

Что есть так называемые «Когерентные системы передачи»?

What are the so-called "Coherent transmission systems"?

Власов / Vlasov I.

Игорь Иоильевич

(i.vlasov@loniis.ru)

Филиал ФГУП «Ленинградское

отделение центрального научно-исследовательского
института связи»,

заместитель начальника НТИ-288.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: оптическая система передачи – optical transmission system; когерентный гетеродиновый приемник сигнала – coherent heterodyne signal receiver; квадратурно-фазовая модуляция с двойной поляризацией сигнала – quadrature and phase modulation with dual polarization of a signal; метод прямого фотодетектирования – direct photodetection method; метод фотосмешения – photomixing method; отношение оптический сигнал/шум – optical signal/noise ratio; оптическое усиление сигнала – optical amplification of a signal.

Представленная статья рассказывает о том, что такое оптические системы с когерентным гетеродиновым приемом, называемые на профессиональном сленге связистов «когерентными системами». Автор описывает принципы построения таких систем, ссылается на используемые в них патенты и стандарты, дает определения и сравнения разных оптических компонентов систем передачи с когерентным оптическим приемом, упоминает о применяемых в них методах кодирования линейного сигнала.

This article discovers the definition of optical systems with coherent heterodyne reception, called "coherent systems" by communications operators in their industry buzzword. The author describes the principles of these systems arrangement, makes reference to patents and standards used in them, defines and compares various optical components of transmission systems with coherent optical reception, specifies methods of linear signal coding used in them.

Относительно недавно появились системы ВОСП, работающие на линейных скоростях 100G, периодически называемые когерентными системами передачи. Принципы построения таких систем начали разрабатываться достаточно давно, практически сразу после появления когерентных источников излучения – лазеров, в начале 60-х годов двадцатого века. Однако практическая реализация когерентных систем на коммерче-

ских сетях связи началась только во втором десятилетии XXI в., что обусловлено рядом факторов: сложность схем передатчиков и приемников потребовали создания специальных технологий планарной оптики PLC (Planar Lightwave Circuit) для оптических фильтров, компенсаторов дисперсии, модуляторов, смесителей, циркуляторов, коммутаторов и т. д. Кроме того, при реализации технологии необходимо применение быстродействующих электронных процессоров для осуществления линейного кодирования, узкополосных перестраиваемых высокостабильных лазеров с внешними модуляторами и устройствами управляемой поляризации сигнала для организации линейного тракта, высокочувствительных малошумных и широкополосных фотодетекторов для надежного приема оптического сигнала. Сейчас найти описание принципов работы подобных систем достаточно сложно – компании-производители тщательно скрывают такую информацию. Конечно, существует стандарт на 100G интерфейсы – IEEE 802.3, однако он описывает только клиентскую часть подобной системы и предназначен для организации стыковки подобных систем со сторонним оборудованием, а вот реализация именно линейного тракта покрыта густой «фирменной» тайной. Немного приоткрыть ее можно, если внимательно почитать один из документов, который можно найти в открытом доступе – патент 2008140162/09 «КОГЕРЕНТНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ПРИЕМНИК С УПРАВЛЕНИЕМ ПОСРЕДСТВОМ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ И С ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ/КОРРЕКЦИЕЙ» от 01.03.2007, принадлежащий компании ДИСКАВЕРИ СЕМИКОНДАКТОР ИНК. Этот документ описывает специфический оптический приемник с гетеродином и обратной связью для увеличения чувствительности и избирательности. В качестве гетеродина такого приемника выступает оптический когерентный лазер. Привожу выдержки из этого документа.

«Когерентное оптическое детектирование интенсивно исследовалось применительно к волоконной

оптике в 80-е и 90-е годы. Однако с появлением оптических усилителей работы по этим универсальным и высокочувствительным приемникам были свернуты. Надо заметить, что были достигнуты значительные усовершенствования в отношении оптических компонентов. Они включают в себя выходную мощность лазерного сигнала, стабильность ширины линии и шум, а также полосу, возможности передачи энергии и ослабление синфазного сигнала (сбалансированных) фотодетекторов. Достижения в электронных микроволновых компонентах позволяют использовать преимущества оптического когерентного детектирования над прямым детектированием. Авторы настоящего изобретения понимают, что это делает когерентное оптическое детектирование весьма привлекательным для линий связи будущего.

Например, использование оптического когерентного приемника позволяет детектировать сигналы очень низкой интенсивности, более низкой, чем могут воспринимать традиционные оптические приемники. Это особенно важно для детектирования сигналов на оптических длинах волны, где оптическое усиление с низким уровнем шума невозможно. Кроме того, когерентное детектирование позволяет сохранять информацию фазы оптического сигнала. Это полезно для детектирования оптических сигналов, где информация содержится в фазе электромагнитной волны. Для этого требуется стабильная синхронизация по фазе и/или частоте между принятым оптическим сигналом и оптическим гетеродином, используемым в когерентном приемнике.

Основные составные части когерентного приемника включают в себя оптический гетеродин, оптический ответвитель, сбалансированный фотодетектор, блок синхронизации по фазе/частоте, блок управления поляризацией и блок обработки электрического сигнала.

В структуре когерентного приемника принятый оптический сигнал смешивается со светом оптического гетеродина (LO). Таким образом, сигнал преобразуется с понижением частоты от частоты оптической несущей (~200 ТГц на 1,55 мкм) до частоты микроволновой несущей (обычно

несколько гигагерц). Результирующий сигнал биений после фотодетектирования демонстрирует центральную частоту, которая соответствует промежуточной частоте (ПЧ), которая равна разности между частотой сигнала и частотой LO.» [1].

Таким образом, можно сказать, что правильное название подобных систем – это «Системы передачи с когерентным гетеродиновым приемником сигнала», где в качестве гетеродина используется высокостабильный узкополосный когерентный источник излучения – высококачественный лазерный излучатель. Именно такой приемник сигнала позволяет детектировать высокоскоростные оптические сигналы, имеющие очень низкий уровень, почти не отличимый от уровня шума.

Как показано на рис. 1, система 100G имеет два интерфейса – клиентская сторона и линейная сторона. Клиентские интерфейсы предназначены для подключения к ВОСП оборудования заказчика и используют стандартные интерфейсы подключения, перечисленные в таблице 1. Поток 100G разбивается здесь на 4 или 10 λ , которые передаются по одному или нескольким волокнам, а также с использованием Ribbon-волокон, имеющих несколько сердцевин. Интерфейсы клиентской стороны используют простую амплитудную манипуляцию ООК (on-off keying), чем достигается высокая совместимость оборудования различных производителей. Дальность передачи зависит от типа интерфейса, но в любом случае не превышает 40 км.

Линейные интерфейсы предназначены для передачи сигналов по оптическому волокну на большие расстояния, исчисляемыми сотнями и даже тысячами километров. Именно здесь и используются когерентные оптические приемники. Конкретная техническая спецификация этого интерфейса не сертифицирована и зависит от фирменной реализации системы. Однако можно сказать, что основной способ кодирования сигнала, применяемый всеми основными производителями, – это квадратурно-фазовая модуляция с двойной поляризацией сигнала – DP QPSK (Dual Polarization Quadrature Phase Shift Keying). По сути, в линию транслируются два



Рис. 1 Обобщенная структура ВОСП 100G

Таблица 1

Интерфейс	Расстояние	Среда передачи	Условия передачи	Стандарт
100GBase-LR4	10 км	SMF	4 λ	IEEE 802.3ba
100GBase-ER4	40 км	SMF	4 λ	IEEE 802.3ba
100GBase-SR10	100–125 м	MMF	10 волокон	IEEE 802.3ba
100GBase-CR10	7 м	Медный кабель	10 кабелей	IEEE 802.3ba
10x10 MSA	10–40 км	SMF	10 λ	10x10 MSA Tech. Spec.

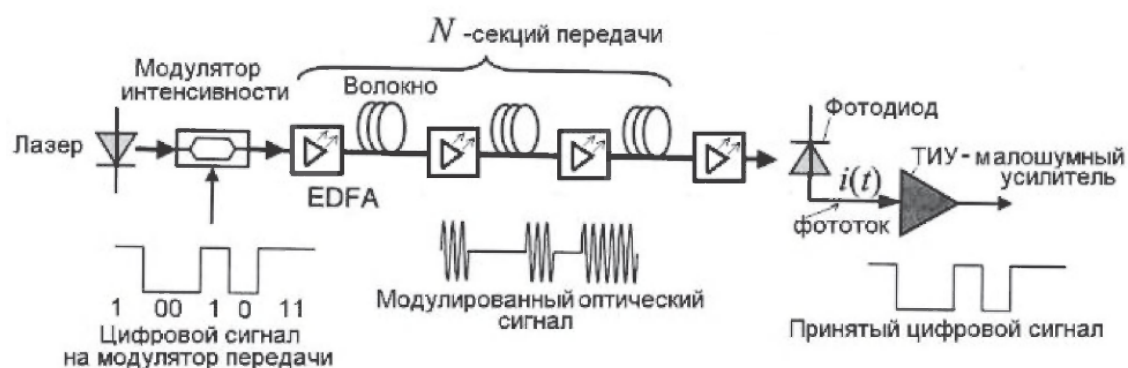


Рис. 2. Структурная схема ВОСП некогерентного типа

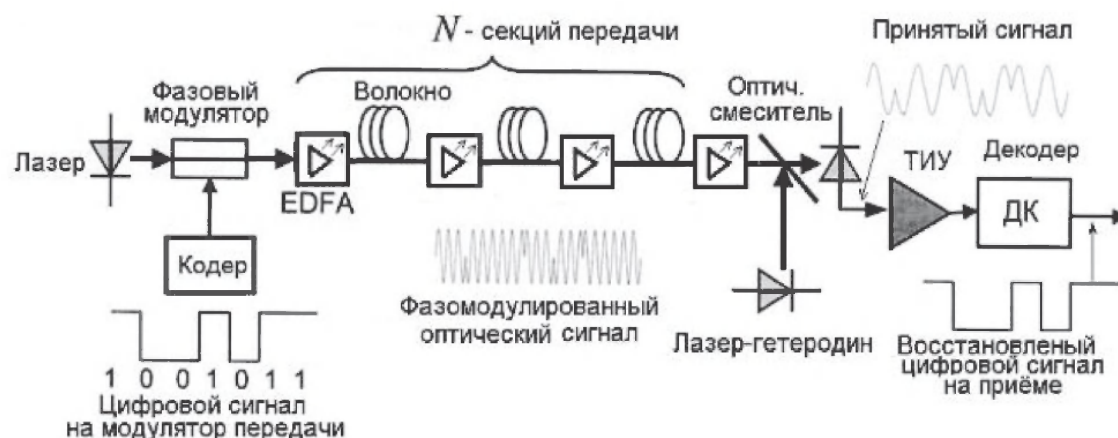


Рис. 3. Структурная схема ВОСП когерентного типа

ортогонально поляризованных оптических сигнала с квадратурно-фазовой модуляцией каждый, что позволяет снизить скорость передачи линейного сигнала в восемь раз, значительно уменьшая негативное влияние дисперсии оптического сигнала и уменьшая требуемую для передачи полосу.

В высокоскоростных ВОСП теоретически возможно использование как некогерентного, так и когерентного принципов передачи. Как правило, некогерентная передача сигналов используется в оптических каналах на скорости до 10 Гбит/с. При этом в излучателе применяется либо прямая, либо внешняя модуляция одномодового лазера и прямое детектирование линейного оптического сигнала на приеме относительно простым фотоприемным устройством (рис. 2). При этом для увеличения дальности передачи оптических сигналов в волоконной линии используются оптические усилители, например эрбиевые (EDFA).

В структуре ВОСП когерентного типа при сохранении аналогичных функций линейного тракта с оптическим усилением принципиальные отличия заключены в структурах передатчика и приемника (рис. 3).

Оптические передатчики когерентных систем обобщенно подразделяются на три вида:

- передатчики с прямой модуляцией оптического излучения (рис. 4а);
- передатчики с простой внешней модуляцией оптического излучения (рис. 4б);
- передатчики с генераторами оптических импульсов (на одной, двух и более модах) и модуляторами этих импульсов отдельно по интенсивности или фазе, комплексной модуляции (рис. 4в).

Схемы передатчиков с прямой модуляцией интенсивности оптического излучения отличаются низким качеством модулированного сигнала, в котором присутствуют искажения формы импульсных оптических посылок – так называемый чирпинг-эффект, т. е. паразитная частотная модуляция излучаемого оптического спектра. Кроме того, таким передатчикам характерны повышенные шумы модулятора и расширенный спектр, приводящий к дисперсионным искажениям при распространении сигнала в волокне. Такая схема чувствительна к температурным отклонениям и нуждается в термостабилизации, например встроенными микрохолодильниками на основе эффекта Пельтье или применения электронной цепи регулировки тока смещения через фильтр нижних частот (ФНЧ). Такие передатчики используются для организации связи на огра-

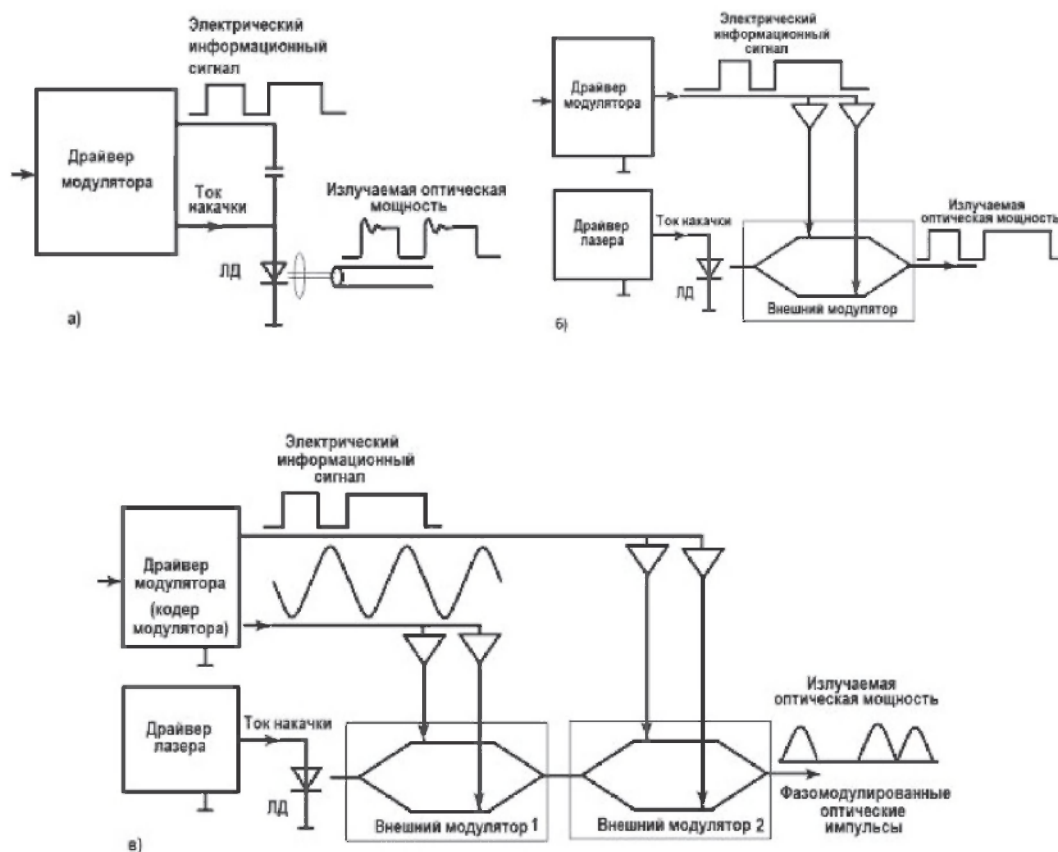


Рис. 4. Обобщенные структуры передатчиков когерентных систем

ниченные расстояния (от нескольких метров до 2 км по международной стандартизации ITU-TG.693) на скоростях до 10–40 Гбит/с и представлены в стандартных модулях SFP, SFP+, XFP, CFP.

Передатчики с внешним по отношению к лазеру модулятором (рис. 4б и 4в) не подвержены чирпинг-эффекту. Они имеют в несколько раз большую полосу частот модуляции и, соответственно, увеличенную (до 100 Гбит/с и более) скорость передачи. При использовании же двойной схемы внешней модуляции (рис. 4в) требуемая полоса частот модулированного сигнала (например, 50 ГГц) не будет изменяться с увеличением скорости передачи информационных данных (например, при переходе от 10 Гбит/с к 100 Гбит/с). Это позволит сохранять сетку частот DWDM, т. е. число организуемых в линейном тракте оптических каналов, общий уровень мощности всех каналов до нелинейного ограничения при увеличении скорости передачи в каждом канале (до 100/400 Гбит/с) почти независимо от длины секции передачи или мультиплексирования (до 10 Тбит/с). Такая структура оптического передатчика дает теоретическую возможность наращивать скорости в канале до 1 Тбит/с, а в пределах полос волокон C, L до 30 Тбит/с, что близко к предельному значению частотного ресурса волокон.

Одним из первых эффективных и широко применяемых решений по построению схем модуляторов для когерентной передачи стал модулятор с четырьмя параллельными оптическими каналами, построенным с двойным разветвлением (рис. 5). Такая схема позволила реализовать квадратурную фазовую модуляцию QPSK (Quadrature Phase Shift Keying).

Для реализации возрастающих по сложности схем модуляторов для когерентных систем используется технология планарных (плоских) оптических каналов, создаваемых на различных подложках PLC (Planar Lightwave Circuits): Silica-on-Silicon PLCs с применением металлов Au, Au/Sn, Cr, NiCr, TiW, Al и Ti/Pt; полимеров Polymer PLCs. В состав схем на

PLC могут входить не только разветвители, параллельные каналы, электроды управления, но и поляризаторы оптического излучения, которые преобразуют пучок света в две ортогональные волны, направляемые в параллельные структуры модулятора PDM QPSK (Polarization-Division Multiplexing Quadrature Phase Shift Keying) или DP QPSK (Dual Polarization Quadrature Phase Shift Keying), где каждая волна модулируется по фазе своим закодированным сигналом QPSK1 и QPSK2.

Такие способы модуляции позволяют сильно ограничить полосу частот оптического сигнала и дают возможность наращивать скорость передачи информационных сигналов на оптической волне λ , не заботясь об изменении интервала между соседними λ или компенсации дисперсионных искажений. Кроме того, выбор кодирования может понизить или вообще исключить из спектра модулированного сигнала оптическую несущую, что значительно уменьшит общую интенсивность всех λ при многоканальной передаче, исключая нелинейные эффекты оптического тракта, поможет улучшить параметры OSNR, увеличивая дальность передачи.

Однако наибольший эффект для увеличения протяженности оптической линии дает именно когерентный прием. Для этого в состав фотоприемника системы передачи вводится дополнительный оптический генератор – гетеродин, что позволяет существенно повысить его чувствительность и тем самым увеличить динамический диапазон линейного тракта.

По принципу регистрации и первичной обработки информации, содержащейся в оптическом сигнале, различают два метода приема оптического излучения: метод прямого фотодетектирования и метод фотосмещения (когерентный прием излучения). Первый метод состоит в измерении фототока или в подсчете числа импульсов на выходе фотодетектора, вызываемых попаданием на него регистрируемого потока фотонов.

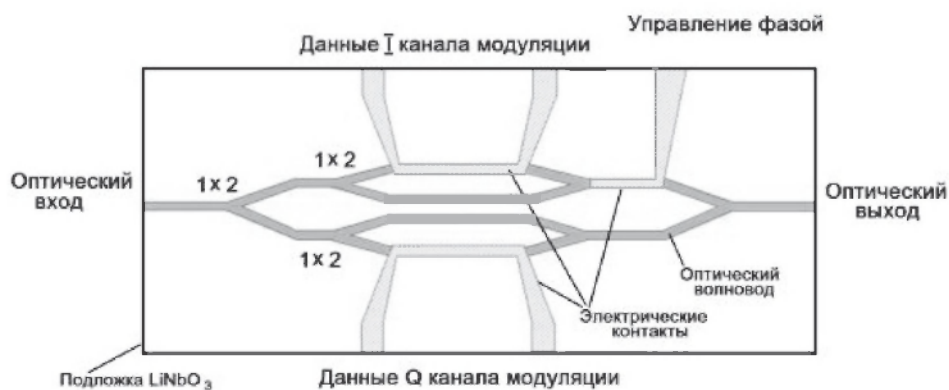


Рис. 5. Логическая структура внешнего модулятора передатчика когерентных систем

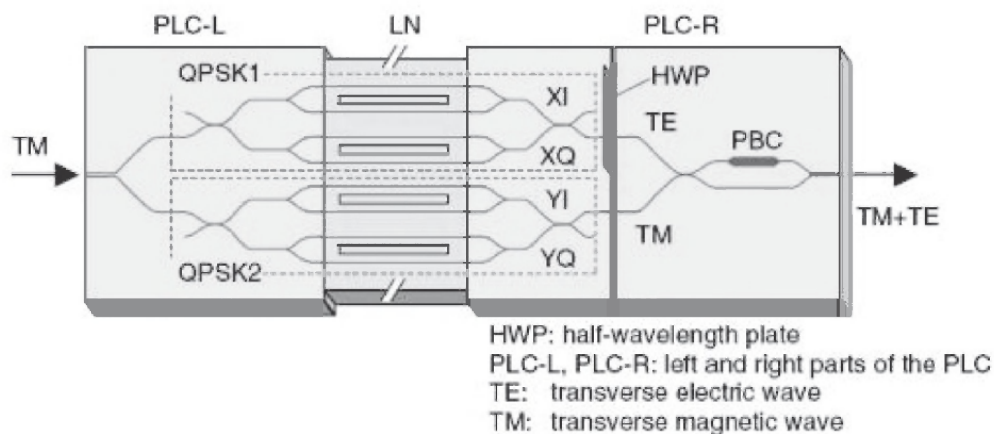


Рис. 6. Модулятор QPSK

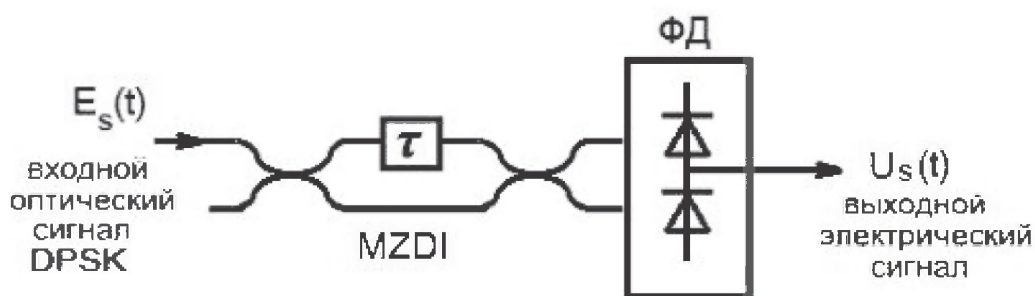


Рис. 7. Приемник оптического сигнала, основанный на методе прямого фотодетектирования

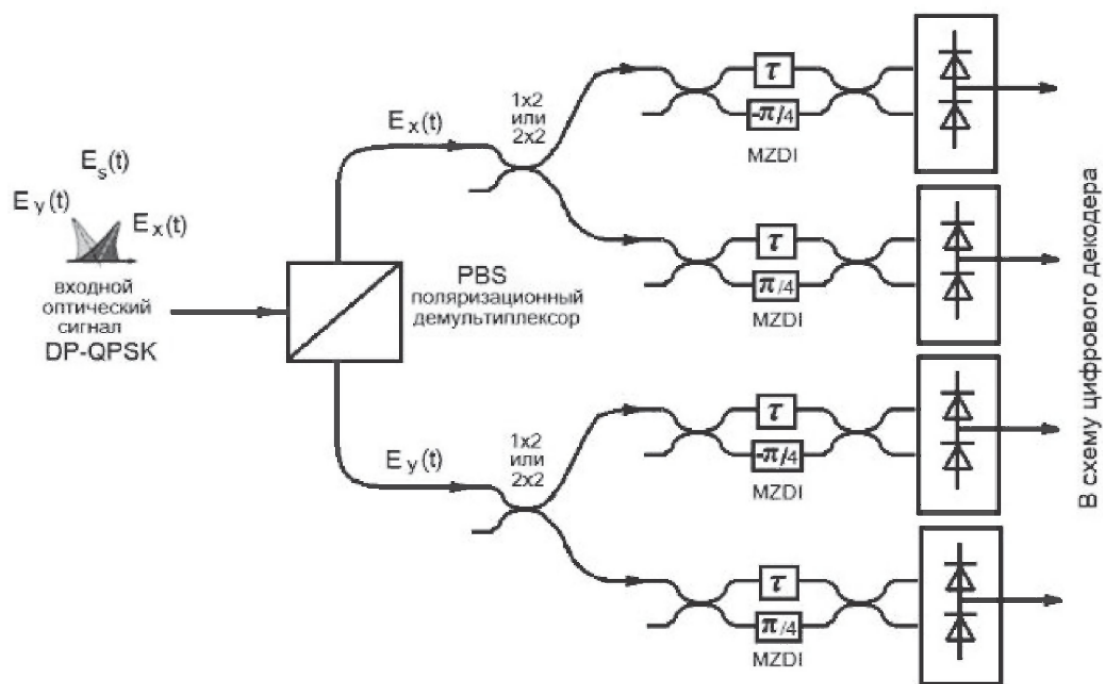


Рис. 8. Структура входной цепи некогерентного приемника оптического сигнала с двойной поляризацией DP (Dual-Polarization)

На рис. 8 представлены структуры входных цепей некогерентных оптических цифровых приемников, поддерживающих прием одной или двух ортогональных по поляризации волн. Во втором случае разделение волн происходит с помощью поляризационных разветвителей (демультиплексоров) PBS (Polarization Beam Splitters). Особенностью всех схем приемников является использование разветвителей 2×2 и интерферометров Маха–Зендера (MZDI) с включением в их параллельных каналах линий оптической задержки импульсов на тактовый интервал, обозначаемый τ , и фазовых задержек с различной кратностью π ($\pi/2$; $\pi/4$; $\pi/8$ и т. д.).

Главная особенность схем когерентных оптических приемников, как уже упоминалось ранее – наличие дополнительного источника оптического излучения (гетеродина) и цепи управления им. Такие приемники могут быть выполнены для различных условий оптического когерентного приема: гетеродинный несинхронный прием, гетеродинный синхронный прием, гомодинный синхронный прием (рис. 9).

Так в чем же смысл использования подобных схем оптических приемников? Понять это помогут следующие выкладки.

Комбинированное (суммарное) оптическое поле сигнала и оптического гетеродина $F(t)$ на единицу поверхности фотодетектора, называемое интенсивностью $I(t)$, имеет вид

$$I(t) = |F(t)|^2 = |a_c(t)|^2 + |a_0|^2 + 2|a_c(t)||a_0|\cos[(\omega_0 - \omega_c)t + \varphi_0 - \varphi_c(t)], \quad (1)$$

где $a_c(t)$ – амплитуда поля сигнальной составляющей, a_0 – амплитуда поля гетеродина, ω_0 – частота гетеродина, ω_c – частота сигнала, φ_0 – фаза гетеродина, $\varphi_c(t)$ – фаза сигнала. В случае разности $|\omega_0 - \omega_c| > 0$ образуется промежуточная частота, например из радиочастотного спектра. Такой прием оптического сигнала получил название «гетеродинный». В случае разности $|\omega_0 - \omega_c| = 0$ остается амплитудная составляющая, которая соответствует информационному сигналу, усиленному на величину амплитудной составляющей гетеродина. Такой прием оптического сигнала получил название «гомодинный». При этом информационное сообщение может быть закодировано в амплитудной составляющей и/или фазовой составляющей оптического излучения.

Опуская постоянный множитель, пропорциональный площади фотодетектора, учитывая соотношение между выходным током фотодетектора $i_\phi(t)$ и мощностью оптического сигнала $P(t)$ (параметр чувствительности $S[A/Bt]$)

$$I = S \times P = (\eta e/hf) \times P \quad (2)$$

выходной ток фотодетектора с учетом коэффициента умножения G (для лавинного фотодиода) можно представить в виде

$$i_\phi(t) = G \times S \{P_c + P_0 + 2(P_c \times P_0)^{0.5} \cos[(\omega_0 - \omega_c)t + \varphi_0 - \varphi_c(t)]\} \quad (3)$$

В соотношениях 2 и 3 приведены обозначения: η – квантовая эффективность фотодетектора; e – заряд

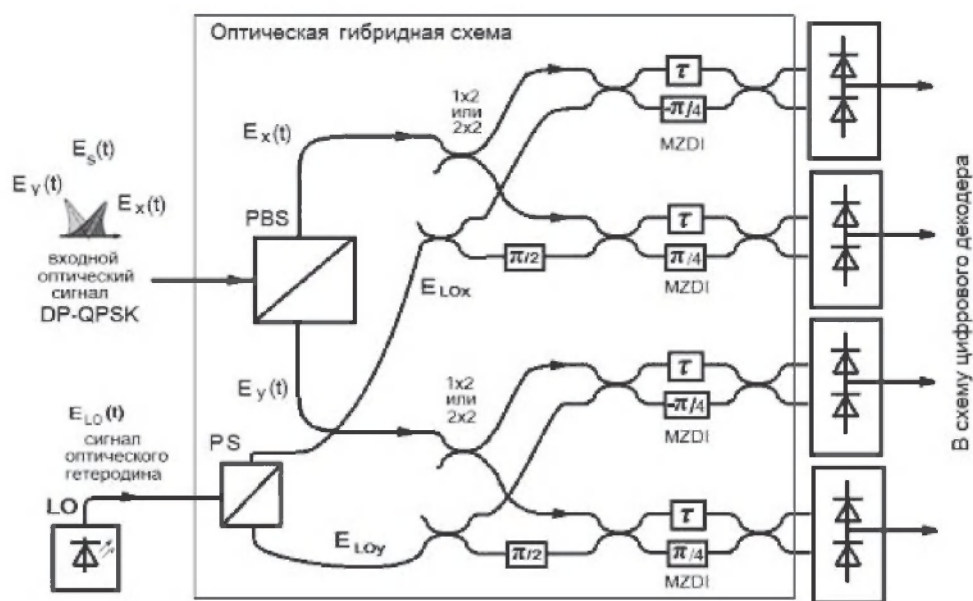


Рис. 9. Структура входной цепи простого когерентного приемника оптического сигнала и схема ее реализации в интегральной сборке

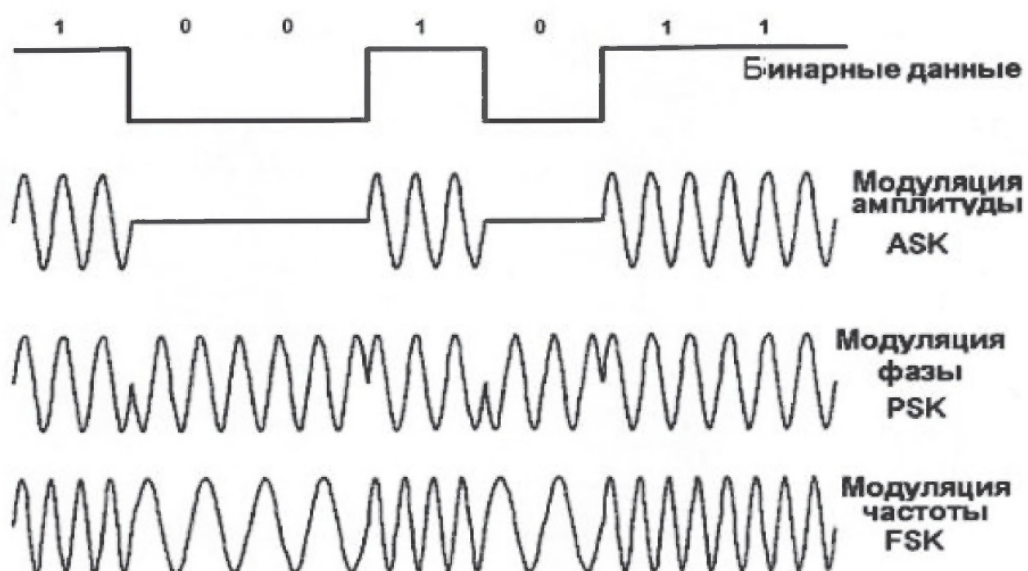


Рис. 10. Примеры форматов оптической модуляции

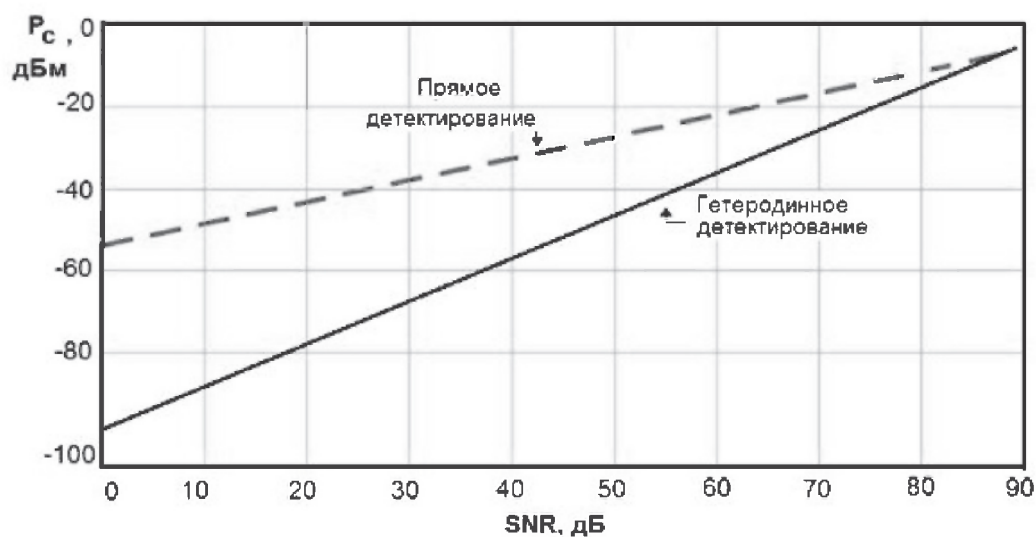


Рис. 11. Оценка выигрыша когерентного приема в оптической системе при заданных значениях отношения сигнал/шум (SNR)

электрона; h – постоянная Планка; f – линейная оптическая частота; P_c – мощность информационного сигнала; P_0 – мощность гетеродинного излучения.

Если использовать гетеродинный прием ($|\omega_0 - \omega_c| > 0$), тогда на выходе фотоприемного устройства устанавливается полосовой фильтр, настроенный на промежуточную частоту, и имеющий полосу пропускания для информационного сигнала. В этом случае мгновенное значение тока промежуточной частоты (переменная составляющая, т. к. постоянные составляющие отсекаются фильтром) будет равно

$$I_{\text{пч}}(t) = A \cos[2\pi f_{\text{пч}} t + \varphi_0 - \varphi_c(t)] \quad (4)$$

где

$$A = 2G \times S(P_c \times P_0)^{0.5} \quad (5)$$

т. о. сигнальный ток ПЧ зависит от амплитуды, частоты и фазы несущей. Поэтому если любой из этих параметров модулируется информационным сигналом, то для демодуляции сигнала может быть использован любой хорошо известный метод радиоприема.

Если использовать гомодинный прием, то потребуется настроить частоты излучателей для выполнения равенства ($|\omega_0 - \omega_c| = 0$) и синхронизировать фазы.

Демодулированный сигнал в этом случае будет иметь на выходе фотоприемного устройства спектр, который сдвинут в область низких частот (область информационного сигнала).

Фототок на выходе фотодетектора определяется выражением

$$i_{\text{ф}}(t) = G \times S\{P_c + P_0 + 2(P_c \times P_0)^{0.5} \cos[\varphi_0 - \varphi_c(t)]\} \quad (6)$$

Если пренебречь постоянной составляющей, то на выходе фильтра низких частот будет получен сигнальный ток

$$i_{\text{с}}(t) = 2G \times S(P_c \times P_0)^{0.5} \cos[\varphi_0 - \varphi_c(t)] = A \cos[\varphi_0 - \varphi_c(t)] \quad (7)$$

Таким образом, при гомодинном приеме можно модулировать амплитудную составляющую, например, импульсной двоичной последовательностью со случайно чередующимися «1» и «0» ASK (Amplitude Shift Keying) при условии $\varphi_0 = \varphi_c$ и также фазовую составляющую φ_c (π , $\pi/2$, $\pi/4$ и т. д.), например, той же двоичной последовательностью PSK (Phase Shift Keying) при $\varphi_c = 0$ или ее фиксированном значении. Также возможна комплексная амплитудно-фазовая модуляция. При гетеродинном приеме также возможна частотная модуляция импульсными посылками FSK (Frequency Shift Keying) (рис. 10).

При когерентном приеме выигрыш перед прямым детектированием заключается в множителе P_0 , который позволяет в много раз увеличить величину фототока, т. е. повысить энергетический потенциал системы (рис. 11).

Как видно из рисунка, числовая оценка выигрыша от применения когерентного приема базируется на соотношении сигнала к помехам SNR (Signal Noise Ratio).

Гомодинный способ реализации когерентного приема имеет более высокую чувствительность, но требует жесткую частотную, фазовую и поляризационную стабилизацию квантовых генераторов, а это вполне реализуемо в настоящее время благодаря созданию новой оптической элементной базы. Не следует забывать также, что именно гомодинный прием позволяет реализовать не только амплитудную модуляцию оптического излучения, но и фазовые методы многопозиционной модуляции оптических сигналов (DPSK, QPSK, 8PSK, 16PSK), поэтому у таких систем большое будущее.

Литература

1. Беккер Д., Мохр Д., Ри Кристоф Т., Джоши А. «Когерентный оптический приемник с управлением посредством обратной связи и с электронной компенсацией», патент 2008140162/09, 01.03.2007, Дискавери Семикондакторс, Инк. (US)
2. Величко, М. А. Новые форматы модуляции в оптических системах связи / М.А. Величко, О.Е. Наний, А.А. Сусьян // LIGHTWAVE Russian Edition. – 2005. – № 4. – С. 21–36.
3. Карих, Е. Д. Оптоэлектроника: конспект лекций / Е.Д. Карих. – Минск: БГУ, 2002. – 107 с.
4. Фокин, В. Г. Когерентные оптические сети: учебное пособие / В.Г. Фокин. – Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики; кафедра многоканальной электросвязи и оптических систем, 2015. – 372 с.
5. Макаров, Т. В. Когерентные волоконно-оптические системы передачи: Учебник / Т.В. Макаров. – Одесса: ОНАС им. А.С. Попова, 2009. – 220 с.
6. Листвин, В. Н. DWDM системы: научное издание / В.Н. Листвин, В.Н. Трещиков. – М.: Наука, 2013. – 267 с.