

*С. В. Молчанов, С. Н. Чижма, М. Д. Холмогорова*

**ПРИМЕНЕНИЕ АДАПТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ  
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ  
БЕСПРОВОДНОГО ОПТИЧЕСКОГО КАНАЛА СВЯЗИ**

Поступила в редакцию 02.06.2021 г.

Рецензия от 21.06.2021 г.

86

*Рассмотрена возможность применения адаптивных алгоритмов управления в беспроводных оптических системах для повышения их производительности. Предложено применение обратной связи для создания динамической адаптивной системы, использующей подстройку уровня передаваемой мощности, изменение типа модуляции и скорости кодирования для преодоления атмосферного затухания. Проведено моделирование и анализ параметров оптической системы на различных дистанциях со скоростью передачи данных 1 Гбит/с с учетом особенностей распространения оптического сигнала в свободном пространстве. Производительность предлагаемой беспроводной оптической системы связи с динамическим управлением оценивается при показателе качества BER не более  $10^{-8}$ .*

*The possibility of using adaptive control algorithms in wireless optical systems to improve their performance is considered. The use of feedback is proposed to create a dynamic system using the adjustment of the transmitted power level, changing the type of modulation and coding rate for atmospheric attenuation. Modeling and analysis of the system parameters at various distances with a data transmission rate of 1 Gbit / s, taking into account the propagation of an optical signal in free space, have been carried out. The performance of the proposed wireless optical communication system with dynamic control is estimated at quality indicator BER no more than  $10^{-8}$ .*

**Ключевые слова:** атмосферная оптическая линия связи (АОЛС), адаптивные системы, гибридные оптические системы, адаптивная атмосферная оптическая линия связи (ААОЛС)

**Keywords:** free-space optical communication line (FSO), adaptive optic systems, hybrid optical systems, adaptive free-space optical communication line (AFSO)

В настоящее время в России в рамках реализации национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации» существует потребность в увеличении пропускных способностей в беспроводных системах связи для устранения проблемы цифрового неравенства. Достичь требуемых скоростей передачи с помощью радиочастотной связи можно в миллиметровом диапазоне длин волн, но использование таких систем ограничивается высокой стоимостью оборудования и малым радиусом покрытия. В таких случаях адаптивные оптические линии связи (ААОЛС) становятся более привлекательной альтернативой радиочастотной технологии связи с точки зрения скорости передачи, стоимости, дальности связи при построении фиксированных систем



связи. В то же время беспроводные оптические системы связи обладают высокими уровнями затухания в свободном пространстве и сильной зависимостью от погодных условий, что в результате ограничивает широкое применение АОЛС [1].

Целью данной работы является исследование возможности применения комбинации методов повышения производительности беспроводных оптических систем передачи информации, осуществляющих адаптивное управление: изменение передаваемой мощности, типа модуляции и кодирования. Предлагаемая оптическая система с динамическим управлением (ОСДУ) позволит решить перечисленные проблемы АОЛС.

Адаптивная система ААОЛС должна реагировать на изменения в канале связи, контролируя уровень и качество принимаемого сигнала, и соответствующим образом подстраивать параметры передающей части [2] для обеспечения нормированных значений качества канала связи. Схема конфигурации системы ОСДУ представлена на рисунке 1. Использование обратной связи в оптическом канале с резервированием с помощью радиоканала (Wi-Fi, LTE) позволяет постоянно отслеживать параметры принимаемого сигнала для оценки затухания в ААОЛС и соответствующим образом подстраивать систему.

87



Рис. 1. Схема построения оптической системы передачи с динамическим управлением

На оптический сигнал при распространении в атмосфере влияют различные факторы, серьезно ухудшая производительность системы ААОЛС, особенно эффект мерцания, подобный эффекту замирания, возникающий в результате случайного изменения показателя преломления вследствие изменения температуры и давления воздуха [3; 8]. Для канала, работающего со скоростью 1 Гбит/с, это может привести к потере до 100 – 120 последовательных битов.

### Применение различных методов модуляции

В системах связи АОЛС используются различные методы модуляции, включая двухпозиционную манипуляцию (ОК), двоичную фазовую манипуляцию (BPSK), квадратурную фазовую манипуляцию (QPSK)



и квадратурную амплитудную модуляцию (QAM). Среди них ООК — самый простой и широко используемый метод, но он чрезвычайно чувствителен к атмосферной турбулентности и требует адаптивного порога для оптимизации системы [4]. Методы фазовой модуляции обладают высокой чувствительностью и помехоустойчивостью, что позволяет использовать их для построения системы ААОЛС.

На основе базовой модели атмосферного оптического канала связи, представленной на рисунке 2, проанализирована работа системы ААОЛС с использованием различных методов модуляции. Производительность атмосферной оптической линии связи исследовалась в условиях слабой и сильной турбулентности.

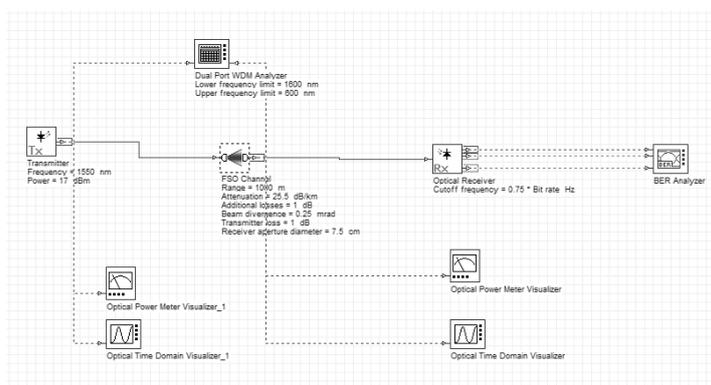


Рис. 2. Схема модели исследуемой системы ААОЛС

Построена модель одноканальной системы АОЛС, работающей в условиях слабой и сильной турбулентности, оценено значение Bit Error Rate (BER) — параметра ошибок по битам при различных методах модуляции и изменении уровней отношения сигнал/шум SNR (Signal-to-noise ratio) в дБ на входе приемника (рис. 3).

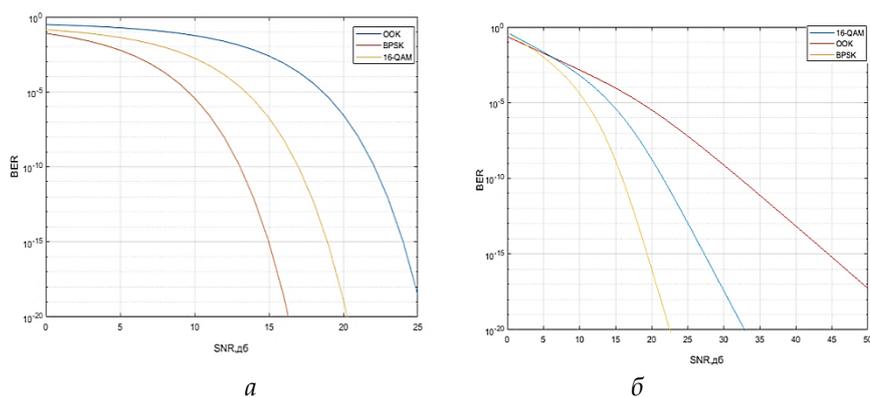


Рис. 3. Показатели коэффициента ошибок по битам (BER) для различных форматов модуляции: а — в канале со слабой турбулентностью; б — в канале с сильной турбулентностью



Для достижения целевого значения BER  $10^{-8}$  модуляция ООК требует отношения сигнал/шум 20 дБ на приемнике, в то время как наблюдаемые требования к отношению сигнал/шум для 16-QAM и BPSK составляют 11 и 8 дБ соответственно. Улучшение производительности BPSK по сравнению с ООК в случае слабой турбулентности равно примерно 60 %. В канале с сильной турбулентностью для достижения BER  $10^{-8}$  требования к отношению сигнал/шум для ООК, BPSK и 16-QAM составляют 45, 19 и 28 дБ соответственно.

### Управление передаваемой мощностью

Для определения уровня принятого оптического сигнала необходимо априорное знание уровня излучаемой мощности передатчика и суммарных потерь оптического сигнала в линии связи. Затем уровень принимаемого сигнала сравнивается с уровнем чувствительности приемника и оценивается энергетический запас канала связи [5]. В работе предложено использовать несколько лазеров в конструкции передатчика, которые управляются контроллером с датчиком видимости, что обеспечивает формирование оптимальной мощности передатчика в зависимости от погодных условий. Контроллер обеспечивает вычислительные процедуры формирования функции управления мощностью передатчика сигнала (количество используемых лазеров) в зависимости от данных, полученных с помощью детектора видимости и путем вычисления потерь на затухание сигнала в канале связи.

На рисунке 4 показаны результаты измерения мощности на входе приемника при использовании нескольких фотодетекторов, работающих одновременно с несколькими лазерными источниками при дискретном подключении дополнительных лазеров и плавном регулировании мощности передатчика соответственно.

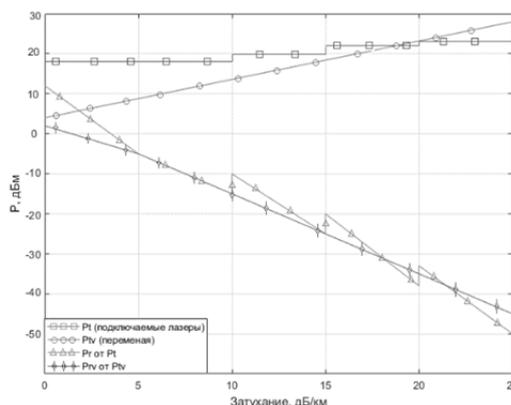


Рис. 4. Зависимость уровня приемной мощности системы ААОЛС при различных значениях затухания среды передачи и мощности передатчика

Скорость передачи данных зависит от уровня сигнала на приеме, а в случае наихудших погодных условий видимость канала уменьшается, потери оптического сигнала при прохождении через атмосферный канал увеличиваются, вызывая уменьшение оптической мощности на



приеме [5]. Значение уровня мощности на приеме обратно пропорционально затуханию сигнала в канале связи и прямо пропорционально мощности передатчика. Таким образом, чем выше принимаемая мощность, тем выше скорость передачи данных и больше энергетический запас канала связи. Влияние среды передачи на оптический сигнал при высоких уровнях затухания приводит к снижению скорости передачи данных, как показано на рисунке 5.

90

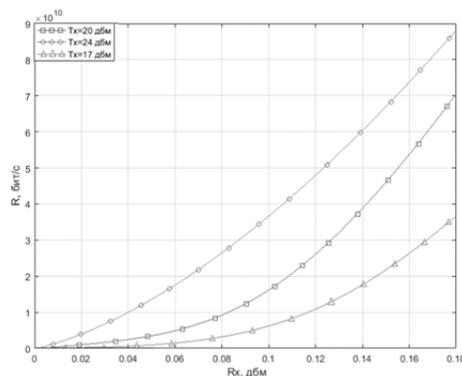


Рис. 5. Скорость передачи данных в зависимости от затухания среды передачи

### Адаптивное канальное кодирование

Адаптивное канальное кодирование выполняется с использованием сверточных перфорированных кодов RSPC, которые не уступают наиболее известным сверточным кодам сопоставимой сложности [6].

В соответствии с условиями передачи в канале связи кодовая скорость  $r$  будет адаптивно изменяться для достижения минимального энергопотребления, а также удовлетворения требуемой пропускной способности, которая определяется пользователем.

Кривые BER в зависимости от уровня мощности на приеме изображены на рисунке 6. При использовании кодовой скорости  $r_i=8/24$  может быть получена минимальная требуемая мощность на приеме [7].

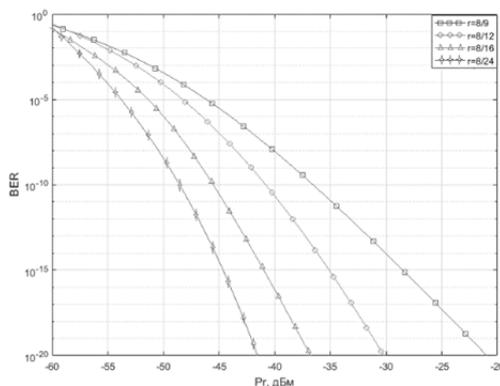


Рис. 6. Зависимость показателей BER кода RSPC от мощности сигнала на приеме



## Моделирование оптической системы передачи с динамическим управлением

Адаптивная атмосферная оптическая линия связи представляет собой интеллектуальную систему, которая изменяет параметры передатчика в соответствии с измеренным уровнем затухания в канале связи на приеме. Исследование адаптивного метода управления основано на анализе измеренного уровня входной мощности приемника и вычислении значений показателя BER. Моделирование многоканальной системы ААОЛС позволило оценить коэффициенты рабочих характеристик системы в зависимости от атмосферного затухания и разработать динамическую систему управления для повышения производительности и уровня доступности канала ААОЛС [2].

На основе результатов моделирования построена справочная таблица значений основных характеристик системы передачи ОСДУ для трех видов модуляции (ООК, BPSK и 16-QAM) в условиях затуханий среды передачи, равных 0,1, 2, 15,5 и 25,5 дБ/км, при обеспечении качества принимаемого сигнала не ниже  $BER = 10^{-8}$  и скорости передачи 1 Гбит/с на расстоянии 500 м, 1,5 км и 3 км (с. 92).

Проведен анализ полученных результатов, который показал, что для увеличения дальности связи до 3 км необходимо изменить скорость кодирования от 8/9 до 8/24, понизить уровень модуляции до BPSK, увеличить уровень мощности на передаче до 24 дБм.

На рисунке 7 представлена зависимость показателя уровня ошибок BER от дальности связи в условиях сильного тумана для системы без применения адаптивных алгоритмов и с переключением уровня мощности, типа модуляции и скорости кодирования соответственно. Таким образом, можно сделать вывод о том, что наибольшая дальность связи 3 км с уровнем BER не более  $10^{-8}$  достигается только при использовании адаптивной схемы ААОЛС.

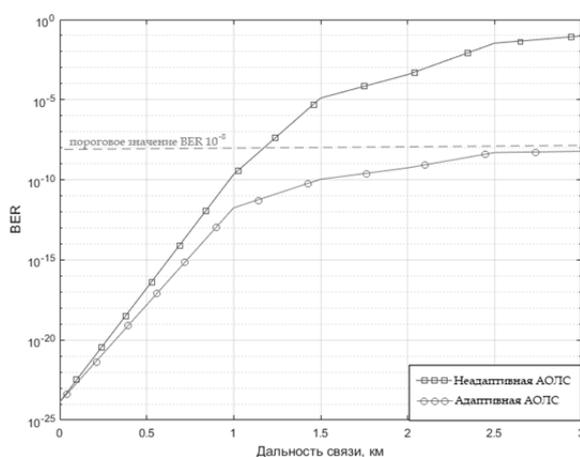


Рис. 7. Зависимость уровня BER от дальности связи

Оптимальные параметры передачи системы ОСДУ при различных значениях атмосферного затухания

Параметр	Дальность связи											
	500 м				1,5 км				3 км			
	0,1	4,2	15,5	25,5	0,1	4,2	15,5	25,5	0,1	4,2	15,5	25,5
Затухание, дБ/км	0,1	4,2	15,5	25,5	0,1	4,2	15,5	25,5	0,1	4,2	15,5	25,5
$P_T$ , дБм	20	20	20	20	20	20	20	22	20	20	24	24
$P_R$ , дБм	18	16	-1,8	-7,8	17	3	-19	-39,5	14	-8,9	-41,4	-71,51
Модуляция	OOK											
Скорость кодирования	8/9	8/9	8/9	8/9	8/9	8/9	8/9	8/9	8/9	8/9	8/16	8/24
BER	$7,42 \cdot 10^{-35}$	$1,07 \cdot 10^{-34}$	$2,25 \cdot 10^{-24}$	$1,50 \cdot 10^{-24}$	$1,24 \cdot 10^{-33}$	$4,47 \cdot 10^{-32}$	$3,01 \cdot 10^{-13}$	$1,08 \cdot 10^{-10}$	$3,97 \cdot 10^{-32}$	$5,87 \cdot 10^{-31}$	$4,32 \cdot 10^{-08}$	$3,00 \cdot 10^{-08}$



## Выводы

Представленная оптическая система передачи с динамическим управлением позволяет обеспечить скорость передачи не ниже 1 Гбит/с со значением BER  $10^{-8}$  на дистанциях от 2 до 3 км в условиях густого тумана при значении затухания среды передачи порядка 25 дБ/км. На дистанциях до 2 км достижимы скорости передачи в диапазоне 1–10 Гбит/с с подстройкой параметров передачи при значениях затухания среды передачи более 15 дБ/км, при этом качество принятого сигнала не падает ниже уровня BER  $10^{-10}$ .

Результаты, полученные в ходе исследования, говорят о целесообразности применения адаптивных алгоритмов управления в беспроводных оптических сетях для повышения их производительности и увеличения дальности связи для преодоления проблем, связанных с потерями при распространении сигнала в атмосфере.

93

## Список литературы

1. *Vavoulas A., Sandalidis H.G., Varoutas D.* Weather effects on FSO network connectivity // *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*. 2012. Vol. 4, iss. 10. P. 734–740. doi: 10.1364/JOCN.4.000734.
2. *El-Nayal M.K., Aly M.M., Fayed H.A., Abdel Rassoul R.A.* Adaptive free space optic system based on visibility detector to overcome atmospheric attenuation // *Results Phys*. 2019. Vol. 14. P. 102392.
3. *Das S., Chakraborty M.* ASK and PPM modulation based FSO system under varying weather conditions // *Proceedings of the 2016 IEEE 7th Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference (UEMCON)*. N. Y., 2016. doi: 10.1109/UEMCON.2016.7777825.
4. *Wang Z., Zhong W.D., Fu S., Lin C.* Performance comparison of different modulation formats over free-space optical (FSO) turbulence links with space diversity reception technique // *IEEE Photonics J*. 2009. Vol. 1. P. 277–285.
5. *Молчанов С.В., Калекина С.О.* Применение когерентного временно-частотного мультиплексирования для повышения производительности атмосферной оптической системы связи // *Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Физико-математические и технические науки*. 2019. №2. С. 31–39.
6. *Hagenauer J.* Rate-compatible punctured convolutional codes (RCPC codes) and their applications // *IEEE Trans. Commun*. 1988. Vol. 36, №4. P. 389–400.
7. *Молчанов С.В., Яковлев А.С., Алещенко А.Н., Иванов А.И.* Применение орбитально-углового момента для пространственного разделения каналов атмосферной оптической линии связи // *Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Физико-математические и технические науки*. 2020. №2. С. 52–61.
8. *Ghassemlooy Z., Popoola W., Rajbhandari S.* *Optical Wireless Communications System and Channel Modelling with MATLAB*. CRC Press, 2013.

## Об авторах

Сергей Васильевич Молчанов — канд. физ.-мат. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: SMolchanov@kantiana.ru



Сергей Николаевич Чижма — д-р техн. наук, проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: SChizhma@kantiana.ru

Марина Дмитриевна Холмогорова — магистрант, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: m.d.kholmogorova@gmail.com

#### **The authors**

Dr Sergey V. Molchanov, Associate Professor, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: SMolchanov@kantiana.ru

Prof. Sergey N. Chizhma, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: SChizhma@kantiana.ru

Marina D. Kholmogorova, Master's Student, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: m.d.kholmogorova@gmail.com