

АТМОСФЕРНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ ЛИНИЯ СВЯЗИ С ПОЛЯРНЫМ КОДИРОВАНИЕМ

Р.П. Краснов, А.В. Бобровников

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: атмосферные оптические линии связи (АОЛС) представляют собой широкополосную альтернативу радиочастотных систем передачи «последней мили», обеспечивая быстроту и легкость развертывания, работу в нелицензируемом диапазоне длин волн, высокую частотную эффективность и скрытность. В то же время ряд атмосферных явлений, таких как туман, сильный дождь или снегопад, а также присутствие турбулентности в атмосферном оптическом канале может привести к серьезному ухудшению качества связи. Для снижения влияния этого фактора при сохранении простоты устройства оптического приемника предложено использовать методы помехоустойчивого кодирования. В статье Для этой цели рассматривается использование полярных кодов, поскольку они позволяют достичь наилучших показателей информационной эффективности оптического канала. Представлена одноканальная система атмосферной оптической связи с модуляцией интенсивности и некогерентным детектированием. Для условий распространения в статистике гамма-гамма распределения приведены результаты моделирования методом Монте-Карло. Показано, что применение предложенного метода кодирования для скоростей 0,5 и 0,75 показывает эффективность полярных кодов в АОЛС для снижения влияния затухания, вызванного атмосферной турбулентностью при сохранении сравнительно низкой вычислительной сложности кодеков

Ключевые слова: АОЛС, вероятность ошибки, помехоустойчивое кодирование

Введение

Атмосферные оптические линии связи (АОЛС) представляют собой широкополосную технологию оптической беспроводной связи. Это экономически эффективное решение для связи на «последней миле», по сравнению с радиочастотными системами связи дающее ряд преимуществ. К ним можно отнести более высокую пропускную способность канала, нелицензируемый частотный диапазон, высокий уровень защищенности канала и устойчивость к электромагнитным помехам [1]. Однако в практически реализуемых системах АОЛС на качество связи оказывают влияние ряд факторов, таких как геометрические потери, ошибки нацеливания, потери из-за атмосферного затухания и турбулентности, фоновый шум [2].

Влияние атмосферной турбулентности, которое приводит к флюктуациям амплитуды и фазы оптических сигналов из-за неоднородностей температуры и давления в атмосферном канале связи, является фактором, наиболее сильно снижающим качество связи. Для решения этой проблемы используются различные методы, к наиболее употребимым среди которых можно отнести пространственное разнесение, использование ретрансляторов, а также развертывание гибридных радиооптических систем [1]. Учитывая высокую пропускную

способность каналов АОЛС можно считать, что параметры канала будут медленно меняться во времени (т. е. будут иметь место медленные замирания), тогда параметрами передачи можно управлять, располагая информацией о состоянии канала (CSI), которая передается через канал обратной связи.

Одним из весьма эффективных путей решения такой проблемы является применение помехоустойчивого кодирования.

Было предложено сравнительно большое число кодов, потенциально повышающих помехоустойчивость оптических систем связи, например, турбокоды, коды с низкой плотностью проверок на четность (LDPC), коды Рида-Соломона [3]. Коды LDPC обеспечивают больший энергетический выигрыш кодирования по сравнению с кодами Рида-Соломона [4]. В литературе описаны каналы АОЛС с пространственно-временными, повторными и бесскоростными схемами кодирования.

В качестве перспективного решения могут быть использованы полярные коды, впервые предложенные Ариканом [5], которые могут достигать предела пропускной способности двоичного симметричного канала без памяти. Как известно, такие коды введены в стандарт беспроводной связи 5G как позволяющие реализовать максимум производительности системы передачи данных.

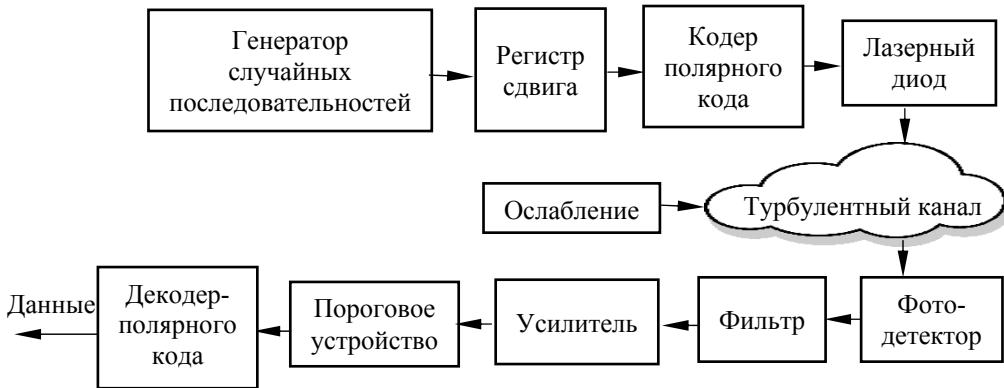


Рис. 1

Модель системы

В статье рассмотрена система атмосферной оптической связи, структурная схема которой представлена на рис. Из соображений простоты анализа выбран оптический передатчик с модуляцией интенсивности, а оптический приемник считается некогерентным. Шумы засветки полагаются малыми, следовательно, приемник работает в режиме ограничения тепловыми шумами, моделируемыми гауссовским распределением с нулевым средним [1].

Оптический канал связи далее будет рассматриваться как дискретный по времени двоичный симметричный со стираниями. Воздействие его на передаваемый сигнал будет заключаться в комбинации эффектов атмосферного ослабления и турбулентности. Моделирование распространения оптического сигнала будет проводиться в предположении плоского волнового фронта. Тогда принимаемый сигнал можно описать математическим выражением вида

$$I_R = \eta h I_0 + n, \quad (1)$$

где I_0 и I_R представляют собой интенсивности передаваемого и принимаемого сигналов соответственно, η — чувствительность фотодетектора, h — затухание интенсивности, обусловленное влиянием атмосферного турбулентного канала, n — гауссовский белый шум с нулевым средним.

Поскольку требуется обеспечение неотрицательности оптического сигнала, для угловой модуляции требуется присутствие постоянного смещения. Поэтому далее будет рассмотрен простейший тип модуляции добротности, представляя передаваемый сигнал как $I_0 = P_0 x$, где P_0 — выходная мощность излучателя, $x \in \{0, 1\}$.

Как упоминалось выше, оптический сигнал при распространении в канале подвергается

ослаблению, описываемому законом Бира-Ламберта [1]

$$I_R / I_0 = \exp(-\gamma L), \quad (2)$$

где I_R, I_0 — интенсивности принимаемого и передаваемого оптического сигнала соответственно, γ — коэффициент экстинкции, L — расстояние между передающим и приемным модулем. Величина γ в большинстве случаев определяется влиянием Ми-рассеяния, при этом γ будет равен [1]:

$$\gamma = \frac{3.91}{V} \left(\frac{\lambda_0}{550} \right)^{-q_V},$$

где V — метеорологическая дальность видимости, λ_0 — длина волны, q_V — метеокоэффициент, расчет которого приведен, например, в [1].

Основной причиной возникновения турбулентности является появление перепадов температуры и давления, что приводит к образованию воздушных течений в атмосфере. В результате в канале связи формируются области турбулентности с различными коэффициентами преломления, представляющими собой случайные величины. При распространении через эти области неоднородности волновой фронт оптического пучка искажается. Это приводит к случайному распределению фаз и, вследствие интерференции, также к случайному распределению оптической мощности в поперечном сечении пучка. В результате возникает явление сцинтиляции, когда интенсивность оптического сигнала на приемной апертуре также становится случайной.

Атмосферную турбулентность таким образом удобно определять как случайный процесс. Для его статистического описания в данной статье использовано гамма-гамма распределение при всех видах атмосферной турбулентности [4].

Величину турбулентности будем характеризовать дисперсией Рытова: $\sigma_p^2 = 1,23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$, где C_n^2 – структурная константа показателя преломления, k – волновое число.

Плотность вероятности процесса, описываемого гамма-гамма распределением, равна [4]:

$$p(I_R) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I_R^{(\alpha+\beta)/2-1} K_{\alpha-\beta}\left(2\sqrt{\alpha\beta I_R}\right), \quad (3)$$

где α и β — эффективные размеры крупно- и мелкомасштабных областей турбулентности соответственно, $\Gamma(x)$ — гамма-функция. Для плоского волнового фронта эти коэффициенты определяются как [1, 4]:

$$\alpha = \left(\exp \left[\frac{0,49\sigma_p^2}{(1+0,65d^2+1,11\sigma_p^{12/5})^{7/6}} \right] - 1 \right)^{-1},$$

$$\beta = \left(\exp \left[\frac{0,51\sigma_p^2(1+0,69\sigma_p^{12/5})^{-5/6}}{1+0,9d^2+0,62d^2\sigma_p^{12/5}} \right] - 1 \right)^{-1},$$

где $K_a(x)$ — модифицированная функция Бесселя порядка a второго рода.

Степень флуктуаций интенсивности будем оценивать индексом сцинтиляции σ_i^2 [4]:

$$\sigma_i^2 = \frac{m[I_R^2]}{m^2[I_R] - 1}, \quad (4)$$

где m — оператор матожидания.

Для снижения влияния сцинтиляции применяется техника апертурного усреднения. В этом случае выражение для расчета индекса сцинтиляции приобретает вид [4]:

$$\sigma_i^2(D) = \exp \left[\frac{0,49\sigma_p^2}{(1+0,65d^2+1,11\sigma_p^{12/5})^{7/6}} + \right. \\ \left. + \frac{0,51\sigma_p^2(1+0,69\sigma_p^{12/5})^{-5/6}}{1+0,9d^2+0,62d^2\sigma_p^{12/5}} \right] - 1, \quad (5)$$

где D — диаметр приемной апертуры, а

$$d = \sqrt{\frac{kD^2}{4L}}.$$

Для повышения помехоустойчивости в АОЛС использован кодек полярного кода. Впервые описанные Ариканом [5], полярные коды достигают пропускной способности канала. Согласно представленной концепции, такие коды используют принцип передачи через набор поляризованных каналов. В той их части, которая соответствует каналам без помех, можно достичь Шенноновского предела пропускной способности для двоичного канала без памяти. Определим полярный код как (N, K, A) —

код, где K и N — длина информационной и кодовой частей соответственно, A — множество «замороженных» бит, получаемых в результате поляризации канала. Концепция поляризации [5, 6] состоит в создании N поляризованных каналов, в каждом из них передаются биты с различной вероятностью декодирования.

Кодер полярного (N, K) — кода для каждого вектора информационного сообщения $\mathbf{u} = [u_0, u_1, u_2, \dots, u_{N-1}]$ назначает K информационных бит для K наиболее надежных каналов. Оставшиеся $N-K$ бит обзываются «замороженными» и не несут информации [5, 6]. Получаемая кодовая комбинация $\mathbf{c} = [c_0, c_1, c_2, \dots, c_{N-1}]$ определяется согласно уравнению кодирования:

$$\mathbf{c} = \mathbf{u} \times \mathbf{G}_N, \quad (6)$$

где \mathbf{G}_N — матрица преобразования размерности $N \times N$, заданная как

$$\mathbf{G}_N = \mathbf{G}_2^{\otimes n}, \quad \mathbf{G}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

где $n = \log_2(N)$ — длина кода, символом \otimes обозначено произведение Кронекера.

При распространении по общему набору каналов символы из \mathbf{u} преобразуются в выходной вектор $\mathbf{y} = [y_0, y_1, \dots, y_{N-1}]$.

Выбор каналов для передачи информационных и замороженных бит на передающей стороне определяется на основе вычисления параметра Бхаттачарья. Это верхний предел для вероятности ошибки при декодировании по методу максимального правдоподобия, определяемый как

$$Z_B = \sum_y \sqrt{P(y|0)P(y|1)}. \quad (8)$$

На приемной стороне выполняется декодирование с последовательным исключением (SC).

Поскольку кодовые блоки в полярном кодере добавляют корреляцию между битами информации, каждый бит кода связан со всеми своими предыдущими битами. Такая корреляция эквивалентна наличию помех в последовательности информационных бит, которые, тем не менее, повышают эффективность декодирования. Это свойство лежит в основе центрального принципа алгоритма декодирования с последовательным исключением. Здесь последовательное исключение «помех», которые были вызваны последовательностью предшествующих бит, ведет к росту надежности восстановления бит информации. Регулярность структу-

ры полярных кодов позволяет описывать алгоритм SC в виде кодовой решетки или кодового дерева аналогично, например, декодеру Виттерби или кода LDPC.

Само декодирование по методу SC можно рассматривать как комбинацию алгоритмов принятия мягких и жестких решений при проходе по решетке полярного кода. Кодовая решетка может быть структурирована в виде n этапов и N уровней. Каждый этап включает $N/2$ блоков, а каждый блок состоит из двух узлов проверки и переменных [7].

Жесткие решения, распространяющиеся по решетке, представляют собой биты оценки для узлов переменных. Мягкие решения, соответствующие этим битам, вычисляются на основе соответствующего логарифмического отношения правдоподобия.

Таким образом выполняется поиск в двоичном дереве, вершины которого представляют информацию и замороженные биты, в также их конкатенацию. Декодер находит решение, используя вычисление отношения правдоподобия для каждого символа на каждом уровне поляризации канала на основе жадного алгоритма одноразового прохода по дереву.

Численное моделирование

При моделировании рассматривалась система атмосферной оптической связи со следующими характеристиками. Передавались оптические сигналы мощностью 5 мВт с модуляцией интенсивности излучения на рабочей длине волны 1550 нм на расстояние 800 м. Диаметры апертур передающего и приемного модулей были выбраны равными 10 см, квантовая эффективность фотодиода принималась равной 0,5.

Оптический турбулентный канал оказывал ослабление на сигнал согласно (2), также определялось влияние слабой ($C_n^2 = 4 \cdot 10^{-14}$, $\sigma_p^2 = 0,22$), средней ($C_n^2 = 3 \cdot 10^{-13}$, $\sigma_p^2 = 1,5$) и сильной ($C_n^2 = 7 \cdot 10^{-13}$, $\sigma_p^2 = 3,5$) турбулентности.

Кодер источника данных для битового потока скоростью 1 Мбит формировал полярный код длиной $N = 512$ бит со скоростью кодирования 0,5 и 0,75. Декодер работал по схеме декодирования SC, длина списка декодирования $L = 8$ для всех случаев.

На рис. 2-4 приведены характеристики помехоустойчивости АОЛС с применением полярных кодов, полученные при помощи моделирования по методу Монте-Карло для случая

слабой, средней и сильной турбулентности соответственно.

Как следует из рис. 2, для случая слабой турбулентности применение полярных кодов со скоростью кодирования 0,5 и 0,75 соответственно позволяет получить энергетический выигрыш кодирования составляет 16,5 и 14 дБ по сравнению с некодированной передачей (для вероятности ошибки $P_{\text{шиб}} = 10^{-5}$).

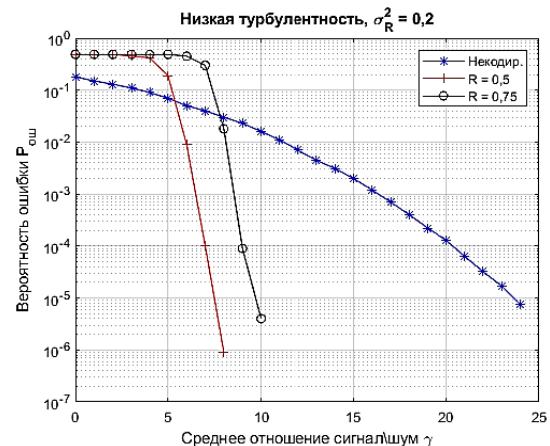


Рис. 2

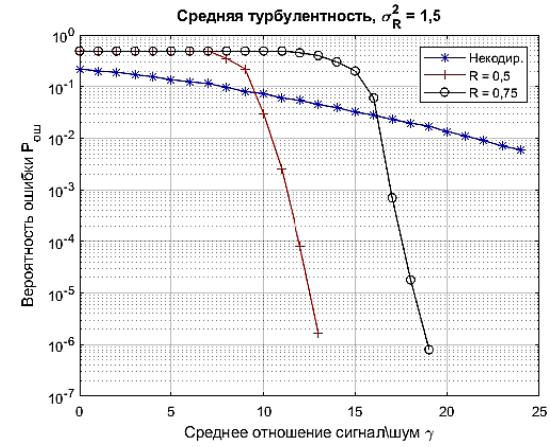


Рис. 3

В случае умеренной турбулентности, как показано на рис. 3, для полярных кодов со скоростью кодирования 0,5 и 0,75 соответственно энергетический выигрыш кодирования увеличивается более чем на 20 дБ при той же вероятности ошибки. Из зависимостей на рис. 4, приведенных для случая сильной турбулентности, энергетический выигрыш кодирования также представляет собой величину, существенно большую 20 дБ для той же вероятности ошибки.

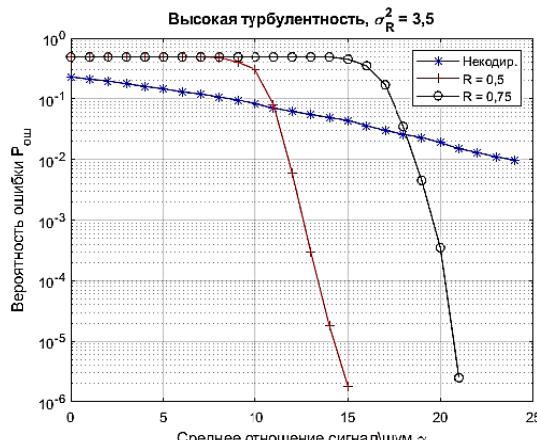


Рис. 4

Разница в помехоустойчивости систем АОЛС, в которых применены полярные коды со скоростью 0,5 и 0,75 растет по мере увеличения турбулентности, из чего можно сделать вывод о том, что более низкая скорость кода полярного кода будет более устойчива к замираниям, вызываемым атмосферной турбулентностью.

Заключение

В статье исследованы перспективы применения полярных кодов в качестве методов снижения влияния атмосферной турбулентности на качество связи в АОЛС. Показано, что поляр-

ные коды позволяют получить энергетический выигрыш кодирования более 20 дБ.

Следовательно, полярные коды могут выступать одной из эффективных технологий АОЛС, служащих для снижения влияния замираний, вызванных атмосферной турбулентностью.

Литература

- Son I.K, Mao S. A survey of free space optical networks // Digital communications and networks. Vol. 3. No. 2. 2017. pp. 67-77.
- Andrews L., Phillips R., Hopen C. Laser beam scintillation with applications // New York: SPIE Press, 2001. 416 p.
- Краснов Р.П. Атмосферная оптическая линия связи с применением помехоустойчивого кодирования // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2024. Т. 20. № 3. С. 132-140.
- Uysal M., Li J.T., Meng Y., Error rate performance analysis of coded free-space optics link over gamma-gamma atmospheric turbulence channels // IEEE transactions on wireless communications. 2006. Vol. 5. No. 6. pp. 1229-1233.
- Arikan E. Channel polarization: a method for constructing capacity achieving codes for symmetric binary-input memoryless channels // IEEE Transactions on Information Theory. 2009. Vol. 55. Issue 7. pp. 3051-3073.
- Pfister H.D. A brief introduction to polar codes. notes for introduction to error-correcting codes. [Электронный ресурс]. URL: <http://pfister.ee.duke.edu/courses/ece655/polar.pdf> (дата обращения: 18.05.2025).
- Application of polar codes for free space optical communication / K. Ito [et al.] //2017 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), Naha, Japan. 2017. pp. 183-187.

Поступила 16.06.2025; принята к публикации 14.11.2025

Информация об авторах

Краснов Роман Петрович – канд. техн. наук, доцент кафедры радиотехники, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: rpkrasnov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4065-4557>

Бобровников Александр Васильевич – канд. техн. наук, доцент кафедры радиотехники, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: bobrovnikov.alexander@yandex.ru

FREE-SPACE OPTICAL SYSTEM WITH POLAR CODING

R.P. Krasnov, A.V. Bobrovnikov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: atmospheric optical communication lines (AOCLs) offer a broadband alternative to radio frequency (RF) "last-mile" transmission systems, offering speed and ease of deployment, operation in unlicensed wavelengths, high frequency efficiency, and security. However, certain atmospheric phenomena, such as fog, heavy rain, or snowfall, as well as turbulence in the atmospheric optical channel, can significantly degrade communication quality. To reduce the impact of this factor while maintaining the simplicity of the optical receiver, we proposed to use error-correcting coding methods. This article proposes the use of polar codes for this purpose, as they allow for achieving the best information efficiency of the optical channel. We considered a single-channel atmospheric optical communication system with intensity modulation and noncoherent detection. We present Monte Carlo simulation results for propagation conditions in the gamma-gamma distribution statistics. We show that the application of the proposed coding method for rates of 0.5 and 0.75 demonstrates the effectiveness of using polar codes in AOCLs to reduce the impact of attenuation caused by atmospheric turbulence while maintaining a relatively low computational complexity of codecs

Key words: AOCL, error probability, interference-resistant coding

References

1. Son I.K., Mao S. "A survey of free space optical networks", *Digital Communications and Networks*, 2017, vol. 3, no. 2, pp. 67-77.
2. Andrews L., Phillips R., Hopen C. "Laser beam scintillation with applications", New York: SPIE Press, 2001, 416 p.
3. Krasnov R.P. "Atmospheric optical communication line using noise-immune coding", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2024, vol. 20, no. 3, pp. 132-140.
4. Uysal M., Li J.T., Meng Y. "Error rate performance analysis of coded free-space optics link over gamma-gamma atmospheric turbulence channels", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2006, vol. 5, no. 6, pp. 1229-1233.
5. Arikan E. "Channel polarization: a method for constructing capacity achieving codes for symmetric binary-input memoryless channels", *IEEE Transactions on Information Theory*, 2009, vol. 55, issue 7, pp. 3051-3073.
6. Pfister H.D. "A brief introduction to polar codes. Notes for introduction to error-correcting codes", available at: <http://pfister.ee.duke.edu/courses/ecn655/polar.pdf> (date of access: 18.05.2025).
7. Ito K., Okamoto E., Takenaka H., Kunimori H., Toyoshima M. "Application of polar codes for free space optical communication", *2017 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS)*, Naha, Japan, 2017, pp. 183-187.

Submitted 16.06.2025; revised 14.11.2025

Information about the authors

Roman P. Krasnov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia) e-mail: rpkrasnov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4065-4557>
Aleksandr V. Bobrovnikov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia) e-mail: bobrownickov.alexander@yandex.ru