

*С. В. Молчанов, А. В. Дащинский*

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МНОГОКАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ В АТМОСФЕРНО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЯХ СВЯЗИ

*Рассмотрена возможность применения многоканальной системы при построении атмосферно-оптических линий связи. Применение данного метода позволяет увеличить эффективную дальность передачи до 1,5 раз.*

*Possibility of application of multi-channel system is considered at construction of free space optics networks. Application of the given method allows to increase effective range of transmission to 1,5 times.*

**Ключевые слова:** атмосферно-оптические линии связи, многоканальные системы.

**Key words:** free space optics, multi-channel systems.

Одной из перспективных, но в то же время малоисследованных технологий построений высокоскоростных цифровых каналов связи является применение атмосферных оптических линий связи (АОЛС), позволяющих обеспечить высокую скорость передачи (до нескольких Гбит/с), высокая помехозащищенность, небольшое (порядка нескольких часов) время развертывания. Основной сдерживающий фактор – ограничение на длину канала связи (прямая видимость). Построение всех станций АОЛС практически одинаково: интерфейсный модуль, модулятор, лазер, оптическая система передатчика, оптическая система приемника, демодулятор и интерфейсный модуль приемника. Передаваемый поток данных от аппаратуры пользователя поступает на интерфейсный модуль и затем на модулятор излучателя. Затем сигнал преобразуется высокоэффективным инжекционным лазером в оптическое излучение ближнего ИК-диапазона, оптикой формируется в узкий пучок (2–4 мрад) и передается через атмосферу к приемнику [1]. На противоположном пункте принимаемое оптическое излучение фокусируется приемным объективом на площадку высокочувствительного быстродействующего фотоприемника (лавинные или pin-фотодиоды), где детектируется. После дальнейшего усиления и обработки сигнал поступает на интерфейс приемника, а оттуда на аппаратуру пользователя.

Расчет оптической системы сводится к определению доли излучения ИК мощности падающей на фотоприемник. Очевидно, что чем эта доля больше, тем эффективнее передача оптического сигнала от передатчика к приемнику. Падение информационного оптического сигнала за счет расхождения оптического пучка упрощенно определяется в соответствии с законами геометрической оптики, отношением площади оптического пятна в плоскости линзы фотоприемника к площади линзы фотоприемника, т. е. на площадь линзы фотоприемника падает часть инфракрасного излучения, пропорциональная соотношению [2]

$$A_{np} = (D_{\text{пятн}} / D_{\text{пр}})^2,$$

где  $D_{\text{пятн}}$  диаметр светового пятна;  $D_{\text{пр}}$  – диаметр линзы приемника ИАК.

В соответствии с законами геометрической оптики:

$$D_{\text{пятн}} = L \cdot Q_{\text{расх}},$$

где  $Q_{\text{расх}}$  – угловая расходимость излучения на выходе передатчика, равная  $Q_{\text{расх}} = A / F_{\text{пер}}$ ;  $A$  – размер источника излучения передатчика;  $F_{\text{пер}}$  – фокусное расстояние линзы передатчика.

В ИАК, как и при расчете основных параметров и характеристик волоконно-оптической линии связи, можно ввести понятие энергетического потенциала линии –  $P_s$ :

$$P_s = P_{\text{пер}} - P_{\text{пр}},$$

где  $P_{\text{пер}}$  – уровень мощности инфракрасного излучения на выходе линзы оптического передатчика

в дБм, т. е.  $P_{\text{пер}} = 10 \lg \frac{P_{\text{пер.лин}}}{1 \text{ мВт}}$  дБм;  $P_{\text{пер.лин}}$  – оптическая мощность на выходе линзы передатчика ИАК;

$P_{\text{пр}}$  – уровень мощности инфракрасного излучения на входе приемника в дБм, т. е.

$$P_{\text{пер}} = \lg \left( \frac{P_{\text{пр.лин}}}{1\text{мВт}} \right) \text{ дБм},$$

где  $P_{\text{пр.лин}}$  — оптическая мощность на входе линзы приемника.

Суммарные потери  $P_{\text{лн}}$  дБм, в ИАК можно оценить по формуле

$$P_{\text{лн}} = P_{\text{опт}} + P_{\text{атм}},$$

где  $P_{\text{опт}}$ , дБм — затухание оптического сигнала из-за рассогласования выходных оптических параметров передатчика и входных параметров приемника;  $P_{\text{атм}}$ , дБ — затухание оптического информационного сигнала в атмосфере.

Расчет уровня оптической мощности на выходе линзы передатчика ведется с учетом доли охвата  $A_{\text{охв}}$  светового потока, излучаемого инфракрасным диодом, и которая охватывается линзой передатчика.

Угол охвата линзы передатчика определяется выражением

$$\alpha_{\text{охв}} = \arctg \left( \frac{D_{\text{пер}}}{2 \cdot F_{\text{пер}}} \right).$$

Оптическая мощность на выходе передатчика, выраженная в децибелах, определяется по формуле

$$P_{\text{пер}} = 10 \lg \frac{P_{\text{изл}} \cdot A_{\text{охв}}}{1\text{мВт}},$$

где  $P_{\text{изл}}$  — полная мощность инфракрасного излучающего диода, измеренная в 1 мВт.

Оптическую мощность, которая перехватывается линзой приемника, можно определить численным интегрированием. Однако для оценочных расчетов (в этом случае считается, что оптика безабберационная, а излучающий диод — ламбертовский излучатель), индикатрисса на выходе линзы передатчика равномерна, а доля светового потока ( $A_{\text{пр}}$ ), которая перехватывается линзой приемника, определяется соотношением

$$A_{\text{охв}} = (D_{\text{птт}} / D_{\text{пр}})^2,$$

где  $D_{\text{птт}}$  диаметр светового пятна;

$$D_{\text{птт}} = 2L \cdot \tg \left( \frac{Q_{\text{расх}}}{2} \right),$$

где  $L$  — длина трассы ИАК;  $Q_{\text{расх}}$  — угол расхождения излучения передатчика определяется, в соответствии с законами геометрической оптики, выражением

$$Q_{\text{расх}} = 2 \arctg \frac{A}{2F},$$

где  $F$  — фокусное расстояние линзы передатчика.

Соответственно мощность инфракрасного излучения, попадающего на линзу фотоприемника, можно описать соотношением

$$P_{\text{пр}} = 10 \lg \frac{P_{\text{изл}} \cdot A_{\text{охв}} \cdot A_{\text{пр}}}{1\text{мВт}} \text{ дБм}.$$

Расчет атмосферной оптической линии связи можно произвести и при помощи программных продуктов. Лидирующие позиции в компьютерном моделировании занимает программный продукт MathLab. Но для оптических линий связи существует также более специализированное программное решение OptiSystem — разработчик Optiwaves.

Лазерная линия связи состоит из двух идентичных станций, устанавливаемых соосно напротив друг друга в пределах прямой видимости — на крышах или стенах домов или на других высоких подставках.

В работе рассмотрен вариант, когда в передающем оборудовании используется три лазера, а в приемном соответственно три фотодиода.

Передатчики излучают на длине волны 910 нм. Мощность излучения каждого лазера составляет 8 дБм. Скорость передачи информации — 155,52 Мбит/с. На приеме — три лавинно-

пролетных фотодиода. Сравнение производилось с аналогичной атмосферно-оптической линией связи, построенной на одном передатчике мощностью 20 дБм и одном приемном фотодиоде.

Фундаментальным показателем качества цифровых систем передачи является коэффициент ошибок *BER*. Работа цифровых систем передачи считается нормальной только в том случае, если *BER* не превышает определенное допустимое значение, соответствующее используемому сетевому стандарту.

Для оценки качества приема переданной информации использован *BER*-анализатор. В расчетах передаточная способность атмосферно-оптической линии связи анализировалась в терминах *Q*-фактора. *Q*-фактор – это параметр, который непосредственно отражает качество сигнала цифровой системы передачи [3] и определяется путем статистической обработки результатов измерения амплитуды и фазы сигнала на электрическом уровне. При этом выполняется построение функции распределения состояний «1» и «0», а для этих распределений, в предположении их гауссовой формы, оцениваются математические ожидания состояний *E1* и *E0* и их среднеквадратические отклонения  $\sigma_1$  и  $\sigma_0$ .

Исходя из предположения гауссова распределения состояний логической «1» и логического «0», определяются характеристики распределений состояний – математическое ожидание *E1* и *E0*:

$$E1 = \begin{cases} P_L, & P_L \geq P_R \\ P_R, & P_L < P_R \end{cases}, \text{ мВт}$$

$$E0 = P_{noise} \text{ мВт},$$

и среднеквадратическое отклонение  $\sigma_1$  и  $\sigma_0$ , соответственно воспользовавшись правилом «три сигма»:

$$\sigma_1 = \frac{E1 - P_{L_{min}}}{3} \text{ мВт},$$

$$\sigma_0 = \begin{cases} \frac{E0 + P_{0_{max}}}{3}, & E0 < P_{0_{max}} \\ \frac{E0 - P_{0_{max}}}{3}, & E0 > P_{0_{max}} \end{cases} \text{ мВт},$$

*Q*-фактор рассчитывается по следующей формуле:

$$Q = \frac{|E1 - E0|}{\sigma_1 + \sigma_0} \text{ мВт}.$$

Существует определенная функциональная зависимость *Q*-фактора сигнала и измеряемого коэффициента ошибок *BER*. *Q*-фактор определяется путем статистической обработки результатов измерения амплитуды и фазы сигнала на электрическом уровне [4]. *Q*-фактор связан с *BER* следующим образом:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \approx \frac{\exp \left( -\frac{Q^2}{2} \right)}{\sqrt{2\pi} Q}.$$

Значение  $Q > 6$  соответствует коэффициенту ошибки  $BER < 10^{-9}$ . Соотношения значений *Q*-фактора с *BER* приведены в таблице.

<i>BER</i>	$10^{-9}$	$10^{-10}$	$10^{-11}$	$10^{-12}$
<i>Q</i>	5,99	6,63	6,71	7,04

Графики зависимости значения *Q*-фактора от расстояния передачи представлены на рисунках 1 и 2.

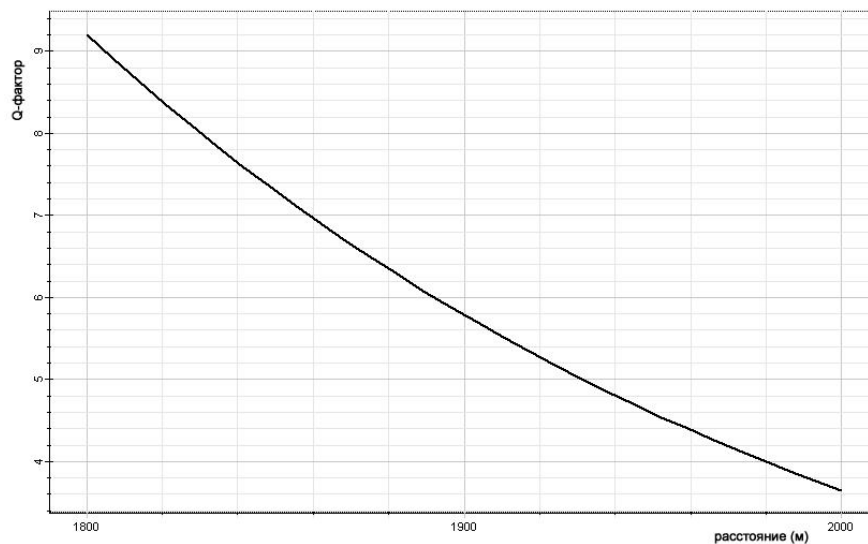


Рис. 1. Одноканальная АОЛС.  
Эффективная дальность передачи составляет около 1900 м

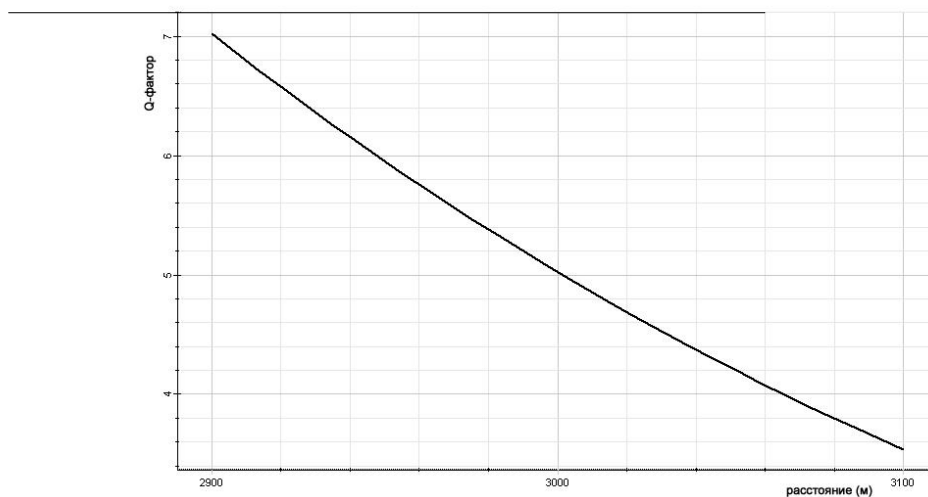


Рис. 2. Многоканальная АОЛС.  
Эффективная дальность передачи составляет около 2940 м

Из графиков видно, что использование многоканальной системы позволяет увеличить по сравнению с одноканальной схемой расстояние эффективной передачи данных до 1,5 раз, что свидетельствует об увеличении чувствительности приемного оборудования. Суммарная мощность излучения лазеров не превышает 24 мВт, что не требует получения дополнительного разрешения на эксплуатацию.

Основной вектор развития в телекоммуникациях лежит в области повышения эффективности беспроводного канала связи, достигается за счет введения в состав АОЛС многоканальной системы связи. Многоканальное решение обеспечивает увеличение дальности передачи информации, повышение надежности по сравнению с одноканальными вариантами. Применение предложенной системы позволяет расширить скоростной диапазон до гигабитных скоростей. При росте требований к скорости передачи информации телекоммуникационных систем, многоканальные АОЛС могут обеспечивать беспроводную передачу информации на уровне гигабитных скоростей – оптимальное решение для задач «последней мили» в нелицензированном диапазоне СВЧ.

#### Список литературы

1. Bloom S. et al. Principles of operation FSO-systems // Journal of optical networking. 2003. V. 2, №6.
2. Вишневецкий В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. М., 2003.

3. *Иванов А. Б.* Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения. М., 1999.
4. *Шопкин Ю. И.* и др. Математическое моделирование нелинейных режимов передачи информации в высокоскоростных линиях оптической связи // Вычислительные технологии. 2004. Т. 9, №6.

#### **Об авторах**

С. В. Молчанов – ст. преп., РГУ им. И. Канта.  
А. В. Дащинский – студ., РГУ им. И. Канта.

#### **Authors**

S. Molchanov – IKSUR.  
A. Dashchinskiy – student, IKSUR.