

УДК 621.391

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФОРМАТОВ МОДУЛЯЦИИ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЦИФРОВЫХ ВОСП

Е.Ф. ЛЕОНОВИЧ, Н.В. ТАРЧЕНКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь*

*Поступила в редакцию 8 ноября 2020*

**Аннотация.** При использовании оптических транспортных сетей важен выбор способов формирования, передачи и приема оптических линейных сигналов, в связи с чем актуальной является задача определения критериев, позволяющих осуществлять их сравнительный анализ.

*Ключевые слова:* модуляция, эффективность, моделирование.

### Введение

В настоящее время при постоянном росте объемов передаваемой информации увеличивается потребность в расширении пропускной способности волоконно-оптических систем передачи (ВОСП), что осуществляется путем совершенствования элементов оптического линейного тракта [1]. В частности, можно выделить следующие направления исследований в этой области:

- совершенствование и развитие когерентных систем связи: использование многоуровневых форматов модуляции и соответствующих устройств модуляции и демодуляции оптических сигналов; использование методов цифровой обработки сигналов для компенсации искажений и предварительной коррекции ошибок;
- совершенствование методов усиления и регенерации оптических сигналов;
- совершенствование структуры оптических направляющих систем.

Предметом исследования в данной работе являются многоуровневые форматы модуляции в высокоскоростных оптических системах передачи.

### Критерии эффективности форматов модуляции

Статистическая теория связи для выбора формата модуляции в канале связи, наиболее целесообразного в заданных условиях, рекомендует проводить оптимизацию системы передачи по критериям эффективности.

Как известно [2], цифровой канал передачи характеризуется пропускной способностью – скоростью передачи информации  $R_{\text{кан}}$ , бит/с, полосой занимаемых частот  $F_{\text{кан}}$ , а качество передачи в канале – вероятностью ошибки.

Поэтому в качестве основных выбраны следующие критерии:

1 Информационная эффективность системы, определяющая степень использования пропускной способности канала:

$$\alpha = \frac{R_{\text{кан}}}{C_{\text{к}}}, \quad (1)$$

где  $C_{\text{к}}$  – пропускная способность канала,  $R_{\text{кан}}$  – скорость передачи информации.

2 Спектральная эффективность системы, определяющая эффективность использования полосы частот канала:

$$\gamma = \frac{R_{\text{кан}}}{F_k} \quad (2)$$

3 Энергетическая эффективность системы  $E_b/N_0$ , определяющая отношение энергии, затрачиваемой на передачу одного бита информации, к спектральной плотности мощности шума при заданном качестве – вероятности ошибки.

### Классификация форматов модуляции в ВОСП

Современные высокоскоростные ВОСП используют спектральное разделение каналов с определяемым Рекомендацией МСЭ-T G.694.1 разносом частот оптических несущих [3]. При этом интервал между оптическими несущими для увеличения пропускной способности системы уменьшается от 100 ГГц, 50 ГГц, 25 ГГц до 12,5 ГГц. При этом с переходом к когерентным системам изменяются и форматы модуляции.

На рис. 1 представлена классификация форматов модуляции, используемых в высокоскоростных оптических системах передачи [4, 5], и приняты следующие обозначения: NRZ – код без возврата к нулю, RZ – код с возвратом к нулю, CS-RZ – код с возвратом к нулю и подавлением несущей, RZ-AMI – код с возвратом к нулю и альтернативной инверсией, ODB (PSBT) – бинарный код с формированием фазы, ADPSK – адаптивная дифференциальная фазовая манипуляция, DBPSK – дифференциальная двоичная фазовая манипуляция, DQPSK – дифференциальная квадратурная фазовая манипуляция



Рис. 1. Классификация форматов модуляции современных высокоскоростных ВОСП

Для исследования были выбраны следующие виды модуляции BPSK, QPSK, QAM-16, QAM-64.

### Энергетическая эффективность форматов модуляции в ВОСП

Для оценки энергетической эффективности необходимо учесть специфику оптических когерентных систем передачи. Как известно [1, 5], основными источниками шумов в когерентных системах являются шумы спонтанной эмиссии оптических усилителей (ASE) и шумы, вызванные нелинейными эффектами в оптическом волокне, шумами когерентного оптического приемника можно пренебречь. При условии, что в ОБ обеспечивается ограничение по мощности группового оптического сигнала, шумами, вызванными нелинейными эффектами в оптическом волокне, также можно пренебречь или учитывать их в виде соответствующего штрафа оптической мощности.

Значение оптического отношения сигнал/шум (OSNR) необходимо для определения чувствительности оптического когерентного приемника при различных видах формирования канальных сигналов и поляризационного мультиплексирования.

Теоретическая оценка  $OSNR$  оценивается отношением:

$$OSNR = \frac{P_i/\alpha}{N_{ASE} \cdot \Delta F_k}, \quad (3)$$

где  $P_i$  – мощность оптического канального сигнала,  $\alpha$  – коэффициент, учитывающий поляризационное мультиплексирование ( $\alpha = 2$  в случае поляризационного мультиплексирования,  $\alpha = 1$  в его отсутствие),  $N_{ASE}$  – спектральная плотность мощности шума спонтанной эмиссии ( $N_{ASE} = hf_0$ ,  $h$  – постоянная Планка,  $f_0$  – центральная частота используемой длины волны оптического сигнала),  $\Delta F_k$  – полоса частот оптического приемника, соответствующая полосе частот принимаемого оптического сигнала. При когерентном детектировании собственными шумами оптического приемника можно пренебречь, следовательно, ОСШ в точке принятия решения будет в основном определяться значением  $OSNR$  на входе оптического приемника.

Определим связь  $OSNR$  с отношением энергии, затрачиваемой на передачу одного символа, к спектральной плотности мощности шума  $SNR_S$  при приеме символа линейного сигнала, которое оценивается отношением:

$$SNR_S = \frac{E_S}{N_0}, \quad (4)$$

где  $E_S$  – энергия символа на тактовом интервале  $T_s$  ( $E_S = P_i T_s$ ),  $T_s$  – длительность интервала для передачи символа сообщения,  $B_s = 1/T_s$  – полоса частот сигнала,  $N_0$  – спектральная плотность шума в полосе канала.

С учетом сказанного выше, получим:

$$OSNR = \frac{P_i/\alpha}{N_{ASE} \cdot \Delta F_k} = \frac{E_S/(\alpha T_s)}{N_{ASE} \cdot \Delta F_k} = SNR_S \frac{B_s}{\alpha \cdot \Delta F_k}. \quad (5)$$

Если число уровней ( $M$ ) оптического сигнала больше двух, то соотношение между символьным ( $SNR_S$ ) и битовым ( $SNR_B$ ) отношениями сигнал/шум связаны выражением:

$$SNR_B = \frac{SNR_S}{\log_2 M}. \quad (6)$$

Тогда, при условии, что  $m = \log_2 M$ , получим:

$$OSNR = SNR_B \cdot m \frac{B_s}{\alpha \cdot \Delta F_k}, \quad (7)$$

где  $SNR_B = E_b/N_0$  – отношение энергии бита к спектральной плотности мощности шума.

По формулам (1), (2), (7) рассчитаны значения информационной, спектральной и энергетической эффективностей для анализируемых видов модуляции в оптических системах передачи без и с использованием поляризационного мультиплексирования при условии, что полоса оптического канала (в том числе и оптического приемника) определяется по первым нулям спектра передаваемого сигнала. Результаты расчетов представлены в таблице. При этом энергетическая эффективность определяется минимальным  $OSNR$  на входе оптического приемника. По известному значению  $OSNR$  рассчитывается необходимая чувствительность оптического приемника.

### Значения критериев эффективности различных форматов модуляции

Формат модуляции	Информационная эффективность ( $\alpha$ )	Спектральная эффективность ( $\gamma$ )	OSNR при коэффициенте ошибки $10^{-12}$ , дБ
BPSK	0,107	0,5	5,5
QPSK	0,177	1	8,5
16-QAM	0,302	2	11,5
64-QAM	0,416	3	13,2
PM-BPSK	0,134	1	2,4
PM-QPSK	0,214	2	5,4
PM-16-QAM	0,354	4	8,5
PM-64-QAM	0,482	6	10,2

### Заключение

Предложены критерии и получены выражения, позволяющие сравнивать эффективность различных форматов модуляции в современных цифровых ВОСП. Показано, как изменяются информационная и спектральная эффективности в оптических системах передачи при переходе к более сложным видам модуляции. В качестве критерия энергетической эффективности рекомендовано использовать минимальное значение *OSNR* на входе оптического приемника, при котором обеспечивается заданное качество восстановления сигнала при различных форматах модуляции. Оценив значение *OSNR*, можно определить чувствительность когерентного оптического приемника, что необходимо при проектировании оптических систем и сетей телекоммуникаций.

## HIGH-SPEED DIGITAL FIBER-OPTIC COMMUNICATION SYSTEMS EFFICIENCY OF MODULATION FORMATS

E.F. LEONOVICH, N.V. TARCHENKO

**Annotation.** For optical transport networks the choice of methods for the formation, transmission and reception of optical linear signals is important. That is why determining the criteria that would allow their comparative analysis is very actual.

*Keywords:* modulation, efficiency, modeling.

### Список литературы

1. Добавление 39 к Рекомендациям МСЭ-Т серии G. Рассмотрение вопросов расчета и проектирования оптических систем, МСЭ-Т, 2016.
2. Скляр Бернанд. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение М., 2010.
3. Рекомендация МСЭ-Т G.694.1 Спектральные сетки для применения технологий WDM: сетка длин волн для технологии DWDM. – МСЭ, 2012.
4. Наний О.Е., Трещиков В.Н. // Вестник связи. 2012. № 1. С.35–38.
5. Фокин В.Г. Оптические системы с терабитными и петабитными скоростями передачи. Новосибирск, 2015.