

НОВЫЕ ФОРМАТЫ МОДУЛЯЦИИ В ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ СВЯЗИ



М. А. ВЕЛИЧКО, О. Е. НАНИЙ, А. А. СУСЬЯН,
физический факультет МГУ, кафедра оптики и спектроскопии

Зачем нужны новые форматы модуляции?

Исследования в области новых форматов модуляции стимулируются поиском путей увеличения скорости и снижения стоимости единицы передаваемой информации. Экономичность DWDM-систем связи с большой суммарной скоростью передачи данных B_{Σ} в значительной степени зависит от эффективности использования рабочего спектра для передачи информации, так называемой спектральной эффективности γ (см. врезку 1). При использовании обычного NRZ-кодирования (см. ниже) максимальная практически достижимая γ не превышает 0,4 [1], поэтому веская причина для исследования альтернативных форматов модуляции – увеличение спектральной эффективности DWDM-систем связи.

Сделать это можно двумя путями: уменьшить расстояние между каналами или увеличить канальную скорость B (см. врезку 1). Второй путь экономически более перспективен, так как увеличение B приводит к снижению стоимости единицы передаваемой информации. По оценкам увеличение канальной скорости в четыре раза обеспечивает снижение стоимости единицы передаваемой информации примерно в 2,5 раза, так как при фиксированном значении γ увеличивает расстояние между каналами, уменьшает требования к стабильности длины волны излучения лазеров и спектральных характеристик мультиплексоров. Однако наряду с отмеченными преимуществами увеличение скорости передачи информации сопровождается ростом искажений

цифровых сигналов в линии связи. В частности, искажения, вызываемые хроматической дисперсией, растут пропорционально квадрату канальной битовой скорости (B^2), искажения из-за воздействия поляризационной модовой дисперсии (ПМД) в первом приближении пропорциональны первой степени канальной битовой скорости (B). Мощность шумов также пропорциональна битовой скорости. Поэтому по мере увеличения скорости передачи растет интерес к форматам, менее чувствительным к дисперсии и нелинейным искажениям.

Таким образом, можно определить две главные задачи, которые предполагается решить с использованием новых форматов: во-первых, обеспечить более эффективное использование спектральных каналов в системах плотного волнового мультиплексирования (DWDM) и, во-вторых, снизить чувствительность информационных сигналов к искажениям из-за дисперсии или нелинейности (см. врезку 2) [1–8].

Классификация форматов модуляции

Классифицируя форматы модуляции, следует разделить их, прежде всего, по параметру электромагнитной волны, используемому для модуляции. Практическое применение нашли форматы, в которых для кодирования информации применяется амплитудная модуляция (**ASK**, Amplitude Shift Keying), и форматы, использующие для этой цели фазовую модуляцию (**PSK**, Phase Shift Keying).

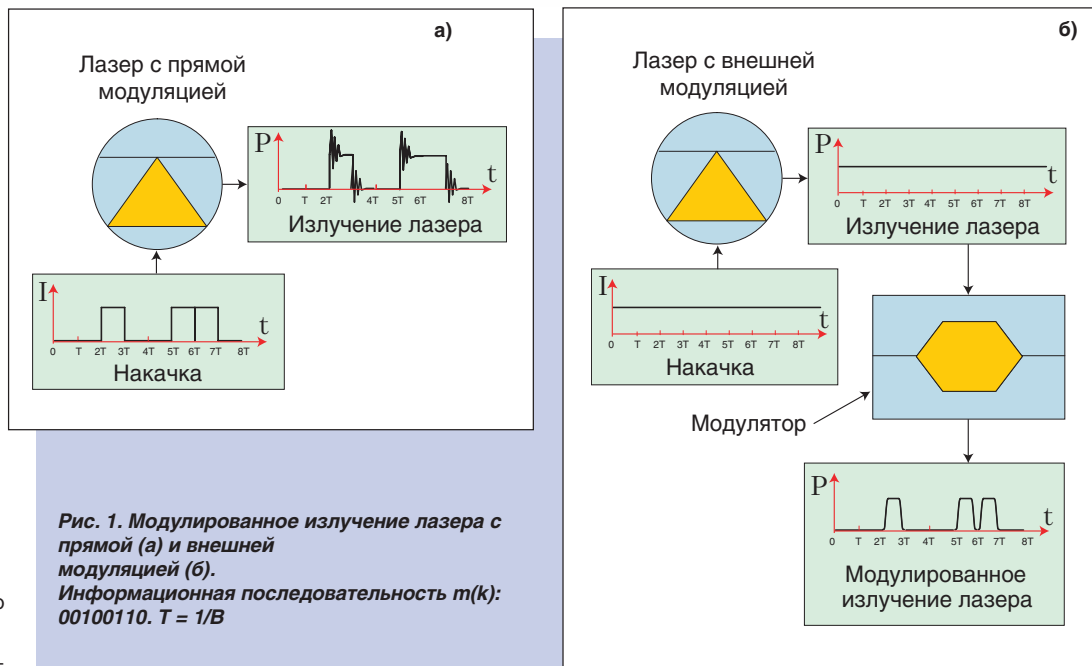
При этом следует иметь в виду, что ряд форматов, использующих амплитудную модуляцию, содержит некоторую фазовую мо-

дуляцию, которая не несет никакой информации. Аналогично оптические сигналы в форматах, применяющих фазовую модуляцию, обладают также и амплитудной модуляцией, не несущей самостоятельной информации. В то же время разработаны новые¹ многоуровневые форматы, в которых информация кодируется как амплитудой (интенсивностью), так и фазой световой волны. Модуляция, используемая в форматах такого типа, иногда называется квадратурной модуляцией, а для обозначения самих форматов используется аббревиатура **ASK-PSK**. Совсем недавно начаты исследования форматов, в которых информация кодируется модуляцией частоты (**FSK**, Frequency Shift Keying). Среди амплитудных форматов наиболее известными являются бинарные форматы, имеющие два информационных значения мощности, соответствующих включенному и выключенному состоянию передатчика. Поэтому такие форматы часто обозначают аббревиатурой **OOK** (On/Off Keying).

Следует иметь в виду, что в оптических системах связи все фазовые форматы модуляции используют дифференциальные фазовые методы, так как в оптическом диапазоне практически нецелесообразно выделять абсолютное значение фазы несущей световой волны принимаемого сигнала. Поэтому информация закладывается в относительный сдвиг фазы несущих двух последовательных импульсов. Этот фазовый сдвиг должен быть

¹ Новые для оптических систем связи. Аналогичные многоуровневые форматы модуляции хорошо известны и широко применяются в системах радиосвязи, кабельного телевидения и др.

преобразован в амплитудную модуляцию с использованием оптических линий задержки и интерференции. Поэтому правильное обозначение для этих форматов – **DPSK** (Differential Phase Shift Keying). Однако первая буква в аббревиатуре **DPSK** иногда опускается. С теоретической точки зрения волоконно-оптические системы можно рассматривать как классические полосовые системы, к которым применима хорошо разработанная для классической радиосвязи теория модуляции.



Спектральная эффективность

Спектральная эффективность – это численная мера эффективности использования рабочего спектра DWDM-систем связи для передачи информации. Она определяется как отношение скорости передачи в канале B к расстоянию между DWDM-каналами $\delta\nu$:

$$\gamma = B / \delta\nu.$$

При фиксированной ширине рабочего спектрального диапазона $\Delta\nu$, используемого для передачи сигналов, максимальная суммарная скорость B_Σ , которая равна произведению канальной скорости B на число каналов N , определяется произведением γ на $\Delta\nu$:

$$B_\Sigma = \gamma \Delta\nu.$$

Следовательно, для увеличения B_Σ нужно повышать спектральную эффективность. Это можно сделать двумя путями: уменьшить расстояние между каналами $\delta\nu$ (см. рис. 2Б) или увеличить канальную скорость B (см. рис. 2В).

B_Σ можно также увеличить путем расширения спектрального интервала $\Delta\nu$, т.е. добавления новых каналов на новых частотах (см. рис. 2Г), но это не всегда возможно, так как спектральная полоса DWDM систем связи может быть ограничена типом используемых усилителей или другими причинами.

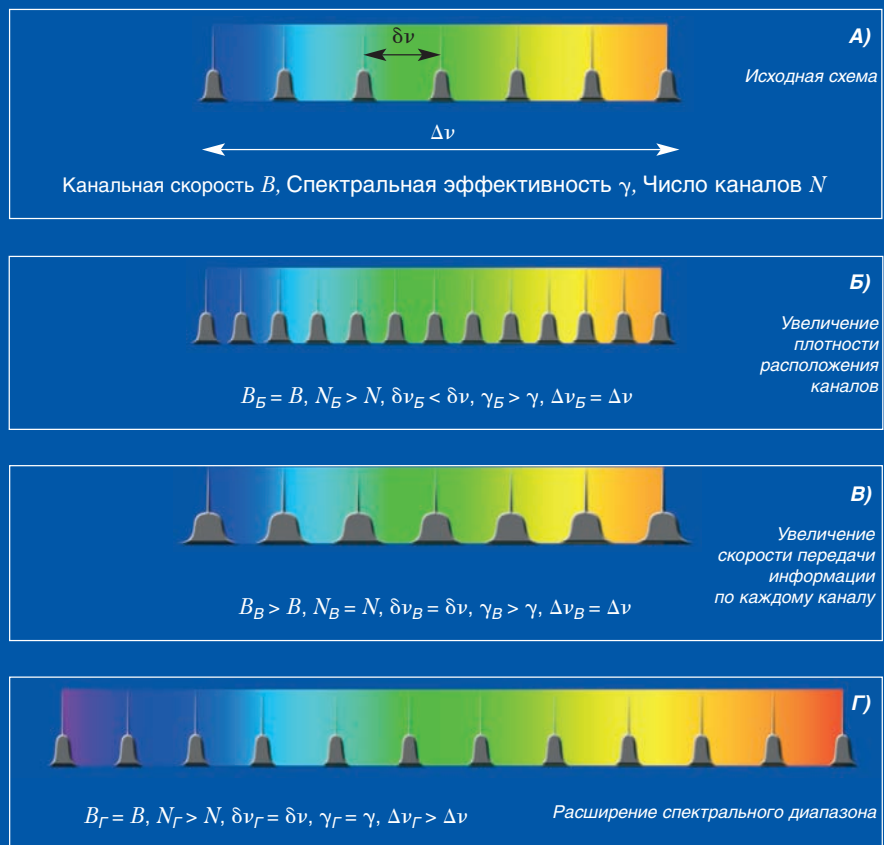


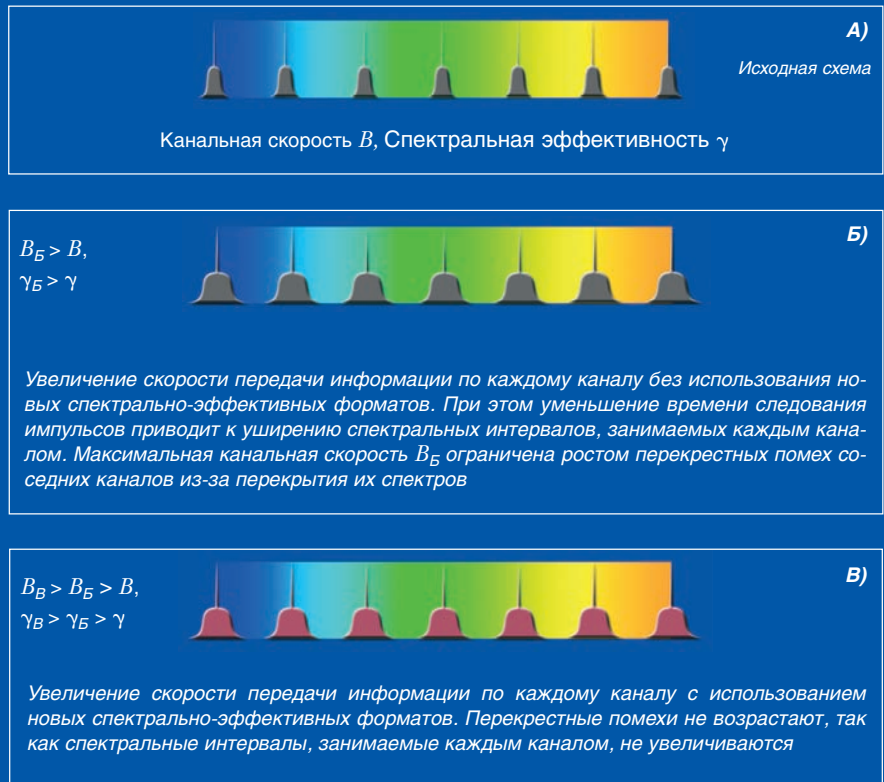
Рис. 2. Пути увеличения суммарной скорости передачи информации по волокну

Потребность в новых форматах модуляции

Применение новых форматов модуляции особенно целесообразно, когда

- все другие способы повышения суммарной скорости передачи информации V_{Σ} в линии связи исчерпали себя или оказались неэкономичными (см. врезку 1);
- необходимо увеличить дальность передачи или канальную скорость (см. рис. 3) за счет снижения чувствительности к искажениям из-за дисперсии или нелинейности.

Рис. 3. Увеличение канальной скорости передачи за счет применения спектрально эффективных форматов модуляции



Отличия между оптическими и радиомикро-волновыми системами лежат в диапазоне несущих частот (~200 ТГц против нескольких МГц или ГГц) и в свойствах компонентов, способных генерировать или модулировать сигналы в этих диапазонах, а также в свойствах среды распространения – оптического волокна в случае оптических систем связи.

Амплитудная модуляция

При амплитудной модуляции в системах оптической связи осуществляется изменение мощности оптического излучения передатчика. Исторически бинарный амплитудный формат был первым форматом, используемым в оптической связи, так как его можно получить путем прямой модуляции током накачки. Благодаря простоте и экономичности технической реализации бинарный ASK является самым распространенным форматом и в настоящее время. Прямая модуляция возможна в передатчиках как на основе светоизлучающих диодов, так и на основе полупроводниковых лазеров любого типа.

В передатчиках с прямой модуляцией (рис. 1а) в соответствии с информационной последовательностью $m(k)$ модулируется ток накачки. Под действием модулированного тока накачки модулируется выходная мощность светового излучения лазера. Такой способ реализации амплитудного формата является доминирующим в относительно низкоскоростных системах передачи (менее 2,5 Гбит/с), особенно в городских сетях и сетях доступа. Недостатком передатчиков с прямой модуляцией является наличие паразитной частотной и амплитудной модуляции, связанных с переходными процессами в полупроводниковых лазерах. Паразитная час-

тотная модуляция (чирп, от англ. chirp) приводит к увеличению искажений, связанных с хроматической дисперсией. Эффективным методом уменьшения паразитных эффектов является использование структурированных импульсов накачки [2], а также волокна с отрицательной дисперсией и полупроводниковых лазеров специальной конструкции. Современные передатчики с прямой модуляцией обеспечивают максимальную скорость передачи 10 Гбит/с. Однако по дальности передачи информации и спектральной эффективности системы связи с такими передатчиками далеки от оптимальных. Существенно увеличить технические пара-

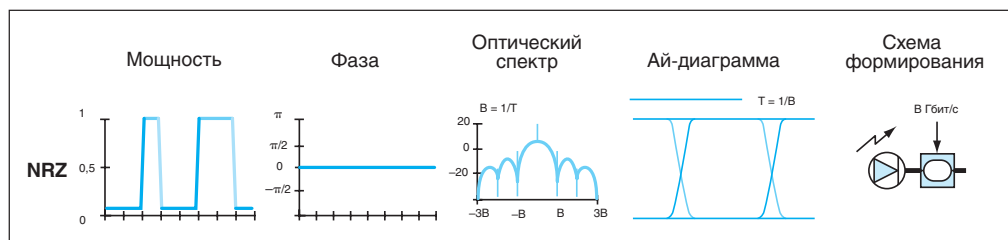


Рис. 4. Временные зависимости мощности и фазы, оптический спектр, Ай-диаграмма и схема формирования NRZ-сигнала

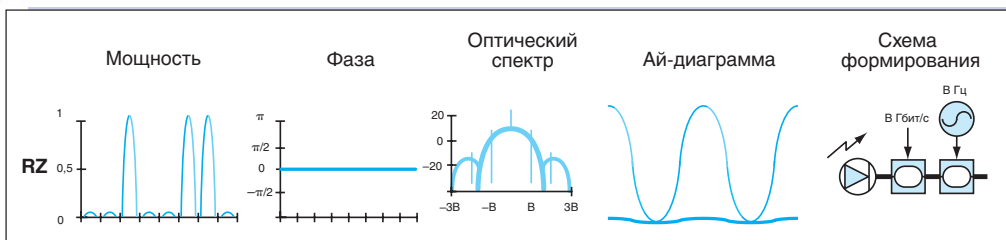


Рис. 5. Временные зависимости мощности и фазы, оптический спектр, Ай-диаграмма и схема формирования RZ-сигнала

метры системы связи позволяет использование передатчиков на основе полупроводниковых лазеров с непрерывной накачкой и внешней модуляцией. Оптическая схема такого передатчика показана на рис. 1б.

NRZ-, RZ- и улучшенный RZ-форматы

Наиболее популярным среди амплитудных форматов остается формат без возвращения к нулю (NRZ, Non Return to Zero, рис. 4). В этом формате сигнал, соответствующий

логической единице, формируется оптическим импульсом, длительность которого τ равна периоду следования символов $\tau = T = 1/B$ (где B – скорость передачи). Нулю соответствует отсутствие оптического сигнала или сигнал меньшего уровня.

В формате с «возвращением к нулю» (RZ, Return to Zero, рис. 5) любой символ «1» представляет собой импульс, длительность которого T может варьироваться, но всегда

тем фактом, что, когда импульс изолирован (в отличие от NRZ), каждый «1» символ не зависит от своих соседей. В NRZ, последовательности «1» порождают непрерывные пакеты световых сигналов, нестабильных при нелинейном распространении в периферии. Помимо «стойкости» к нелинейным искажениям при распространении, у сигналов RZ есть дополнительное преимущество – они более устойчивы к ПМД, чем NRZ-сигналы.

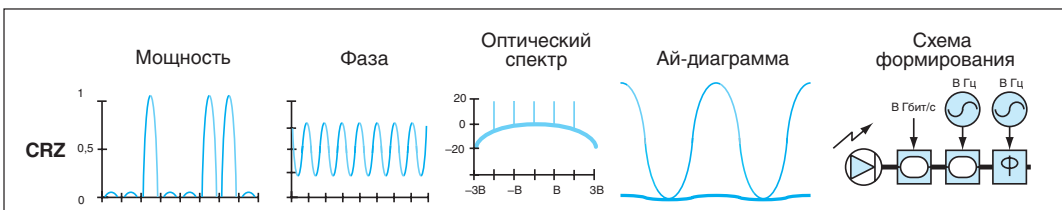


Рис. 6. Временные зависимости мощности и фазы, оптический спектр, Ай-диаграмма и схема формирования CRZ-сигнала

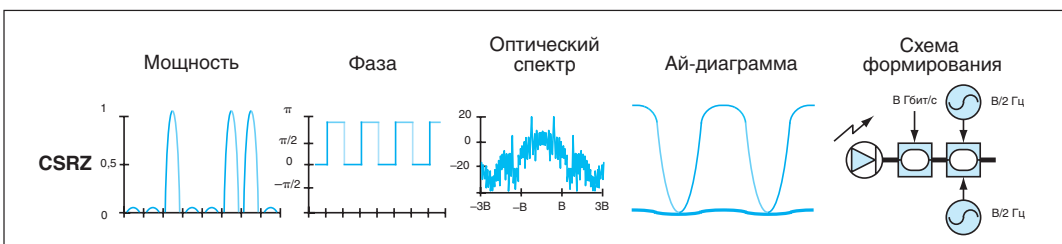


Рис. 7. Временные зависимости мощности и фазы, оптический спектр, Ай-диаграмма и схема формирования CSRZ-сигнала

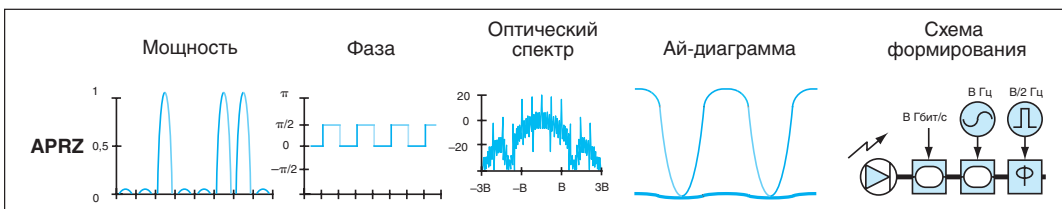


Рис. 8. Временные зависимости мощности и фазы, оптический спектр, Ай-диаграмма и схема формирования APRZ-сигнала

CRZ-, CSRZ- и APRZ-форматы

Чирпированный (содержащий частотную модуляцию) RZ (CRZ, Chirped RZ, рис. 6) является одним из самых успешных форматов.

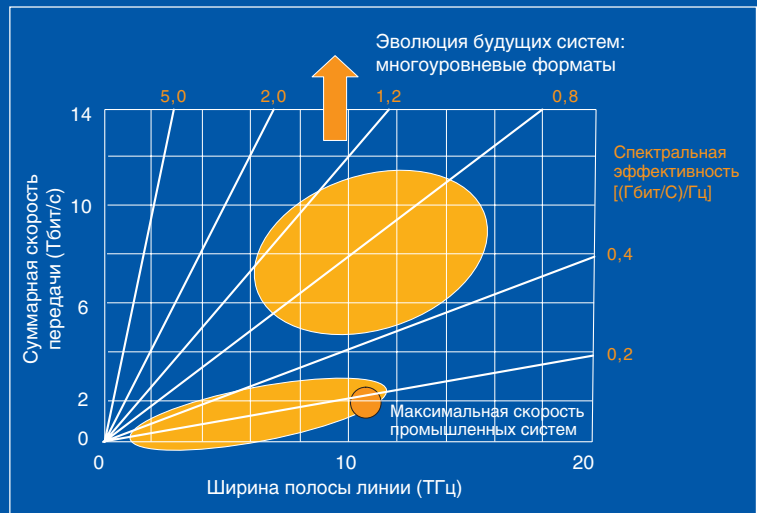
Он формируется при прохождении RZ-сигнала через фазовый модулятор, на который подается периодический сигнал на частоте следования информационных сигналов B [8].

У сигнала в формате CRZ спектр шире, чем у RZ-сигнала, что ограничивает максимально достижимую спектральную эффективность и, таким образом, пропускную способность. Однако этот формат получил широкое распространение в 10 Гбит/с подводных системах, потому что он значительно более устойчив к нелинейным эффектам. CRZ особенно хорошо противостоит внутрисимвольным нелинейным иска-

Тенденции развития современных оптических систем связи

Тенденции развития современных оптических систем связи иллюстрирует рис. 9. Нижний эллипс отображает состояние коммерческих оптических сетей (маленький яркий круг – наиболее продвинутые сети). Верхний эллипс представляет собой системы передачи данных для научных целей. Развитие будущих телекоммуникационных систем будет происходить по пути увеличения суммарной скорости передачи преимущественно за счет повышения спектральной эффективности γ . В свою очередь ширина полосы линии (рабочий спектральный диапазон) не будет существенно увеличиваться. Она, скорее всего, остановится на величине порядка 20 ТГц и составит, таким образом, 10% от несущей частоты (такой предел характерен, например, для радиофизических систем передачи). В этой эволюции оптических телекоммуникационных систем новые спектрально-эффективные форматы модуляции должны сыграть важнейшую роль.

Рис. 9. Тенденции развития современных оптических систем связи



жениям (т.е. искажениям, влияющим на форму отдельного изолированного импульса). Позже было установлено, что в 40 Гбит/с системах преобладают межсимвольные нелинейные эффекты (также относящиеся к внутриканальным эффектам, включая кросс-фазовую модуляцию и четырехволновое смешение [8]). Это открытие побудило к детальному изучению ряда других форматов модуляции, которые, как ожидается, улучшат характеристики 40 Гбит/с систем передачи. Формат **RZ** с подавленной несущей (**CSRZ**, Carrier Suppressed RZ, рис. 7) первоначально использовался в континентальных линиях связи со скоростью 40 Гбит/с по одному каналу [8]. В этом формате дополнительный сдвиг фазы на π разделяет последовательные битовые такты путем дополнительной фазовой модуляции на частоте, равной половине частоты следования импульсов. Однако формат **CSRZ** не очень эффективен против внутриканальных нелинейных эффектов. Применяя дополнительный сдвиг фазы на $\pi/2$ к последовательным битовым тактам вместо π , чтобы получить так

называемый «**RZ** с дополнительным сдвигом фазы на $\pi/2$ » ($\pi/2$ **APRZ**, Alternate Phase RZ, рис. 8) формат, можно добиться более существенного снижения внутриканальных искажений [8].

VSB-фильтрация

В ряде форматов, используемых в WDM-системах, применяется усечение оптического спектра канала путем очень узкополосной фильтрации. Использование фильтров дает возможность получить сигналы с одной боковой полосой (**SSB**, Single SideBand) или частично подавленной

Таблица 1
Ширина полосы пропускания M-ary ASK

| Количество уровней (M) | Спектральная ширина сигнала |
|------------------------|-----------------------------|
| 2 | 2 B |
| 4 | B |
| 8 | 2/3 B |
| 16 | 1/2 B |
| 32 | 2/5 B |
| 64 | 1/3 B |

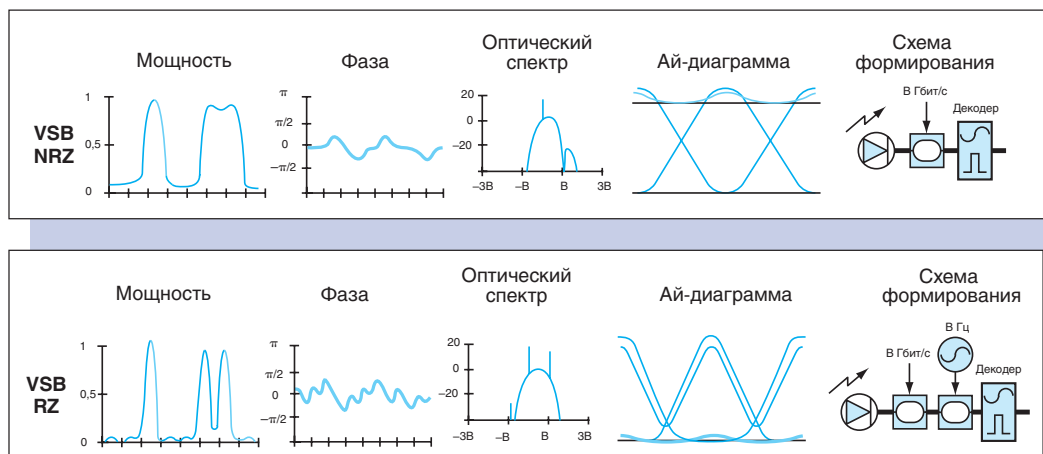


Рис. 10. Временные зависимости мощности и фазы, оптические спектры, Ай-диаграммы и схемы формирования NRZ- и RZ-сигналов с частичным подавлением боковой полосы (VSB)

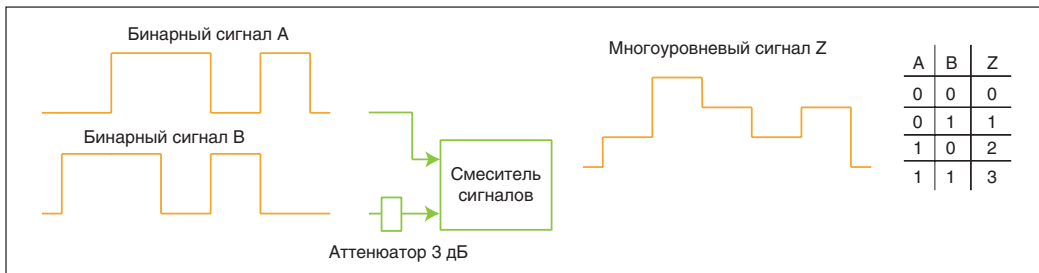


Рис. 11. Схема формирования 4-ару сигнала

Таким образом, вместо передачи оптических сигналов единичной амплитуды с периодом $T = 1/B$ (что характерно для бинарных форматов) можно передавать сигналы, принимающие M значений, с интервалом $T_N = N/B = (\log_2 M)/B$, сохраняя скорость передачи информации [1].

Так как длительность импульса увеличилась от $T = 1/B$ до $T_N = N/B$, спектр (точнее, расстояние между первыми нулями в спектре) передаваемого (прямоугольного) импульса уменьшился от $2B$ до $2B/N = 2B/\log_2 M$. В таблице 1 проиллюстрированы эти изменения. Случай $M = 2$ соответствует бинарному NRZ-формату, ширина

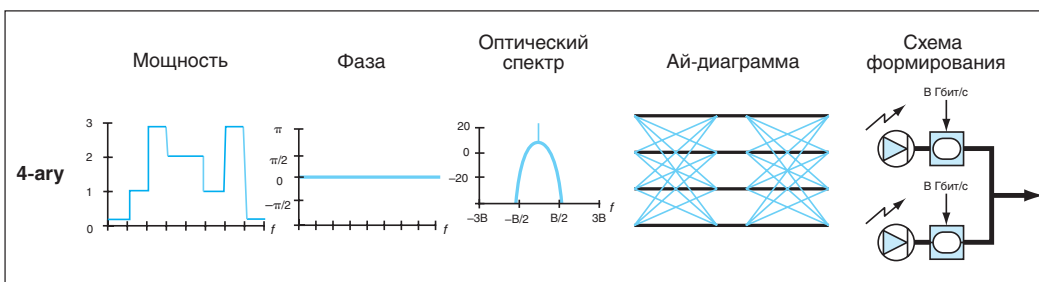


Рис. 12. Временные зависимости мощности и фазы, оптический спектр, Ай-диаграмма и схема формирования 4-ару сигнала

боковой полосой (VSB, Vestigial SideBand, рис. 10). Спектральная эффективность SSB- и VSB-форматов повышается за счет устранения избыточной информации, присутствующей NRZ и RZ-форматам. Сигнал с частично подавленной боковой полосой, полученный узким оптическим фильтрованием вне центра спектра, оказался эффективным для WDM-систем [8]. Однако максимально достижимое расстояние передачи ограничивается тем фактом, что подавленная часть спектра канала имеет тенденцию восстанавливаться из-за нелинейностей, особенно в 10 Гбит/с системах. Это предполагает использовать VSB-фильтрацию только на стороне приемника.

Многоуровневое амплитудное кодирование (M-ary ASK, рис. 12)

В этом формате N бит сигнала преобразуются в

многоуровневый сигнал (символ) с числом уровней M , отличающихся амплитудой, причем $M = 2^N$, а полный сигнал состоит из этих символов и преобразуется в слово, записанное бинарным кодом. Каждый символ несет в себе $N = \log_2 M$ бит информации.

полосы которого составляет $2B$. Формирование многоуровневых сигналов осуществляется при помощи линейных схем, содержащих attenuаторы и смесители. Для примера на рис. 11 показана сравнительно простая реализация схемы формирования 4-ару системы.

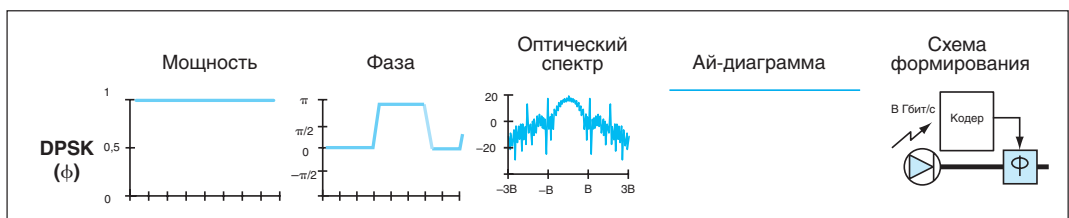


Рис. 13. Временные зависимости мощности и фазы, оптический спектр, Ай-диаграмма и схема формирования двоичного DPSK-сигнала с помощью модулятора фазы

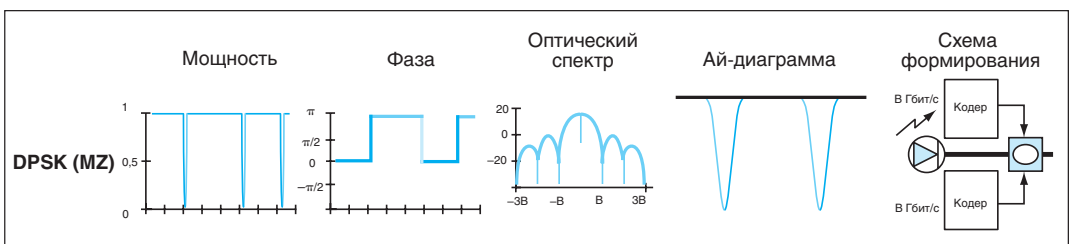


Рис. 14. Временные зависимости мощности и фазы, оптический спектр, Ай-диаграмма и схема формирования двоичного DPSK-сигнала с помощью модулятора Маха – Цандера

Таблица 2

Результат сложения по модулю 2

| a_k | b_k | $c_k = a_k \oplus b_k$ |
|-------|-------|------------------------|
| 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 0 |

Таблица 3

Соответствие значений фаз (ϕ) двух последовательных импульсов передаваемому символу

| ϕ_1 | ϕ_2 | символ |
|----------|----------|--------|
| 0 | 0 | 0 |
| 0 | π | 1 |
| π | 0 | 1 |
| π | π | 0 |

Дифференциальное кодирование DPSK-сигнала

| Параметр дискретизации, k | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|-------|-------|-------|-------|---|-------|---|---|-------|
| Информационный сигнал, $m(k)$ | | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| Сигнал в дифференциальной кодировке, $c(k)$ | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| Соответствующий сдвиг фаз, $\Theta(k)$ | π | π | π | π | 0 | π | 0 | 0 | π |

Таблица 4

ме можно сохранить число каналов, увеличив скорость передачи по каждому из них, во втором случае, сохранив B неизменной, можно увеличить число каналов и дальность передачи без использования компенсации хроматической дисперсии. Уменьшение ширины спектра сигнала позволяет уменьшить мощность шумов, но из этого не обязательно следует увеличение дальности передачи, так как разность значений мощности между сигналами с близкими значениями символов уменьшается (появляются дополнительные возможности

Фазовая модуляция DPSK-форматы

Во втором классе форматов модулируемым параметром является фаза. Поскольку модуляция абсолютного значения фазы в оптических системах оказалась затруднительной, практический интерес представляют форматы на основе дифференциальной фазовой модуляции (**DPSK**). В отличие от рассмотренных выше форматов, в **DPSK** информация содержится в разности фаз между двумя последовательными импульсами, при этом мощность излучения информации

не несет. Схема формирования сигнала при помощи фазового модулятора приведена на рис. 13. Предпочтительнее, однако, схема, использующая модулятор Маха – Цандера (рис. 14), настроенный таким образом, что уровни интенсивности символов «1» и «0» идентичны. Поскольку информация содержится в изменении фазы от символа к символу (см. таблицу 3), то сигнал, управляющий фазовым модулятором, необходимо сначала преобразовать, исполь-

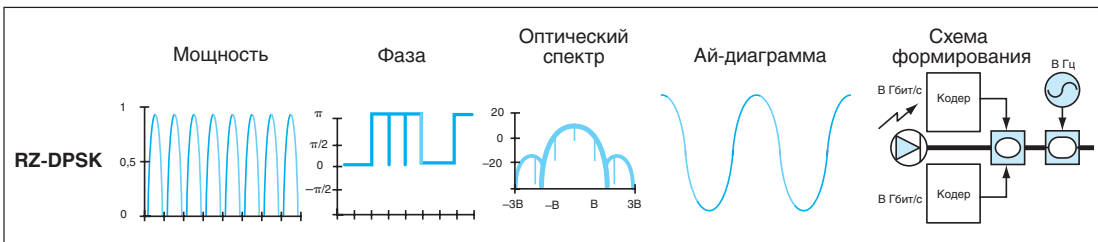


Рис. 15. Временные зависимости мощности и фазы, оптический спектр, Ай-диаграмма и схема формирования RZ-DPSK-сигнала

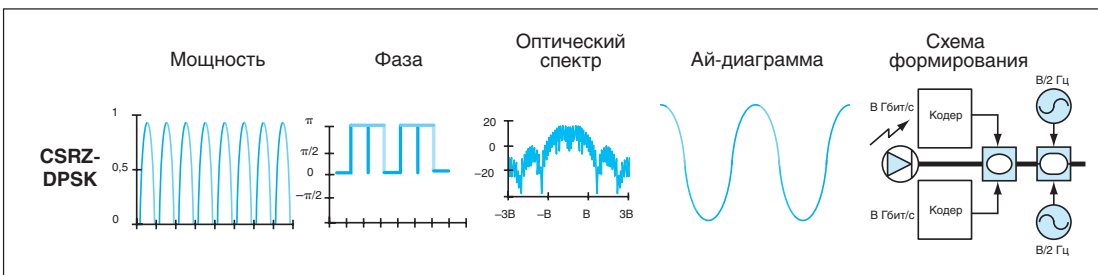


Рис. 16. Временные зависимости мощности и фазы, оптический спектр, Ай-диаграмма и схема формирования CSRZ-DPSK-сигнала

Четырехуровневый сигнал позволит в 2 раза увеличить спектральную эффективность γ , при этом либо увеличить в 2 раза скорость передачи, сохранив неизменной ширину спектра сигнала, либо уменьшить в 2 раза этот спектр, сохранив скорость передачи. В первом случае в DWDM-систе-

закрывания «зрочков» Ай-диаграммы). Преимущества многоуровневых форматов наиболее заметны в локальных системах связи (LAN) на основе многомодового волокна, где ограничения скорости и дальности передачи определяются межмодовой дисперсией.

зуя процедуру, называемую дифференциальным кодированием. Дифференциальное кодирование начинается с произвольного выбора первого бита кодовой последовательности $c(k=0)$. На втором этапе последовательность $c(k)$ может кодироваться одним из двух способов:

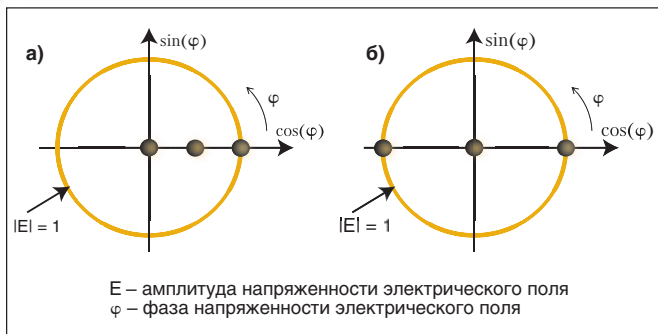


Рис. 17. Амплитудно-фазовая диаграмма («constellation» – созвездие) 3-символьных сигналов DBT (а) и PSBT (б)

Применение двух работающих параллельно фотодиодов в качестве приемников позволяет уменьшить вероятность появления ошибки и тем самым повысить чувствительность на ~3 дБ. В большинстве экспериментов используется **DPSK**-

рос, необходимо дальнейшее исследование и улучшение **DPSK**-формата.

Двойной фазомодулированный бинарный формат

Двойная бинарная передача (**DBT** – DuoBinary Transmission) – передача сигналов с использованием трехуровневой схемы кодирования. Одна из ее разновидностей – двойная фазомодулированная передача (**PSBT** – Phase Shaped Binary Transmission, рис. 17, 18) – особенно интересна для **DWDM**-систем. Формат **PSBT** был разработан с целью уменьшения ширины спектра

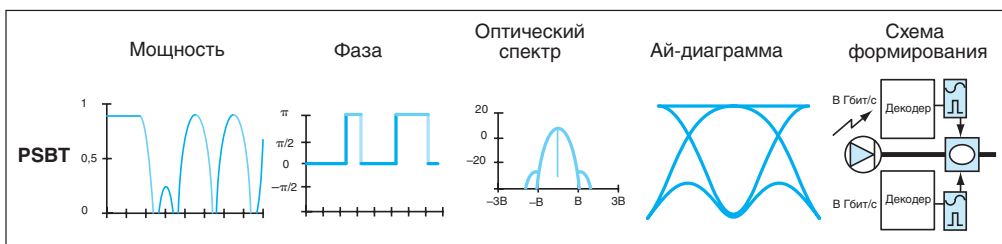


Рис. 18. Временные зависимости мощности и фазы, оптические спектры, Ай-диаграммы и схемы формирования PSBT-сигнала

или

$$c(k) = c(k-1) \oplus m(k)$$

$$c(k) = c(k-1) \oplus m(k),$$

где « \oplus » – это сложение по модулю 2 (см. таблицу 2), а черта над выражением означает его дополнение. В таблице 4, например, $c(0) = 1$, а кодирование выполнено вторым способом. Это значит, что текущий бит кода $c(k)$ равен 1, если бит сообщения $m(k)$ совпадает с предыдущим битом кода $c(k-1)$, в противном случае $c(k) = 0$. На третьем этапе кодирования последовательность $c(k)$ преобразуется в последовательность сдвигов фаз $\Theta(k)$, где единица представляется сдвигом фаз на π , а ноль – нулевым сдвигом фазы. На детекторе определяется корреляция принятого сигнала с опорным, который представляет собой запаздывающую на один бит версию принятого сигнала. (Эту корреляцию может выполнять, например, пассивный волоконный интерферометр Маха – Цандера, у которого одно плечо длиннее другого на один бит.) Таким образом, в течение каждого интервала времени T фаза принятого символа сравнивается с фазой предыдущего. Если они совпадают, то детектируется логическая «1», а если разность фаз равна π – логический «0» (см. таблицу 3).

модулятор в комбинации с формирователем **RZ**- или **CSRZ**-импульсов, т.е. **RZDPSK**- и **CSRZDPSK**-форматы (рис. 15, 16 соотв.). Формирование импульса может быть выполнено с помощью **MZ**-модулятора, который управляется периодическим сигналом на частоте B (как в **RZ**-схеме, см. рис. 15), или на частоте $B/2$ (как в **CSRZ**-схеме, см. рис. 16). В **RZDPSK**- и **CSRZDPSK**-форматах амплитудная модуляция является дополнительной и не несет никакой информации. Фаза сигнала при модуляции **RZDPSK** не отличается от соответствующей фазы при **DPSK**-кодировании. При модуляции **CSRZDPSK**, как и при обычном **CSRZ**-кодировании, фаза в начале каждого такта скачкообразно изменяется на π . Получается, что фаза любого **CSRZDPSK**-сигнала дополняет фазу аналогичного **RZDPSK** (или **DPSK**) сигнала до π . Экспериментальные исследования показали, что при скорости передачи 40 Гбит/с **DPSK**-сигналы удавалось передать на большие расстояния с меньшими потерями, чем сигналы в других форматах. Однако в этом случае необходимы дорогие терминалы. Поэтому до сих пор не ясно, будут ли системы связи с **DPSK**-форматами экономичнее систем, использующих **ASK**-форматы. Чтобы получить утвердительный ответ на этот воп-

рос, необходимо дальнейшее исследование и улучшение **DPSK**-формата. В нем используется схема кодирования с уровнями «0» и «-1», «1», отличающимися сдвигом фазы на π . Формат в 3 раза более устойчив к хроматической дисперсии, чем **NRZ** или чистый двойной бинарный. Сдвиг фазы на π в **PSBT** также помогает снижать вредное воздействие внутриканальных нели-

нейных эффектов на скорости 40 Гбит/с. Использование этого формата обеспечивает улучшение чувствительности фотоприемника и одновременно не ведет к снижению разности уровней детектируемых сигналов. Кроме того, для детектирования **PSBT**-формата используются стандартные бинарные фотоприемники. Более подробно о форматах **DBT** и **PSBT** можно прочитать в [12].

Смешанные амплитудно-фазовые форматы

Применение популярных **ASK**-форматов при постоянном росте количества передаваемой информации препятствует дальнейшему увеличению пропускной способности линий передачи, потому что частота модуляции электрического сигнала ограничена величиной 40 Гбит/с. Кроме того, высокоскоростная бинарная модуляция характеризуется низкой спектральной эффективностью и меньшей устойчивостью к дисперсии. В какой-то степени эти проблемы решает многоуровневое кодирование сигналов, например, четырехуровневые форматы **ASK** и **PSK** (или **QPSK** – Quaternary Phase Shift Keying). Однако реализация четырехуровневой схемы очень сложна. Увеличение числа уровней значений приводит к тому, что он



Рис. 19. Амплитудно-фазовая диаграмма 8-символьного сигнала ASK-QPSK

имеет 2 уровня амплитуды (E_1, E_2) и 4 уровня фазы ($0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$). Устройство передатчика показано на рис. 20. Не вносящий линейной частотной модуляции (чирпа) двухтактный модулятор Маха – Цандера модулирует фазу непрерывной световой волны, выходящей из лазерного диода, заставляя ее принимать значения 0 или π . Оптический фазовый модулятор добавляет сдвиг фаз 0 или $\pi/2$. Таким образом, получается четырехуровневое фазовое кодирование. Следующим этапом добавляется NRZ или RZ амплитудное модулирование. Двухтактный модулятор Маха – Цандера, не вносящий чирпа, нужен для NRZ-ASK-кодирования, аналогичный прибор превращает NRZ- в RZ-формат.

низкая восприимчивость к нелинейностям волокна по сравнению с DPSK-, NRZ- и RZ-форматами модуляции. Однако в настоящее время FSK-форматы в коммерческих сетях не используются. Это объясняется отсутствием быстрых перестраиваемых и относительно недорогих лазеров для промышленных сетей связи. Еще один формат, в котором для кодирования используется частота (длина волны), был назван авторами «символьной модуляцией» [13]. Он теоретически обладает некоторыми техническими преимуществами в системах дальней связи, но из-за сложности реализации нет данных о его экспериментальных исследованиях

Заключение

Несмотря на рост количества передаваемой по волокну информации, основным форматом модуляции остается бинарное амплитудное кодирование (ASK). Популярность ASK-форматов не падает благодаря простоте их реализации и малой стоимости приемопередающей аппаратуры. Но использование амплитудной модуляции препятствует повышению спектральной эффективности γ , а для будущих сетей связи увеличение γ станет единственным способом повысить суммарную скорость передачи. Поэтому внедрение новых спектрально-эффективных форматов модуляции, по-видимому, начнется в ближайшее время по мере увеличения количества передаваемой информации.

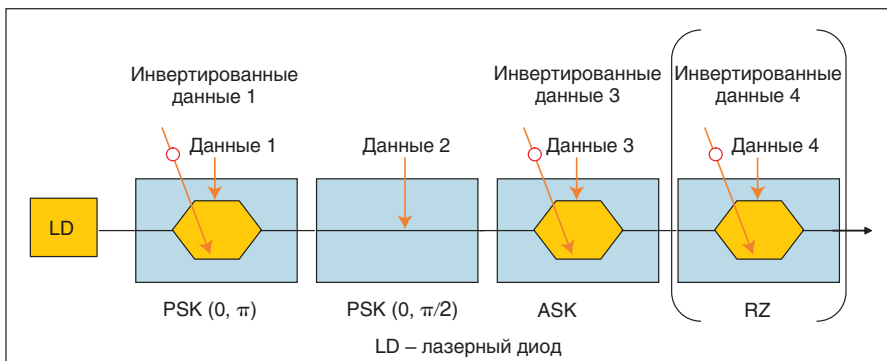


Рис. 20. Устройство передатчика ASK-QPSK. Без блока, помещенного в скобки, реализуется формат NRZ-QPSK, с этим блоком – RZ-QPSK

хуже распознается приемником из-за плохого раскрытия eye-диаграммы. Наиболее действенным способом увеличения спектральной эффективности γ является использование многоуровневой амплитудно-фазовой модуляции, при которой информация кодируется как амплитудой, так и фазой сигнала. Иногда для обозначения амплитудно-фазовой модуляции используется термин «квадратурная модуляция».

ASK-QPSK

В работе [7] предложен новый 8-символьный смешанный формат ASK-QPSK. Предложенный формат является сочетанием бинарного амплитудного ASK и 4-символьного фазового QPSK-форматов.

На рис.19 показаны 8 уровней сигнала (A~D, a~d) предложенной схемы кодирования ASK-QPSK. Один символ содержит 3 бита информации, и скорость передачи бита получается в 3 раза выше скорости передачи закодированного символа. Сигнал

На границах бита RZ-ASK-QPSK мощность падает до нулевого значения, и поэтому этот формат более устойчив к хроматической дисперсии, чем NRZ-ASK-QPSK, что подтверждается результатами проведенных экспериментальных исследований. Устойчивость к хроматической дисперсии 30 Гбит/с RZ-ASK-QPSK сравним с 10 Гбит/с RZ-ASK.

Частотная модуляция

Форматы, в которых параметром модуляции является частота световой волны, называются частотными форматами модуляции или FSK-форматами. Такой подход, когда используется прямая модуляция лазера с распределенной обратной связью (DFB – Distributed FeedBack), считается потенциально дешевле. При использовании дифференциального детектирования FSK (как и DPSK) обладает лучшими свойствами в плане увеличения отношения сигнал/шум по сравнению с NRZ. Кроме того, у FSK самая

В настоящее время активно разрабатываются фазовые форматы модуляции, но из-за сложности и высокой стоимости передающих и принимающих устройств они фактически не используются в коммерческих линиях связи. Частотные форматы находятся в самом начале исследований. Они обладают некоторыми преимуществами по сравнению с NRZ-, RZ- и DPSK-форматами, обещают быть более дешевыми, но требуют значительного улучшения перестраиваемых лазеров-передатчиков. Теоретические оценки показали перспективность применения двойного фазомодулированного формата в DWDM-сетях из-за малой ширины спектра сигнала. Большинство свойств новых форматов получено экспериментально или в результате численного моделирования. Часто модели не учитывают влияния некоторых нелинейных эффектов на распространяющийся сигнал, а экспериментальные данные не могут объяснить некоторые явления. Поэтому необходимы

дальнейшие исследования влияния нелинейных эффектов, различных видов дисперсии и шумов на качество работы систем связи, использующих различные форматы модуляции.

Сокращения

APRZ (Alternate Phase **RZ**) – **RZ**-формат с дополнительным сдвигом на $\pi/2$ между соседними битами.

ASK (Amplitude Shift Keying) – формат, использующий для кодирования информации амплитудную модуляцию.

CRZ (Chirped **RZ**) – **RZ**-формат с дополнительной периодической фазовой модуляцией, не несущей информации; чирпированный **RZ**.

CSRZ (Carrier Suppressed **RZ**) – **RZ**-формат с дополнительным сдвигом на π между соседними битами; чирпированный **RZ**.

DFB (Distributed FeedBack) – распределенная обратная связь.

DPSK (Differential Phase Shift Keying) – формат модуляции, в котором информация закодирована в разности фаз соседних импульсов.

DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) – плотное волновое (частотное) мультиплексирование.

FSK (Frequency Shift Keying) – формат, использующий для кодирования информации частотную модуляцию.

LAN (Local Area Network) – локальная сеть связи.

NRZ (No Return to Zero) – формат модуляции без возвращения к нулю.

OOK (On/Off Keying) – бинарный формат модуляции с двумя значениями амплитуды сигнала, соответствующими включенному и выключенному состоянию передатчика, то

же, что бинарный **ASK**.

PSBT (Phase Shaped Binary Transmission) – двойная фазомодулированная бинарная передача.

PSK (Phase Shift Keying) – формат, использующий для кодирования информации фазовую модуляцию.

QPSK (Quaternary Phase Shift Keying) – формат модуляции, символы в котором могут иметь четыре различных значения фазы.

RZ (Return to Zero) – формат модуляции с возвращением к нулю.

SSB (Single SideBand) – формат, в котором сигнал после амплитудной модуляции подвергается дополнительной частотной фильтрации с целью подавления одной из боковых полос в его спектре.

VSB (Vestigial SideBand) – формат, в котором сигнал после амплитудной модуляции подвергается дополнительной частотной фильтрации с целью частичного подавления одной из боковых полос в его спектре.

WDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) – мультиплексирование (уплотнение) с разделением по длинам волн.

ПМД – поляризационная модовая дисперсия.

Литература

1. Conradi Jan. *Bandwidth-Efficient Modulation Formats for Digital Fiber Transmission Systems. Optical Fiber Telecommunications, 2002, vol. IV B, p. 862.*

2. Белов К.Н., Наний О.Е. Уменьшение ширины спектра излучения лазеров с прямой модуляцией // *Lightwave Russian Edition, 2003, № 1, с. 9.*

3. Развитие технологий оптической связи и волокон (Технический семинар компании

Corning) // *Lightwave Russian Edition, 2004, № 4, с. 16–17.*

4. Winzer P.J. and Essiambre R.J. *Advanced optical modulation formats. ECOC-IOOC 2003 Proceedings, vol. 4, pp. 1002–1003, Rimini, 2003.*

5. Ferber S. et al. *Comparison of DPSK and OOK modulation format in a 160 Gb/s transmission system // ECOC-IOOC 2003 Proceedings, vol. 4, pp. 1004–1005, Rimini, 2003.*

6. Idler W. et al. *System Performance and Tolerances of 43Gb/s ASK and DPSK modulation formats // ECOC-IOOC 2003 Proceedings, vol. 4, pp. 1006 - 1007, Rimini, 2003.*

7. Hayase S. et al. *Proposal of 8-State per Symbol (Binary ASK and QPSK) 30-Gbit/s Optical Modulation / Demodulation Scheme // ECOC-IOOC 2003 Proceedings, vol. 4, pp. 1008–1009, Rimini, 2003.*

8. Bigo S. et al. *What has hybrid phase/intensity encoding brought to 40 Gbit/s ultra long-haul systems? // ECOC-IOOC, 2004. Proceedings, Th2.5.*

9. Иртегов Д.В. *Введение в сетевые технологии. СПб.: БХВ-Петербург, 2004.*

10. Klekamp A. et al. *Comparison of FSK by directly modulated DBF laser with DPSK, NRZ and RZ modulation formats at 10 Gb/s // ECOC-IOOC, 2004.*

11. Golovochenko E.A. et al. *Transmission Properties of Chirped Return-to-Zero Pulses and Nonlinear Intersymbol Interference in 10 Gb/s WDM Transmission. OFC'00, paper FC3, Baltimore.*

12. Величко М.А., Сусьян А.А. *Двойной фазомодулированный бинарный формат // Lightwave Russian Edition, 2004, № 4, с. 26–29.*

13. Некучаев А., Юсупалиев У. *Символьная передача данных по ВОЛС. Патент – российский, что дальше? // Электроника НТБ, 2001, № 6.*



ПАССИВНЫЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ КОМПОНЕНТЫ

- волоконно-оптические соединительные изделия
- кабельные сборки
- кроссовое оборудование
- конструктивы: шкафы, стойки, аксессуары
- оптический кабель

ИНСТРУМЕНТЫ, ПРИСПОСОБЛЕНИЯ, РАСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

- инструмент для разделки кабелей
- инструмент для оконцовки кабелей
- скальваторы для оптических волокон
- сварочное оборудование и аксессуары
- контрольно-измерительное оборудование

При приобретении полного комплекта для оконцевания проводится **БЕСПЛАТНОЕ** обучение одного монтажника

www.ptfiber.ru

Санкт-Петербург, ЗАО «ПТ ПЛЮС»
тел.: (812) 320-24-71
факс.: (812) 320-24-70
e-mail: pt@ptfiber.ru

Москва, ООО «Адвантел»
тел./факс: (495) 775-32-68
e-mail: office@advantel.ru

