

Детектирование КОМПЛЕКСНО МОДУЛИРОВАННЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Стефани МИЧЕЛ (Stephanie MICHEL)

В системах с амплитудной модуляцией (ООК, on/off keying) мы можем детектировать сигнал с помощью фотодиода, который преобразует оптическую мощность в электрический ток I_{photo} . Возникающий в фотодиоде фототок I_{photo} прямо пропорционален произведению величины оптического сигнала S на комплексно-сопряженное с ним значение S^* . Из уравнения на рис. 1 следует, что результат содержит только амплитуду A_S . Ток I_{photo} не несет никакой информации о круговой частоте ω_S и фазе Φ_S . Таким образом, показанный справа сигнал с квадратурной фазовой манипуляцией (QPSK) во временной области нельзя однозначно сопоставить с показанной слева диаграммой IQ. Можно лишь сказать, что нижняя, пересекающая нуль кривая представляет диагональные переходы между четырьмя точками созвездия, а средняя кривая — внешние переходы. Плоский сигнал через фотодиод соответствует случаям, когда фаза не меняется, то есть когда за символом следует такой же символ.

Для однозначного определения переходов между символами нужно использовать более сложные методы, обеспечивающие полное детектирование всех электрических характеристик сигнала, включая информацию о фазе.

Дополнительно усложняет проблему тот факт, что в современных оптических коммуникационных системах используются длины волн, близкие к инфракрасному диапазону, например 1550 нм, что соответствует частоте около 200 ТГц. Таким образом, скорость изменения электрического поля во времени и пространстве на несколько порядков выше скорости работы имеющихся электронных устройств, работающих в мега- и гигагерцевом диапазоне.

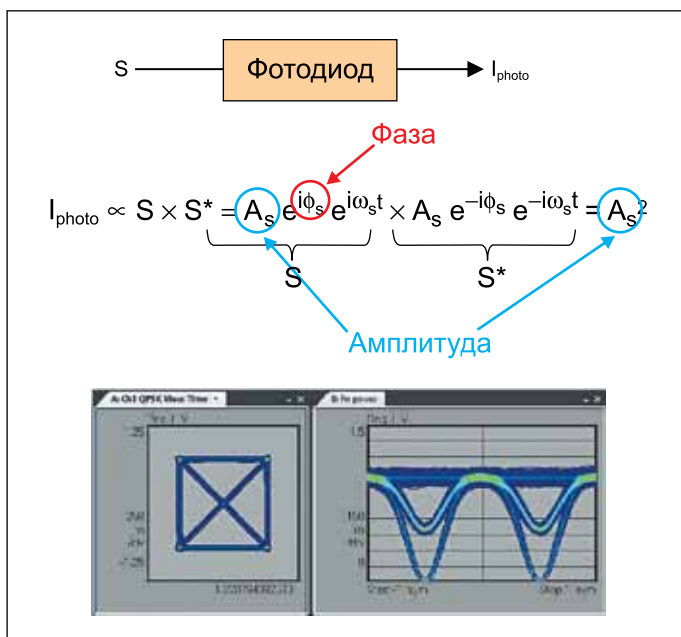


Рис. 1. При непосредственном детектировании фототок I_{photo} содержит информацию только об амплитуде оптического сигнала

На помощь приходит гетеродин

Ключом к решению этой проблемы является измерение не абсолютной фазы, а фазы по отношению к известному опорному сигналу. Базовая схема такого детектора показана на рис. 2. «Идеальный»

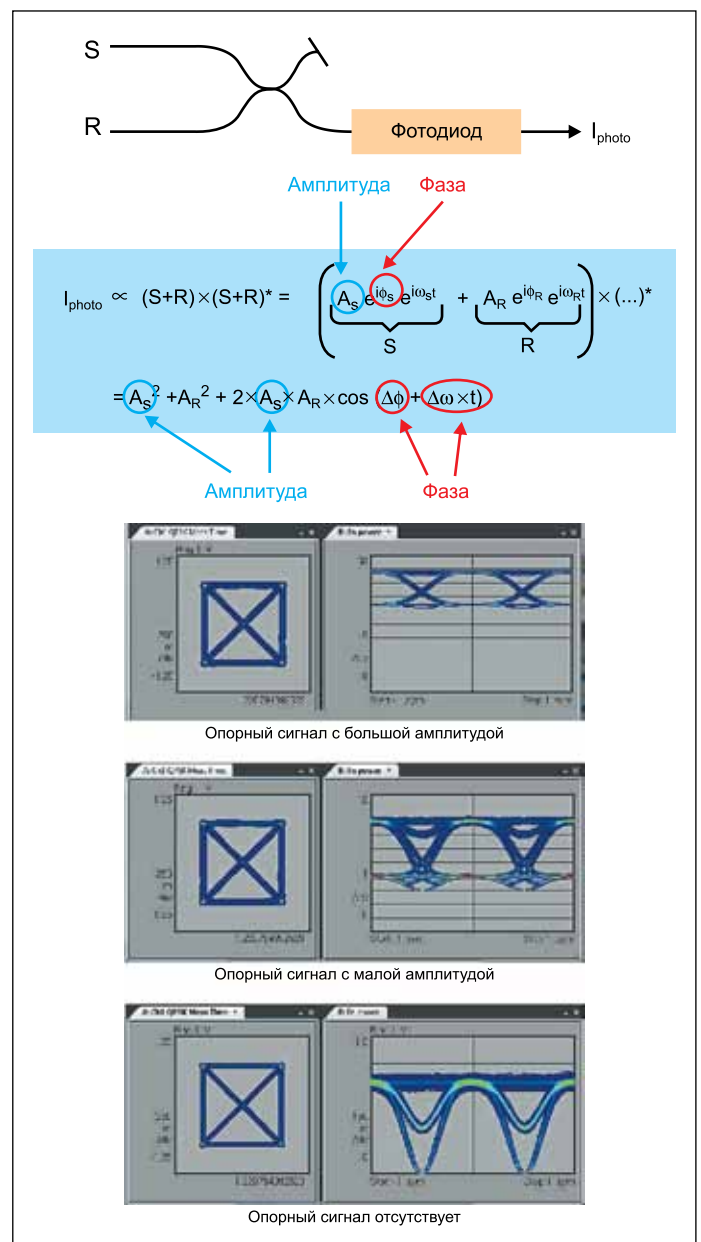


Рис. 2. Смещение полезного сигнала S с опорным сигналом R позволяет измерять разность фаз; на диаграммах показан сигнал с QPSK, смешанный с разными опорными сигналами

монохроматический лазер, создающий опорный сигнал R , часто называют гетеродином.

Полезный сигнал S и опорный сигнал R подаются на оптический сумматор и детектируются фотодиодом. В результате ток I_{photo} будет пропорционален произведению суммы двух сигналов $(R+S)$ и комплексно-сопряженной с ней величины $(R+S)^*$. Уравнение на рис. 2 показывает, что результат содержит разность фаз $\Delta\Phi = \Phi_S - \Phi_R$ и разность частот $\Delta\omega = \omega_S - \omega_R$. Из значения $\Delta\Phi$ мы можем получить зависимость Φ_S от времени.

Опорную частоту ω_R выбирают близкой к частоте ω_S , в результате $\Delta\omega$ теперь получается достаточно малой для электронной обработки.

Фазозависимый член формулы называется гетеродинной составляющей, или биением, поскольку получается в результате наложения, или биения, двух сигналов с близкими круговыми частотами.

Также в формуле имеется член, содержащий квадрат амплитуды, который не оказывает влияния на результат, если модулируется только фаза, а амплитуда остается неизменной, что и происходит в модуляции QPSK.

В нижней части рис. 2 показан случай без опорного сигнала с единственной составляющей A_S^2 .

Если добавляется опорный сигнал, уровень которого велик по сравнению с полезным сигналом, то биения смещаются вверх на величину A_R^2 . Было бы полезно получить только сами биения без такого смещения.

Подавление фазонезависимой составляющей с помощью балансного приемника

Как показано на рис. 3, мы можем подавить все другие фазонезависимые составляющие с помощью балансного приемника. В этом случае детектируемый сигнал S и опорный сигнал R суммируются в одной ветви и вычитаются в другой ветви оптического сумматора 2×2 (в качестве которого может использоваться сумматор волоконно-оптической или атмосферной оптической линии). Каждый из результирующих сигналов детектируется своим фотодиодом. В итоге получается разность между двумя фототоками. Из уравнения, приведенного на рис. 3, видно, что все другие составляющие подавляются и остаются только биения.

Дополнительным преимуществом балансного детектирования является удвоение результирующего фототока.

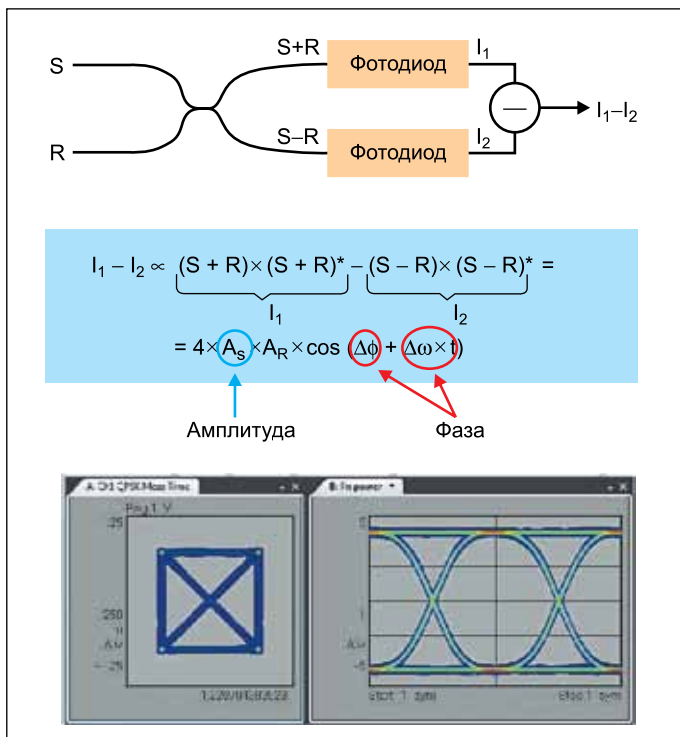


Рис. 3. При использовании балансного приемника остаются только биения с удвоенной амплитудой

Переход к концепции IQ: использование IQ-демодулятора

Для того чтобы восстановить информацию о фазе и амплитуде, когерентный приемник должен выдавать на двух отдельных выходах синфазную (I) и квадратурную (Q) составляющие. Для этого нам понадобится второй балансный детектор. Один гетеродин дает опорный сигнал для двух детекторов, но для получения составляющей Q нужно сдвинуть фазу на $\pi/2$. На рис. 4 показана схема детектирования сигнала QPSK, которая называется IQ-демодулятором.

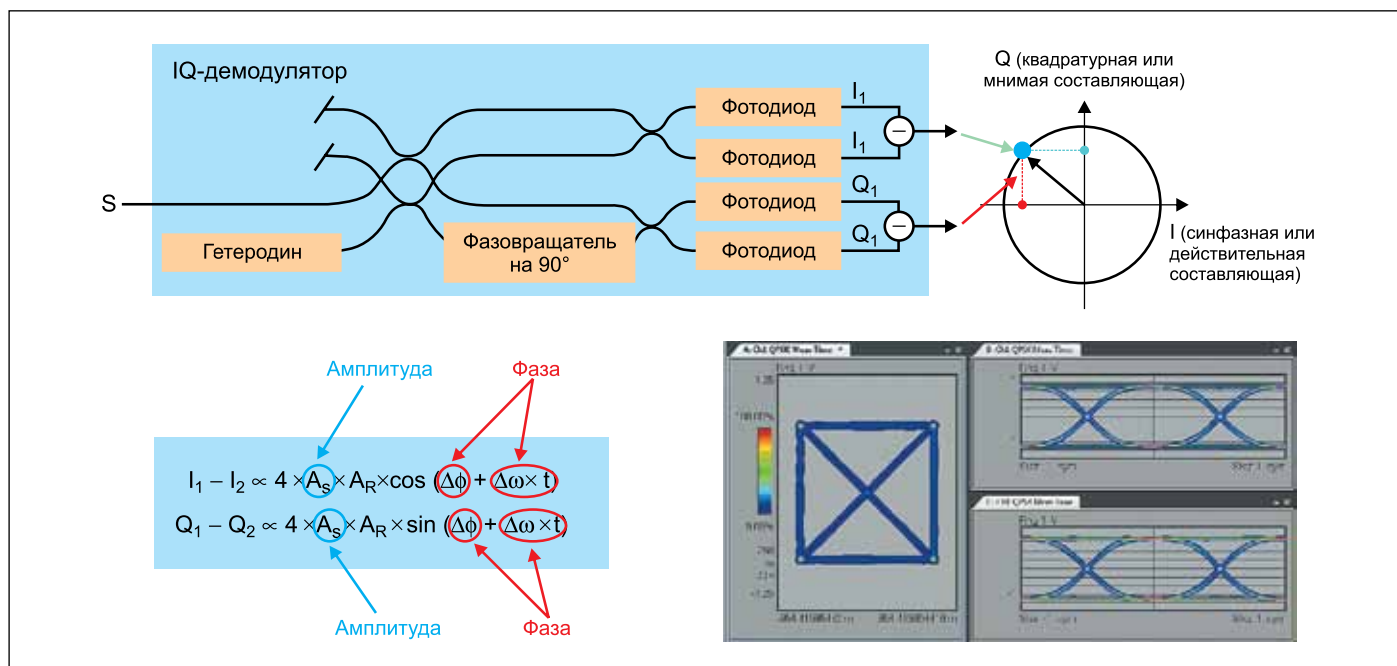


Рис. 4. IQ-демодулятор выполняет два независимых измерения, которые дают информацию о фазе и амплитуде

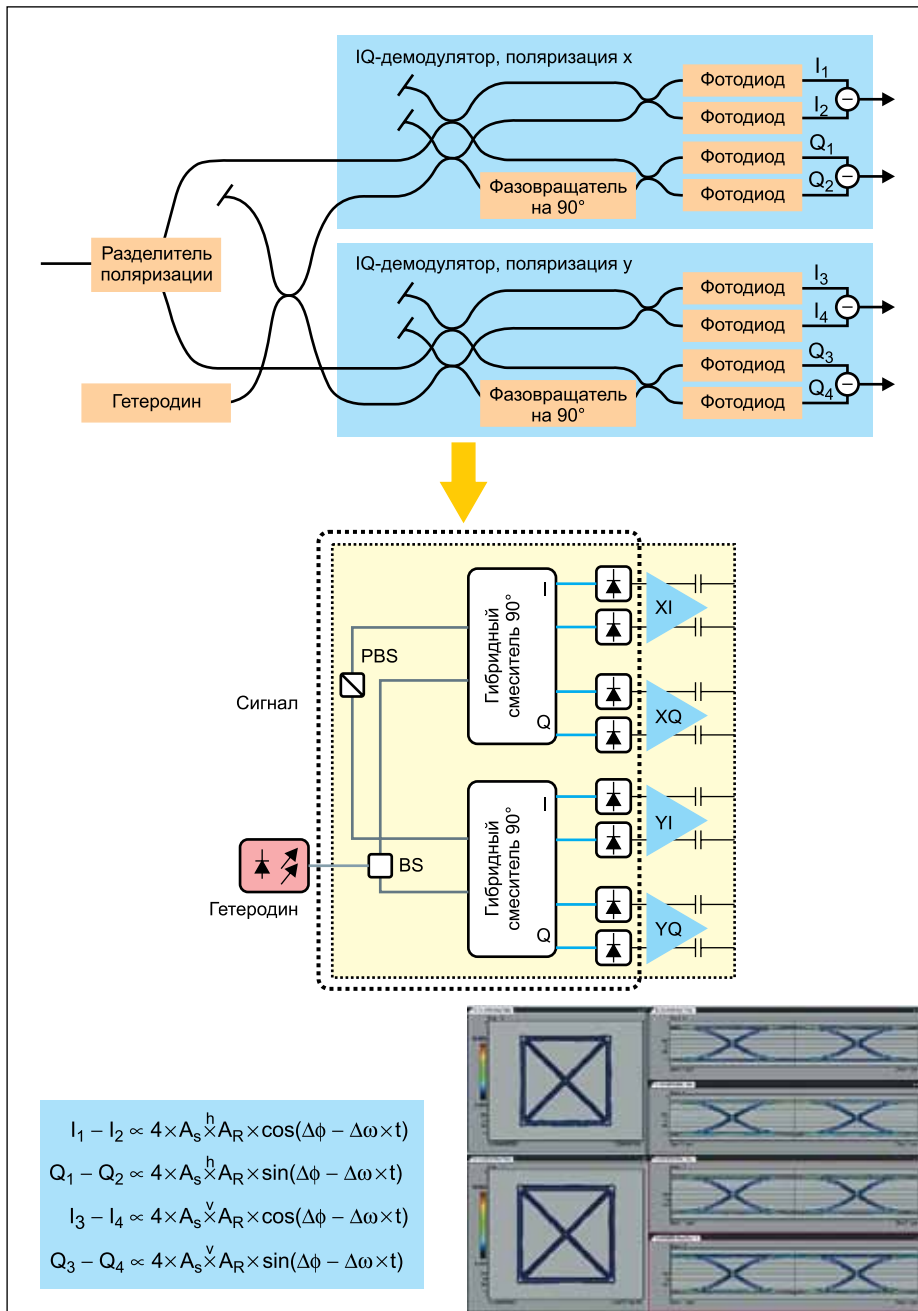


Рис. 5. IQ-демулятор для разделения поляризации

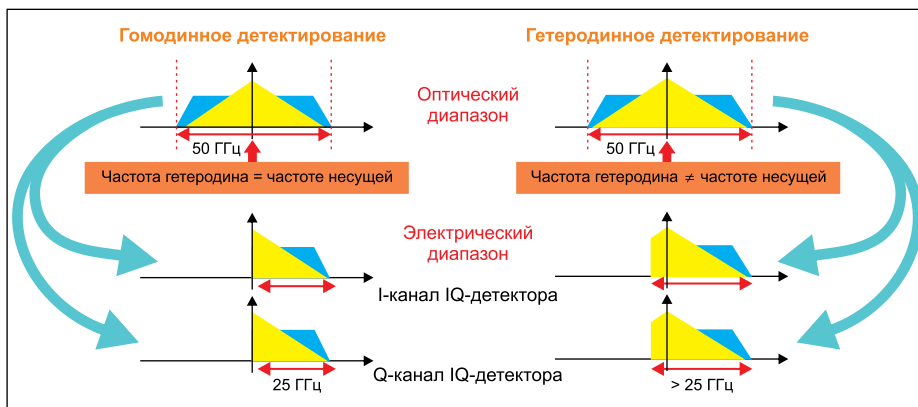


Рис. 6. Требуемая для когерентного детектирования полоса электрического сигнала зависит от разности частот сигнала и опорной частоты

Эта схема работает только для когерентных сигналов, не подвергшихся поляризационному разделению. Кроме того, сигнал смешивается только с составляющей сигнала гетеродина с тем же состоянием поляризации в детекторе.

Расширение концепции IQ на двойную поляризацию

Для случая двойной поляризации концепцию нужно доработать. Основной физический принцип остается тем же: после разделителя поляризации сигнал поступает на два IQ-демулятора — один для горизонтальной поляризации *x* и другой для вертикальной поляризации *y*. Опорные сигналы для всех ветвей поступают из одного гетеродина.

Блок-схема такого демодулятора приведена на рис. 5. Как видите, в этом случае для получения координат *I* и *Q* используются четыре выходных сигнала, по одному на каждое направление поляризации. Применяемые в уравнении верхние индексы *h* и *v* обозначают горизонтальную и вертикальную составляющие поляризации сигнала по отношению к поляризации опорного сигнала приемника. Такая архитектура с разделением поляризации гарантирует смешение всех сигналов с сигналом гетеродина независимо от поляризации на входе. Поэтому данная схема используется очень широко, и даже для сигналов, не имеющих двойной поляризации.

До сих пор мы рассматривали приемники с частотой гетеродина ω_R , отличной от частоты сигнала ω_S . Такие приемники называются гетеродинными.

В гомодинных приемниках гетеродин имеет ту же частоту, что и несущий сигнал. Преимущество: упомянутые выше составляющие больше не зависят от частоты.

На рис. 6 показана необходимая полоса электрического сигнала для гомодинного и гетеродинного приемников. Для гомодинного детектирования, когда частота гетеродина равна частоте сигнала, нужна полоса, равная половине оптической полосы сигнала. Для гетеродинного приемника необходимая полоса электрического сигнала растет с ростом разности частот гетеродина и сигнала.

Использование в качестве опорного сигнала его копии с задержкой: интерферометры с линией задержки

После всего рассмотренного нами можно подумать, что для восстановления фазовой информации без гетеродина не обойтись. А как насчет суммирования сигнала с его собственной копией? В этом случае мы тоже получаем опорный сигнал, для которого $\omega_R = \omega_S$.

Кому-то такой подход покажется не очень обещающим, поскольку не совсем ясно, как он позволяет получить дополнительную информацию о фазе. Тем не менее такой «само-

гомодинный» подход весьма полезен, ведь нас интересует лишь изменение фазы во времени. Так что если разделить сигнал на две части и сложить его с собственной «задержанной» копией, можно получить информацию об изменении фазы.

Преимуществом такого метода является отсутствие погрешности, связанной с медленными (по сравнению с символьной скоростью) флуктуациями внешнего гетеродина и самой несущей.

Такой приемник принято называть интерферометром с линией задержки. На рис. 7 показан балансный интерферометр с линией задержки с сигналами $S(t)$ и $S(t+T)$, задержанным на время T .

Приведенное здесь уравнение демонстрирует зависимость результата от косинуса разности фаз между исходным сигналом и его задержанной копией. В связи с периодичностью этой функции однозначно удастся идентифицировать только сдвиг фаз в диапазоне от 0 до π и только для задержек T , примерно кратных периоду несущей $2\pi/\omega_s$. Этого достаточно для двоичной фазовой манипуляции (BPSK), но для восстановления фазы сигнала квадратурной фазовой манипуляции (QPSK) и схем модуляции более высоких порядков нужно добавить еще один интерферометр, сдвинутый по фазе на $\pi/2$ по отношению к первому интерферометру, что позволяет охватить весь диапазон фаз от 0 до 2π .

На рис. 8 показана схема с дополнительным интерферометром для приема двух независимых составляющих I и Q . Дополнительно измеряется Q_1-Q_2 , тогда как разность I_1-I_2 остается неизменной.

Подобно гетеродинному приемнику, интерферометр с линией задержки можно расширить для детектирования сигналов, чувствительных к поляризации.

Используя интерферометр с линией задержки, мы обходимся без внешнего гетеродина и, следовательно, избавляемся от связанного с ним фазового шума; кроме того, такая схема требует меньшей обработки сигнала. Тем не менее этот подход обладает недостатками, которые все-таки могут склонить нас к применению гетеродинного приемника.

Во-первых, для измерения изменений фазы по времени с помощью интерферометра с линией задержки без восстановления тактовой частоты (CDR) задержка и период выборки должны быть значительно меньше периода следования символов. Но сегодня символьные скорости достигли уровня, при котором это условие соблюдать нелегко. Кроме того, для сигналов с малой амплитудой чувствительность измерений снижается, поскольку опорный сигнал тоже должен быть низкоуровневым, что является причиной сильной зависимости от шума в канале передачи. Для реализации стробоско-

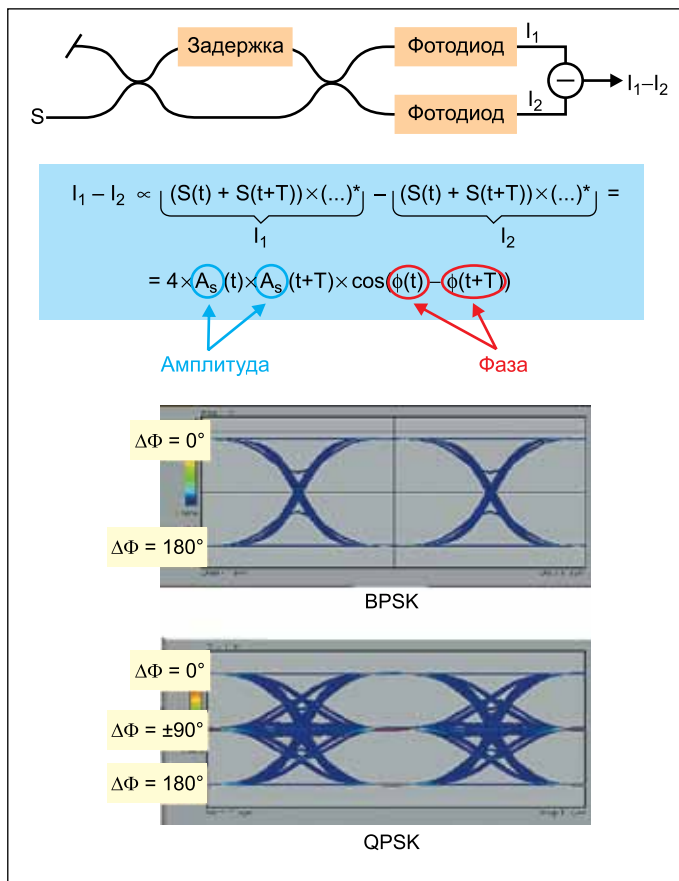


Рис. 7. Балансный интерферометр с линией задержки

пического метода измерения приходится увеличивать время измерения, и к тому же необходим запуск. Таким образом, гомодинный приемник оказывается не слишком гибким.

Пока мы рассматривали исключительно методы детектирования во временной области. В качестве альтернативы можно детектировать частотный спектр и с помощью обратного преобразования Фурье получать из него сигнал во временной области.

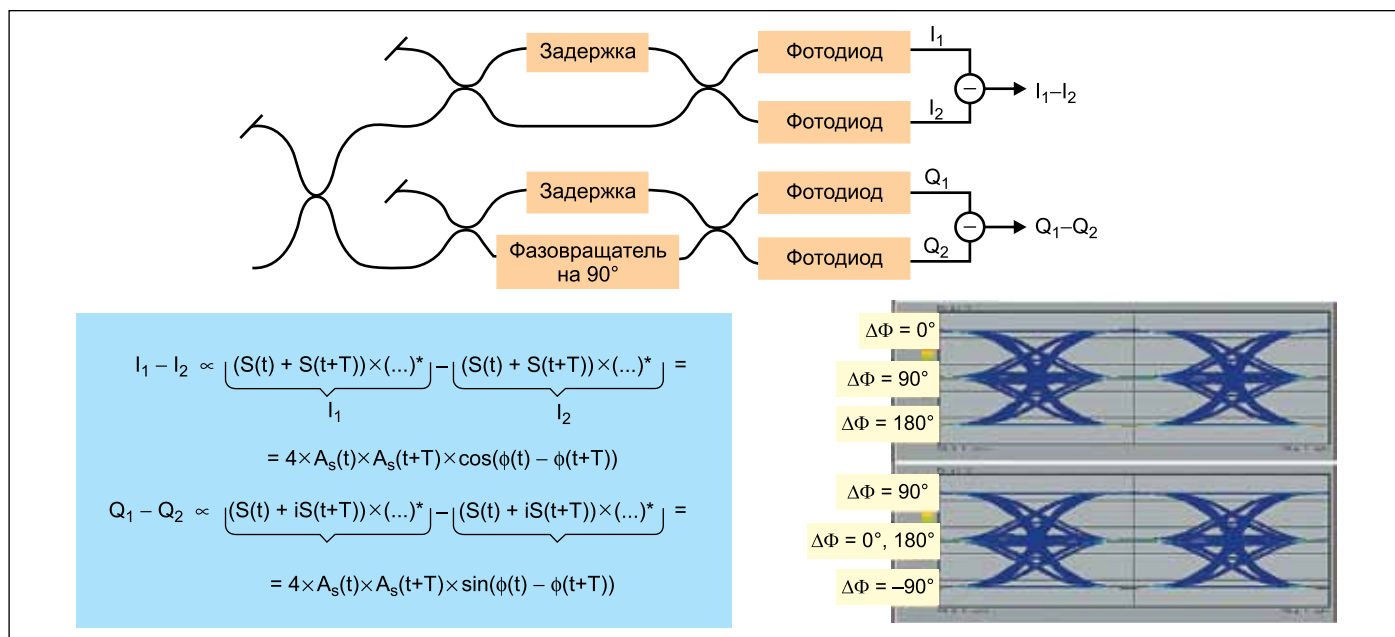


Рис. 8. Расширенный интерферометр с линией задержки для QPSK и видов модуляции более высокого порядка

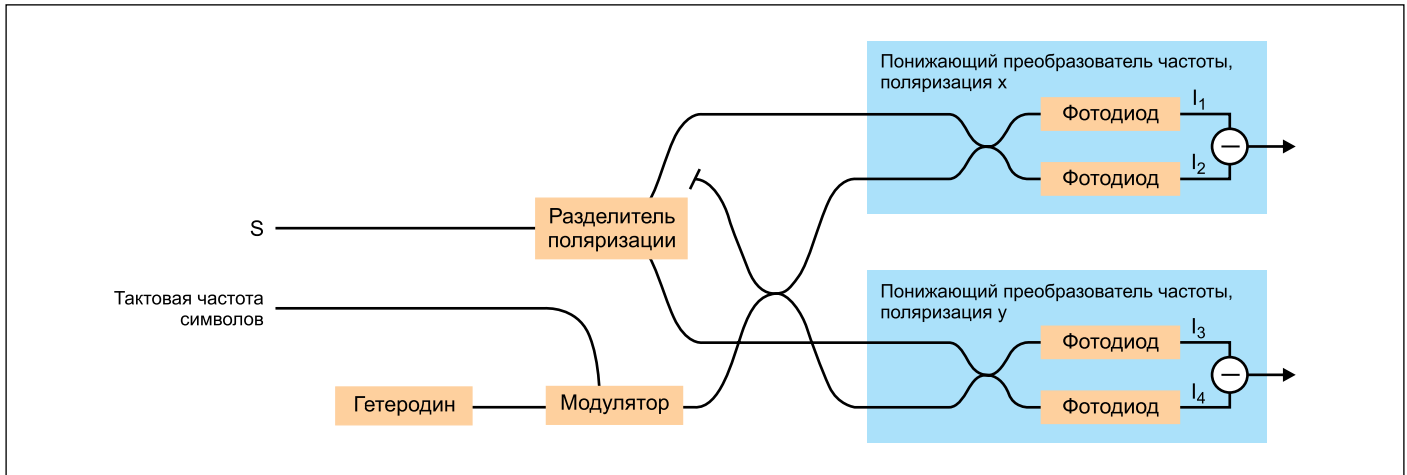


Рис. 9. Схема когерентного частотного детектирования с разделением по поляризации

Детектирование в частотной области

Для восстановления комплексно модулированного оптического сигнала из его спектра необходимо получить информацию о его фазе и амплитуде.

Это можно сделать с помощью сложного анализатора спектра, который разделяет частотные составляющие оптического сигнала с помощью дисперсионного элемента. Все частотные диапазоны можно детектировать одновременно несколькими детекторами или поочередно посредством сканирующего узкополосного оптического фильтра и одного детектора.

Для восстановления фазы и амплитуды мы снова применяем гетеродин в качестве источника опорного сигнала. Для восстановления обеих составляющих нам понадобится источник, излучающий две оптические частоты.

На рис. 9 показана схема, необходимая для измерения сложного спектра с разделением по поляризации.

Ключевым достоинством метода детектирования в частотной области является его практически неограниченная полоса анализа, что означает и неограниченное разрешение во времени. Полоса зависит от диапазона

сви́пирования гетеродина; в результате современные внешние перестраиваемые резонаторные лазеры позволяют использовать полосы терагерцевого диапазона. Другое важное преимущество — возможность обойтись без высокоскоростного приемника.

Однако у этого метода есть и существенные недостатки.

Например, он применим только к периодическим сигналам, поскольку они дают необходимые дискретные спектральные пики. Кроме того, в этом случае нужен источник тактовой частоты символов или последовательности. Точность восстановленного сигнала во временной области непосредственно зависит от спектрального разрешения, определяющего число боковых полос, которые можно разделить. Спектральное разрешение, которое можно достичь с помощью современных технологий, ограничивает длину последовательности несколькими десятками символов.

Перечисленные факторы и то, что этот метод не дает результатов в реальном времени, делают детектирование в частотной области неприменимым для приемников коммуникационных сетей. Фактически нам придется столкнуться с большим временем измерения, очень сложными измерительными схемами и методами обработки сигнала.

И наконец, в частотном детектировании все неперiodические эффекты усредняются. Это справедливо и для поляризационно-модовой дисперсии (PMD), и, следовательно, данный эффект нельзя компенсировать.

Так что же выбрать?

«Самогомодинные» схемы не требуют сложной обработки сигнала и менее чувствительны к фазовому шуму. Но в то же время они не очень гибки, работают только вблизи заданной символьной скорости и менее чувствительны по сравнению с гетеродинными схемами.

Методы гетеродинного детектирования во временной области предлагают максимальную гибкость. В отличие от детектирования в частотной области, их можно использовать для детектирования в реальном масштабе времени. Следовательно, они более пригодны для «живых» сигналов в сетях передачи данных. Дискретизация в эквивалентном масштабе времени (стробоскопический метод) работает только для периодически повторяющихся сигналов ограниченной длины.

Дискретизация в реальном масштабе времени позволяет полностью восстановить сигнал во всех областях без ограничений по формату модуляции. В методах гетеродинного детектирования во временной области отсутствуют также и ограничения на длину сигнала. В ходе обработки сигнала можно компенсировать поляризационно-модовую (PMD) и хроматическую дисперсию (CD). В этом случае пропускная способность ограничивается только обработкой сигнала.

В то же время нужно помнить, что этот метод требует применения быстрого четырехканального оборудования, такого как высокопроизводительный дигитайзер реального времени с очень малыми уровнями джиттера и шума и высоким эффективным числом разрядов (ENOB) во всем частотном диапазоне. ■