



УДК 539.143.539.183

С. В. Молчанов, В. В. Курносков

**МНОГОКАНАЛЬНАЯ ГИБРИДНАЯ  
АТМОСФЕРНО-ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА СВЯЗИ**

*Рассмотрена возможность применения новой разработанной многоканальной гибридной атмосферно-оптической системы связи, которая позволяет увеличить пропускную способность, производительность, надежность и эффективность канала связи. Построена симуляционная модель разработанной системы.*

112

*The possibility of application of the newly developed multi-channel hybrid atmospheric optical communication system, which allows to increase the capacity, performance, reliability and efficiency of the communication channel. A well constructed simulations of the developed system.*

**Ключевые слова:** кросс-корреляция, радиорелейная линия связи, многоканальная гибридная атмосферно-оптическая система связи, симуляционная модель.

**Key words:** cross-correlation, microwave relay, multi-channel hybrid atmospheric optical communication system, simulation models.

Последние несколько лет технология атмосферных оптических линий связи (АОЛС) активно развивается и завоевывает большую популярность в телекоммуникационном секторе. В настоящее время идет интенсивное развитие гибридной АОЛС системы на основе использования резервного радиоканала в связке с оптическим каналом. В случае наступления неблагоприятных погодных условий (снегопад, туман и т.п.), когда атмосферный оптический канал становится недоступным (или уровень битовых ошибок в канале достигает критического значения), система переключается на резервный радиоканал и использует его до тех пор, пока оптический (основной) канал вновь не станет доступен.

Существует два подхода к созданию таких систем: использование в качестве резервного канала оборудования широкополосного доступа Wi-Fi стандарта IEEE 802.11a/b/g, работающего в разрешенных частотных диапазонах 2,4; 5,2 и 5,8 ГГц, или применение радиорелейных систем (MMW) в диапазоне 60 ГГц, которые также не требуют разрешения на использование. Первый подход позволяет получить желаемые 99,999 % надежности канала, но в этом случае возможно снижение скорости передачи информации в плохих погодных условиях. Скорость передачи данных оборудования Wi-Fi не превышает 10–20 Мбит/с. Второй вариант – использование оборудования MMW, которое дает возможность реализовать полностью сбалансированные каналы без падения скорости передачи до скоростей 1 Гбит/с и более. Данный подход позволяет получить желаемые 99,99 % надежности канала, однако в силу большого за-



тухания волн в диапазоне 60 ГГц в атмосфере дальность связи ограничена. Стоимость названных гибридных систем чуть больше, но качество передачи, надежности и скорости канала — очень высоки.

Построение всех гибридных АОЛС-систем практически одинаково: они состоят из двух основных частей — канала АОЛС и радиорелейной линии MMW (рис. 1). В свою очередь в канал АОЛС входят: лазер, интерфейсный модуль, модулятор, оптическая система передатчика, оптическая система приемника, демодулятор, интерфейсный модуль приемника.

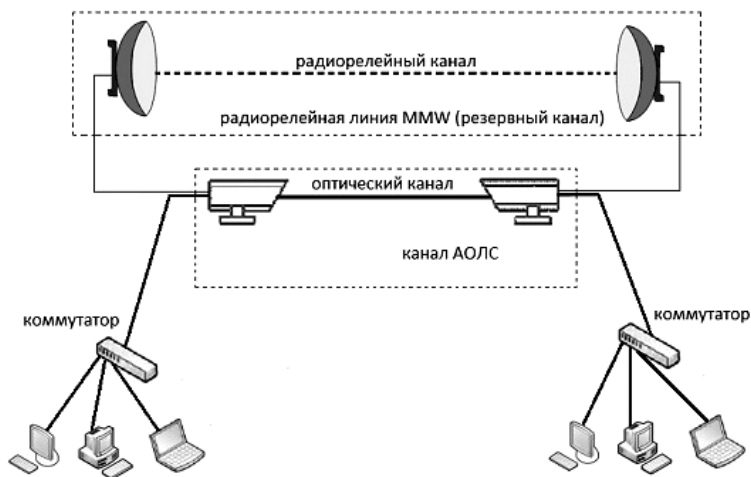


Рис. 1. Схема гибридной АОЛС-системы

Нами была разработана многоканальная гибридная АОЛС-система, а также построена ее симуляционная модель. Для повышения надежности и эффективности системы применили многоканальную гибридную АОЛС с временным разделением каналов; в качестве резервного канала использовали радиорелейную систему в диапазоне 60 ГГц. Для повышения помехоустойчивости гибридной АОЛС-системы применили ортогональное кодирование (RD-коды). Моделирование произведено в специализированном программном продукте *OptiSystem* (разработчик Optiwaves).

RD-код (Random Diagonal Codes — случайные диагональные коды) представляет собой совокупность двоичных последовательностей, которые соответствуют хорошей авто- и кросс-корреляции, а максимальный вес кода очень мал. Код строится с помощью простой операции матриц.

Обозначим последовательность значений для  $m$  пользователей [1]:

$$C_m = [C_m(i)]_{i=1}^n, \quad (1)$$

где  $m = 1, 2, \dots, K$ ,  $N$  — длина кодовой последовательности;  $K$  — количество пользователей в сети.

Два важных условия должны быть выполнены в ходе проектирования кода.



1.  $W$  — число единиц в кодовой последовательности для сдвига ( $S = 0$ ) задается дискретной автокорреляцией, которая должна быть максимальной:

$$A_{c_m} = \sum_{i=0}^N C_m(i)C_m(i).$$

2. Число совпадений для каждой смены в кросс-корреляционной функции двух последовательностей  $C_1$  и  $C_m$ , должны быть минимизированы:

$$A_{C_1C_m}(s) = \sum_{i=0}^N C_1(i)C_m(i-s),$$
$$-N+1 \leq N \leq N+1.$$

Свойства автокорреляционной функции используются для синхронизации работы приемника, чтобы найти начало сообщения, а затем границы кодового слова. Кросс-корреляционные свойства позволяют приемнику оценить сообщение при наличии множественных помех от других пользователей. Согласно сказанному выше, принципы RD-кода можно охарактеризовать как  $N, W, \lambda$ , где  $W$  — вес кода, то есть число единиц в кодовой последовательности,  $\lambda$  — минимальные значения по фазе дискретной кросс-корреляции (кроме нулевого сдвига). Принципы RD-кода должны удовлетворять условиям:

- 1) минимизация  $\lambda$  при нулевой кросс-корреляции;
- 2) минимизация (подавление) коэффициента PIIN (Phase Induced Intensity Noise), характеризующего фаза-индуцированные интенсивности шума;
- 3) отсутствие кросс-корреляции в сегменте данных.

Вид нового кода может быть предварительно разделен кодовой последовательностью на две подгруппы матриц — код подматрицы (код уровня) и данные подматрицы (на уровне данных). Преимущества разделения RD-кода на два односторонних порядка сделали проще аппаратную реализацию с использованием прямого обнаружения, а не с использованием сложных методов обнаружения (Байеса, Неймана — Пирсона, наибольшего правдоподобия) [2; 3]. Недостатком этого кода является то, что минимальный вес кодовой последовательности должен быть  $W \geq 3$ , как показано ниже на примере.

Пусть имеется сегмент данных: элементы этой группы содержат только 1, нулевая корреляция на уровне данных ( $\lambda = 0$ ). Этот сегмент представлен матрицей ( $K \times K$ ), где  $K$  — число пользователей матриц двоичных коэффициентов и базовой через ноль. Код определяется матрицей  $[Y_1]$ . Например, три пользователя ( $K = 3$ ):

$$[Y_1] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Для этого выражения взаимная корреляция между любыми двумя рядами всегда равна нулю. Сегмент кода представляет собой матрицу  $[Y_2]$ , для которой  $W = 4$ :



$$[Y_2] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Причем матрица  $[Y_2]$  состоит из двух частей:

– основная матрица  $[B]$

$$[B] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

– весовая матрица  $[M]$

$$[M] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Для повышения количества активных пользователей необходимо одновременно с увеличением длины кодового слова повторять каждую строку обеих матриц  $[M]$  и  $[B]$ , где  $j$  – значение  $K$ -го пользователя ( $j = 1, 2 \dots K$ );  $a_j$  – принимает значения 0 или 1. Для  $K$ -го пользователя матрицы  $[M]$  и  $[B]$  можно представить в виде:

$$[M](j) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ a_{j1} & a_{j2} \end{bmatrix}; \quad [B](j) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ a_{j1} & a_{j2} & a_{j3} \end{bmatrix}$$

Вес для кодовой части для обеих матриц  $[M]$  и  $[B]$  равен  $W-1$ , тогда полная комбинация кода будет представлена ( $K \times N$ ), для заданной матрицы  $[Z] = [Y_1 | Y_2]$ , где  $K = 3$ ,  $N = 8$  и  $W = 4$ :

$$[Z] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Последовательность кода RD приведена ниже.

Последовательность кода RD

| K | N              |   |   |   |   |   |   |   |
|---|----------------|---|---|---|---|---|---|---|
|   | 1              | 2 | 3   | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 1 | 0              | 0 | 1   | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 2 | 0              | 1 | 0   | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 3 | 1              | 0 | 0   | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
|   | Сегмент данных |   | Кодовый сегмент:<br>основная и весовая подматрицы |   |   |   |   |   |

Преимущества RD-кода можно определить следующим образом: 1) короткая длина кода; 2) отсутствует кросс-корреляция на уровне данных; 3) на уровне данных код может быть заменен любым другим; 5) гибкость в выборе параметров  $N, K$  по сравнению с другими кодами.

Результаты моделирования в специализированном программном продукте *OptiSystem* для трех активных пользователей представлены на рисунке 2.

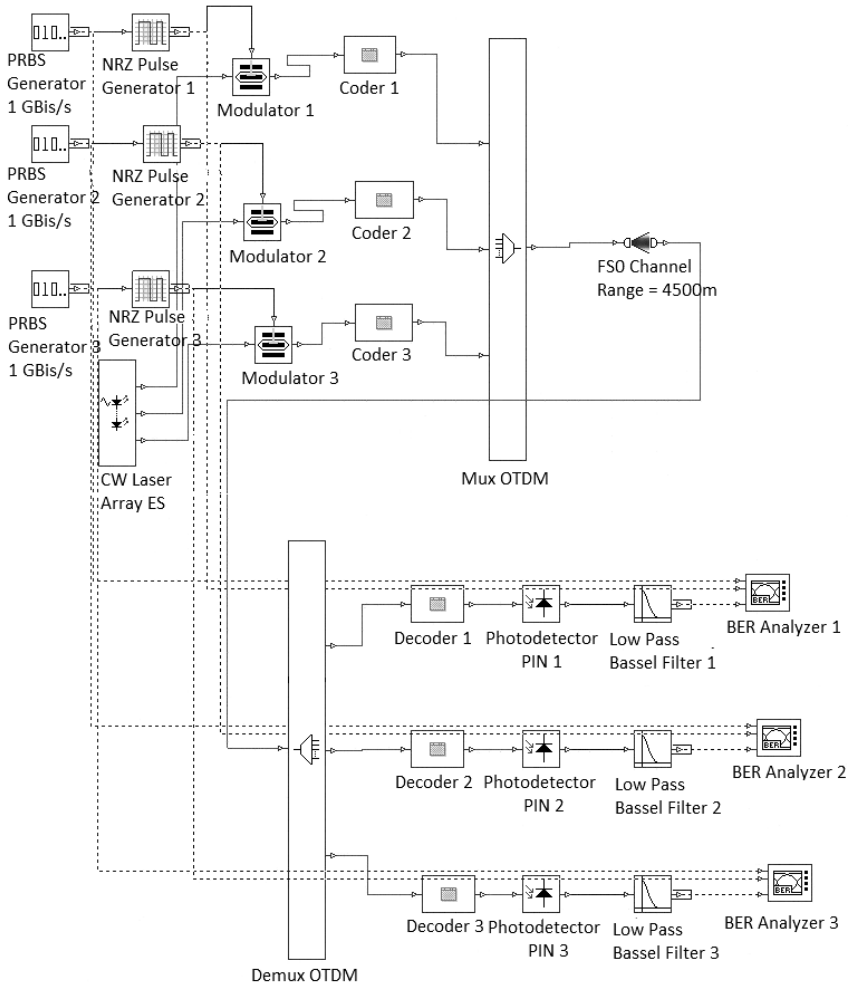


Рис. 2. Схема многоканальной гибридной АОЛС-системы

Графики зависимости значения  $Q$ -фактора от расстояния передачи приведены на рисунке 3.

Из графика (рис. 3) видно, что при использовании многоканальной гибридной АОЛС-системы с ортогональным кодированием (по сравнению с АОЛС-системой без ортогонального кодирования) происходит увеличение эффективного расстояния передачи данных до двух раз, что свидетельствует об увеличении чувствительности приемного оборудования.

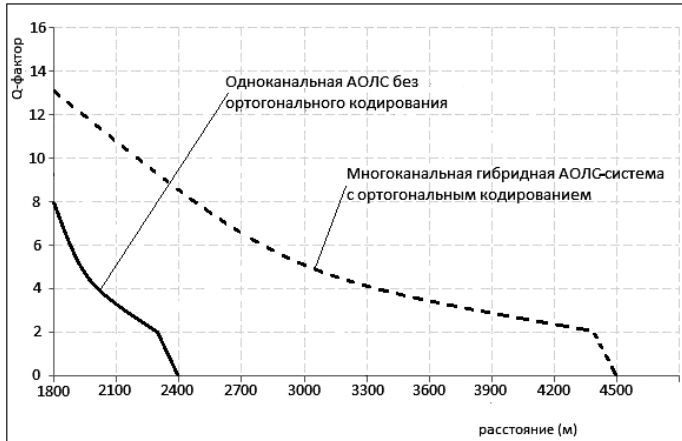


Рис. 3. Сравнительные показатели дальности передачи оптического сигнала (одноканальная АОЛС без ортогонального кодирования и многоканальная гибридная АОЛС-система с ортогональным кодированием)

Применение многоканальной гибридной АОЛС-системы с временным разделением канала позволяет увеличить ее пропускную способность, эффективность и надежность. Для повышения помехоустойчивости гибридной АОЛС-системы целесообразно использовать ортогональное кодирование (RD-коды).

#### Список литературы

1. Aljunid S. A., Ismail M. F., Ramil A. R. A New Family of Optical Code Sequence for Spectral-Amplitude-coding optical CDMA systems // IEEE Photonics Technology Letters. 2009. Vol. 16. P. 1383–2385.
2. Hasoon F. N., Aljunid S. A., Anuar M. S., Shaari S. A. Enhanced trouble Weight Code Implementation in Multi-Rate Transmission // IYCSNS International Journal of Computer Science and Network Security. 2007. № 7(12).
3. Bloom S. et al. Principles of operation FSO-system // Journal of optical networking. 2003. Vol. 2, №6.
4. Комашкинский В.И. Системы подвижной радиосвязи с пакетной передачей информации. Основы моделирование. М., 2007.

#### Об авторах

Сергей Васильевич Молчанов – канд. физ.-мат. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канга, Калининград.

E-mail: svmol@rambler.ru

Виктор Владимирович Курносов – магистрант, Балтийский федеральный университет им. И. Канга, Калининград.

E-mail: viktor.kurnosov@list.ru

#### About authors

Sergei Molchanov – PhD, associate professor, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: svmol@rambler.ru

Victor Kurnosov – student, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: viktor.kurnosov@list.ru