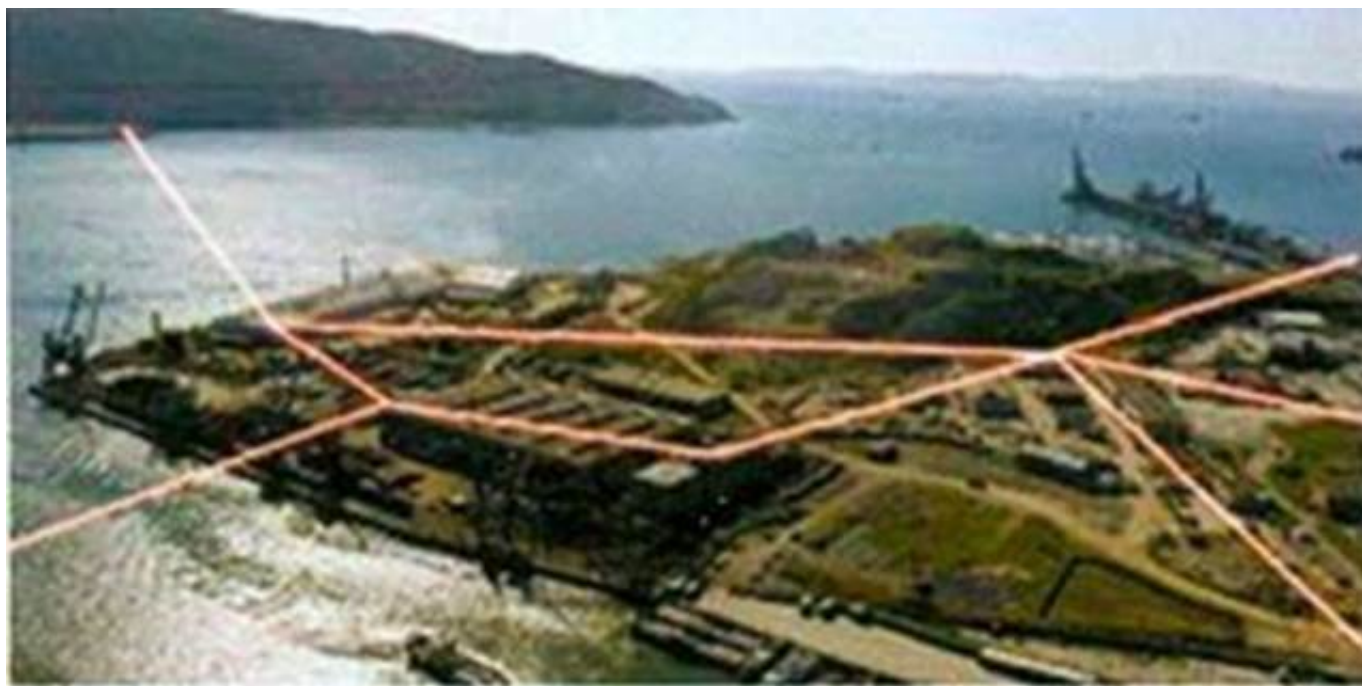


Рисунок 2. Пример реализации телекоммуникационной системы АОЛС на материке и между берегами залива

Заметим, что на рисунке 2, расстояние между берегами залива превышает 300 м. Транспортные магистрали, железнодорожные пути и ЛЭП так же легко преодолимы для систем АОЛС, без особенных затруднений (рисунок 3).



Рисунок 3. Пример применения АОЛС в сложных техногенных условиях

Запуск канала АОЛС занимает всего несколько часов, поэтому оптические линии связи не

имеют конкурентов при ограниченных сроках реализации связанных систем. Технология АОЛС позволяет создавать почти неограниченное количество каналов в непосредственной близости друг от друга. АОЛС-системы нечувствительны к электромагнитным помехам и не производят их. Кроме того, инфракрасное излучение безвредно для здоровья людей, а обычное обслуживание оборудования состоит в ежегодной профилактике оптики. Все перечисленные особенности подтверждаются многочисленными фирмами во многих странах, в частности, компания «ADVANTEK SYSTEMS», которая считается интегратором в телекоммуникациях, широко использует системы АОЛС. Таким образом, вкратце, можно констатировать, что основными преимуществами использования систем АОЛС являются [3-4, 11]: 1) быстрая организация канала связи; 2) отсутствие необходимости получения разрешений на частоты; 3) отсутствие влияний соседних каналов и электромагнитного шума; 4) отсутствие арендной платы за канал; 5) высокая степень безопасности.

Для подкрепления перечисленных преимуществ АОЛС приводим сравнительную таблицу 1.

Таблица 1.

Наиболее используемые системы связи

Тип связи	Медный кабель	Оптоволокно	Радиоканал
Максим.пропускная способность	2 Мбит/с	155 Мбит/с	155 Мбит/с
Время на подготовку и монтаж	1 месяц	1 – 2 месяца	2 – 3 месяца
Максим. дальность связи	20 км	50 -70 км	80 км
Примерная стоимость	300 -700 тыс. руб. за 1 км	до 1 млн руб. за 1 км	700 – 10 млн. руб. за комплект
Частота появления ошибочных битов	$\geq 1 \text{ E}^{-7}$	$\leq 1 \text{ E}^{-10}$	1 E^{-10}

Конкретные данные в таблице 1 подтверждают ряд преимуществ АОЛС в сравнении с другими системами связи. Значения пропускных способностей атмосферных оптических линий связи (АОЛС) могут отличаться для разных конфигураций систем и разнообразных параметров. Наибольшее распространение [3, 12] получили системы: А) Одновременной адаптации мощности и скорости передачи (ППМС); Б) Преобразование при постоянной мощности передачи (ППМ); В) Преобразование с фиксированной скоростью передачи (ПФСП). Величины {С} перечисленных пропускных способностей АОЛС могут быть представлены математическими выражениями:

$$\{C\}_{\text{ППМС}} = ((2^{\alpha + \beta - 1}) / (2 \ln(2) \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta))) G_{26}^{60} [(\alpha^2 \beta^2 \gamma_{\text{TH}}) / 16 \gamma^*]_{\xi_{2,0,0}}^{\xi_1}, \quad (1)$$

где $\xi_1 = \{1, 1\}$ и $\xi_2 = \{\alpha/2, (\alpha + 1)/2, \beta/2, (\beta + 1)/2\}$.

$$\{C\}_{\text{ППМ}} = ((2^{\alpha + \beta - 1}) / (2 \ln(2) \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta))) G_{62}^{16} [16 \gamma^* / (\alpha^2 \beta^2)]_{\xi_4}^{\xi_3}, \quad (2)$$

где $\xi_3 = \{1, 1, (1 - \alpha)/2, (2 - \alpha)/2, (1 - \beta)/2, (2 - \beta)/2\}$ и $\xi_4 = \{1, 0\}$.

$$\{C\}_{\text{ПФСП}} = [1 / \ln(2)] \ln \{ 1 + [(\alpha^2 \beta^2 \gamma_{\text{TH}}) / (16 \gamma^*)]_{\xi_{2,1}}^2 (G_{15}^{50} (2^{\alpha + \beta - 1}) / (2 \ln(\alpha) \Gamma(\beta) \gamma^*))^{-1} \} \times [1 - (\alpha \beta \sqrt{\gamma_{\text{TH}} / \gamma^*})_{|\alpha, \beta, 0} G_{13}^{21} / (2 \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta))], \quad (3)$$

здесь, обозначения соответствуют вышеприведённым.

Эти математические выражения имеют весьма непростой вид и включают много разнообразных параметров [7 - 9]. Для повышения наглядности рассматриваемой пропускной способности АОЛС приводим графическую экспериментальную (рисунок 4) зависимость

(точки зелёного цвета).

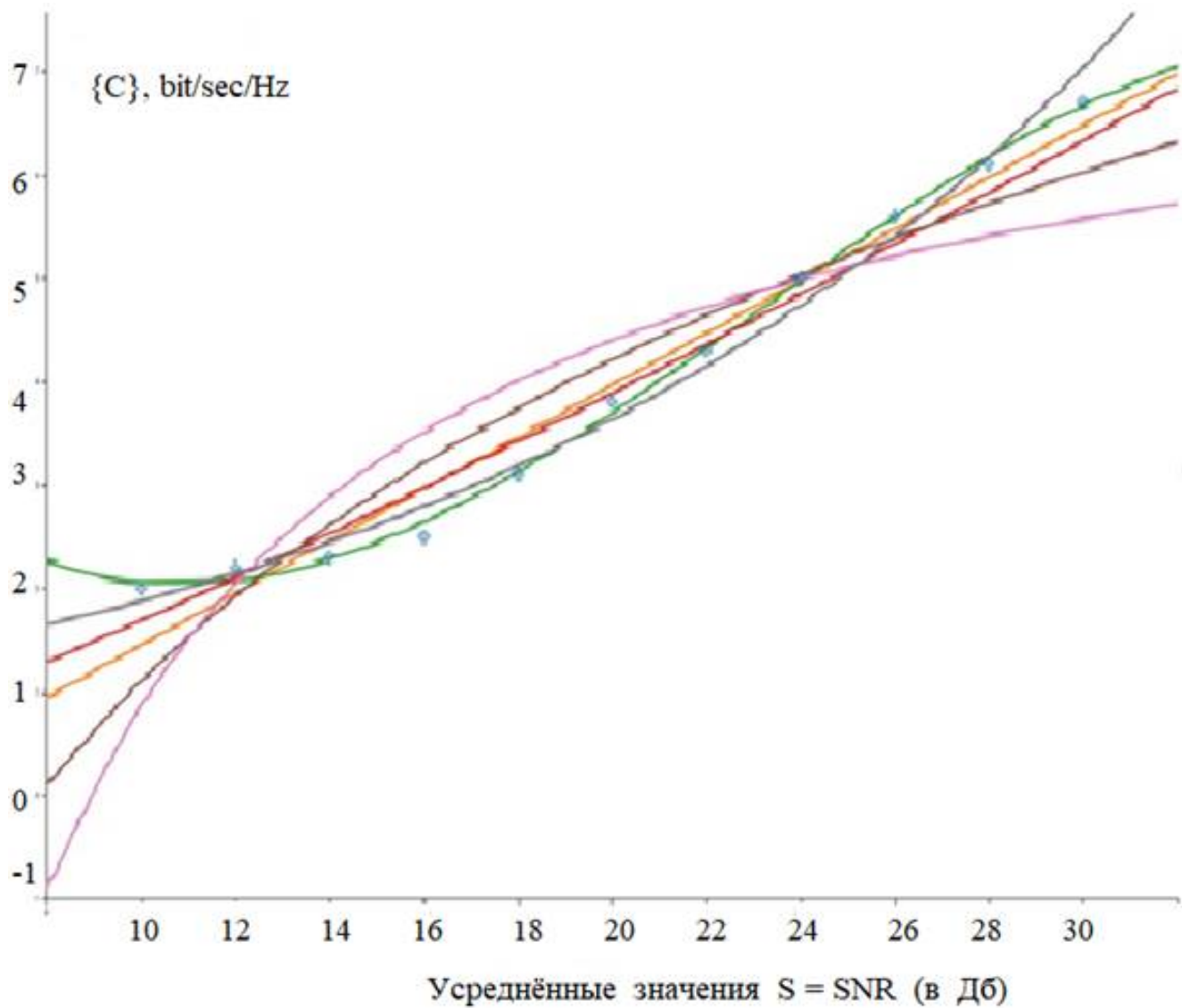


Рисунок 4. Экспериментальная зависимость $\{C\}$ системы ПФСП и варианты аппроксимаций разными функциями для условий относительно сильной турбулентности $C_n^2 = 0.9866 \times 10^{-14}$

Хотя, измеренная зависимость на рисунке 4, имеет нелинейный вид [4 - 6], её можно аппроксимировать несколькими функциями (таблица 2).

Таблица 2.

Виды регрессии функции при аппроксимации экспериментальных данных

Вид регрессии	Коэффициент детерминации	
Линейная: $F = 0.2509 S - 1.0545$	0.9697	
Кубическая $F = -0.0007 S^3 + 0.0493 S^2 - 0.8179 S + 6.0155$	0.9979	

Степенная		
$F = 0.1061 S^{1.2017}$	0.9714	
Показательная		
$F = 0.9723 \times 1.0682^S$	0.9858	
Логарифмическая		
$F = - 9.2005 + 4.4768 \times \ln S$	0.9014	
Гиперболическая		
$F = 7.9232 - 70.5404/S$	0.7924	
Экспоненциальная		
$F = \exp (0.2358 + 0.0660) S$	0.9729	

Из графиков рисунка 4 и таблицы 2, видно, что наименьшей средней ошибкой аппроксимации, менее 2 %, обладает кубическая регрессия (1,9737 %):

$$\{C\} = - 0.0007 S^3 + 0.0493 S^2 - 0.8179 S + 6.0155 \quad (4)$$

В дальнейшем, мы именно ей мы будем отдавать предпочтение (рисунок 4, сплошная линия зелёного цвета). На рисунке 5, показаны разности зависимостей пропускной способности канала АОЛС для двух схем передачи сигналов [10-12]. На этом рисунке 5, нижняя кривая носит более плавный характер, однако все её величины C^* значительно меньше верхней кривой. Поэтому можно считать, что рядом преимуществ по пропускной способности канала АОЛС, обладают системы ПФСП (верхняя кривая).

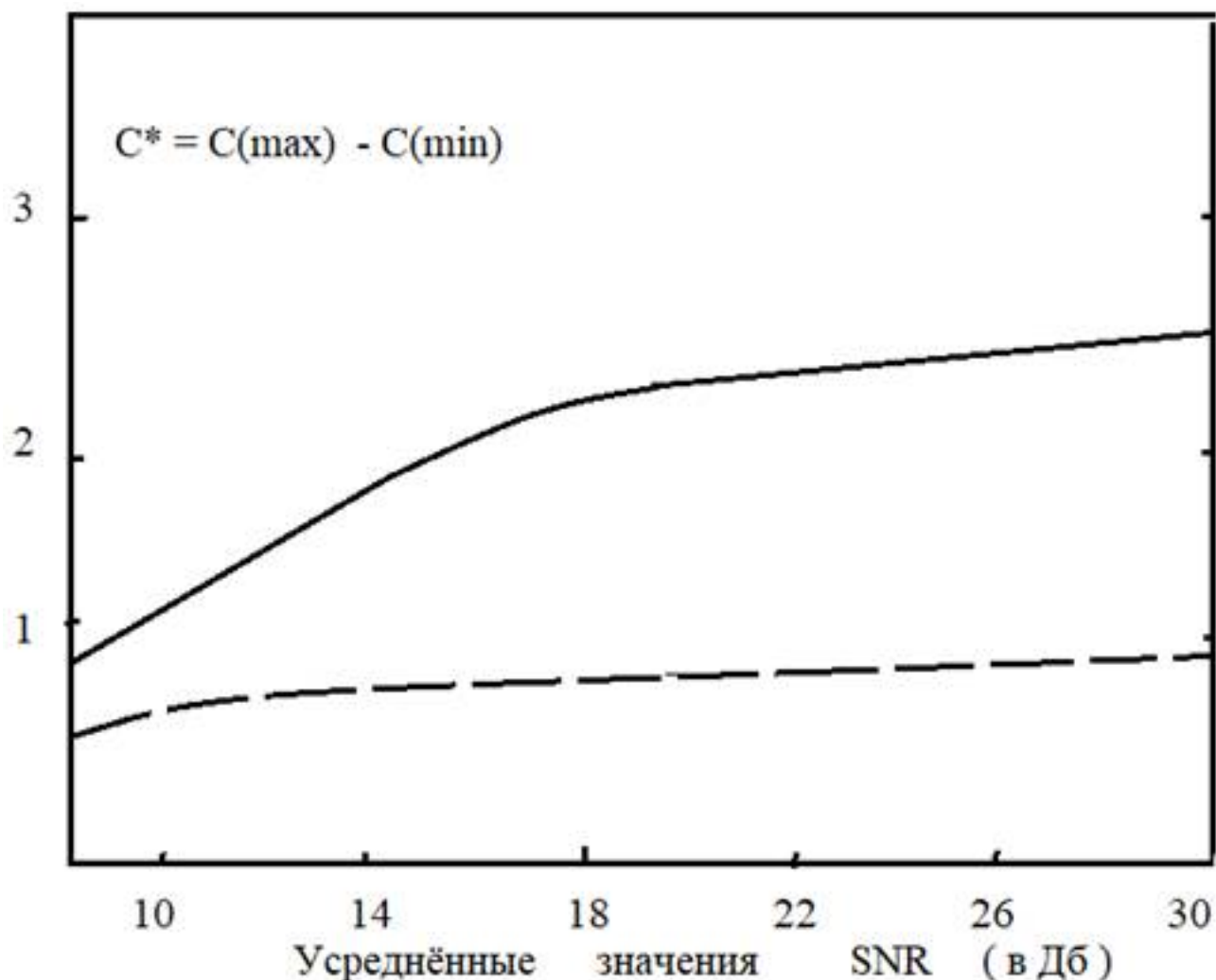


Рисунок 5. Зависимости разности значений пропускной способности канала АОЛС для двух схем передачи сигналов от величин SNR: сплошная линия -ПФС; пунктир - ППМ; C^* - в (bit/sec/Hz); $C(\max) = C_n^2 = 0.9866 \times 10^{-14}$; $C(\min) = C_n^2 = 0.1409 \times 10^{-14}$

Для нижней кривой все её значения меньше верхней в 1,5 – 2 раза, поэтому предпочтение остаётся за сплошной кривой.

Заключение. Таким образом, проведённые исследования пропускной способности атмосферных оптических линий связи показывают ряд преимуществ систем ПФСП и имеют большое значение для повышения их надёжности и эффективности.

Список литературы:

1. Больбасова Л.А., Лукин В.П. Аналитические модели высотной зависимости структурной постоянной показателя преломления турбулентной атмосферы для задач адаптивной оптики. Оптика атмосферы и океана. – Москва, 2016, т. 29, № 11, с. 918 – 925.; DOI: 10.15372/A0020161104.
2. Botygina N.N., Kopylov E.A., ets. Variability of the atmospheric turbulence in the region lake of Baykal. Proc. SPIE, 2015, v. 9680, p. 96806E.
3. Кузяков Б.А. Влияние турбулентности атмосферы на эффективность лазерных телекоммуникаций. Научный форум: Инновационная наука. Сб. статей по материалам LXXXIV

Международной научно - технической конференции. –Москва, 2025, № 5(84), с. 54 – 59.

4. Кузяков Б.А. Лазерные коммуникации на Земле и в космосе. – Москва, 2025, Де*Либри, 208 с.

5. Куликов А.И. Построение атмосферной оптической линии связи. Реф. Государственный Университет, Братск, 10 с.; Kulikov_ai.pdf; brstu.ru.

6. Лукин В.П. Атмосферная адаптивная оптика. – Новосибирск, 1986, Наука, 248 с.

7. Махмуд М.Х.А., Румянцев К.Е., Шакир А.Б.А.Х. Анализ восходящего канала спутниковой коммуникации в условиях атмосферной турбулентности. Известия ЮФУ. Технические науки. – 2023, с. 174 - 191; DOI 10.18522/2311-3103-2023-4-174-191.

8. Носов В.В., Лукин В.П., Носов Е.В., и др. Исследования астроклимата в специальной Астрофизической обсерватории РАН. Оптика атмосферы и океана. – Москва, 2018, т. 31, № 8, с. 616 – 627.

9. Отчёт по НИР «Разработка нового поколения аппаратуры гибридных каналов передачи мультимедийной информации на базе лазерной и радио технологий». – Москва, 2012, ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. - № госрегистрации 01201068165; 14-740 11- 0392. pdf.

10. Roberts L.C., Bradford Jr .L. Improved models of upper-level wind for several astronomical observatories. Optical Express. – 2011, v.19, N 2, p. 820 - 837.

11. Shankar P.M. Fading and shadowing in wireless systems. – 2017, 817 p.

12. Sharma K., Grewal S.K. Capacity analysis of free space optical communication system under atmospheric turbulence. Optical and Quantum Electronics. – 2020, v. 52, art. No. 82.