

Когерентные оптические приемники: исчерпывающий ответ

Стефани МИЧЕЛ (Stephanie MICHEL)

Извлечь сигнал из когерентного потока не так уж просто. К счастью, появилась технология, решающая эту проблему.

Наиболее гибкое детектирование обеспечивают действующие во временной области гетеродинные приемники, которые применяются к испытательным и реальным сигналам и работают независимо от вида модуляции.

На рис. 1 такой IQ-детектор показан слева. Кроме того, здесь видно, что перед идентификацией и дальнейшей обработкой сгруппированные в символы входные биты должны пройти несколько этапов преобразования. Представленная архитектура приемника рекомендована Optical Internetworking Forum (OIF) и позволяет извлекать всю содержащуюся в сигнале информацию. Давайте рассмотрим эту архитектуру подробнее.

Уменьшение искажений

После аналого-цифрового преобразования любой когерентный оптический приемник выполняет цифровую обработку сигнала. Применение такой обработки вносит существенные положительные отличия по сравнению с обычной амплитудной манипуляцией (on-off keying), где нужно учитывать хроматическую дисперсию (CD), поляризационную модовую дисперсию (PMD) и другие искажения. Цифровая обработка сигнала поддерживает алгоритмическую компенсацию CD, PMD и других искажений, поскольку когерентное детектирование предоставляет полную информацию об оптическом сигнале. Это значит, что комплексная оптическая

модуляция избавляет нас от необходимости использовать компенсаторы PMD или оптоволокно с компенсированием дисперсии, а также предотвращает рост задержки, порождаемой указанными компонентами.

Предварительная коррекция устраняет искажения приемника, к которым следует отнести разбаланс четырех электрических каналов, погрешность фазового угла IQ в IQ-смесителе, временной сдвиг между четырьмя каналами АЦП и дифференциальный разбаланс номинально сбалансированного приемника. Для устранения этих искажений во время калибровки прибора выполняется измерение параметров компонента во всем диапазоне длин волн.

Помимо искажений, вносимых приемником, цифровая обработка сигнала компенсирует искажения, возникающие в оптическом тракте между приемником и передатчиком. К ним относятся CD и PMD, зависящие от поляризации потери (PDL), вращение поляризации или трансформация состояния поляризации (PST) и фазовый шум.

Для оценки влияния фазового шума нужно отследить изменение шума несущей во времени. Однако этот этап в схеме когерентного приемника не обязателен.

Восстановление фазы несущей

Добавив гетеродин, мы получаем возможность отслеживать изменения фазы сигнала по отношению к фазе гетеродинного сигнала. Но тот факт, что частота гетеродина приемника отличается от частоты сигнала, приводит к линейному сдвигу фазы во времени. Это легко понять, если вспомнить, что в гетеродинном приемнике ток I_{photo} пропорционален $\cos(\Delta\phi + \Delta\omega t)$. На рис. 2 показано это «вращающееся» созвездие на примере модуляции QPSK.

Для устранения неопределенности фаза не должна изменяться быстрее, чем на $\pi/4$ за длительность одного символа, что равно половине разности фаз между двумя соседними символами. Это, в свою очередь, означает, что сдвиг частоты между гетеродином и сигналом должен быть для QPSK меньше $1/8$ тактовой частоты символов.

Для того чтобы отследить фазу, нужно делать выборки сигнала в моменты времени с предсказуемыми значениями фазы, например в моменты появления символов. Для сигналов с ограниченной полосой частота дискретизации фазы меньше символьной скорости. Красная линия на рис. 3 показывает, что фаза может быть восстановлена неточно.

В такой ситуации фазовый шум и смещение несущей должны удовлетворять жестким требованиям, чтобы восстановить фазу. В существующей системе связи это условие обычно не соблюдается, поскольку в реальных линейных картах, использующих дискретизацию в масштабе реального времени, столь жесткие характеристики не требуются.

На рис. 4 видно влияние полосы несущей на восстановление фазы лазера с распределенной обратной связью (РОС). Слева приведен пример широкой полосы обзора. Точки сигнального созвездия IQ искусственно заужены, поскольку в этом случае отслеживание фазы сокращает угловую ширину символов.

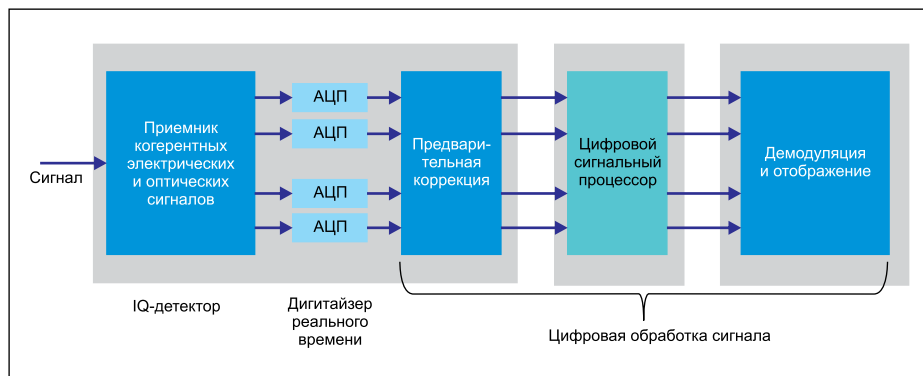
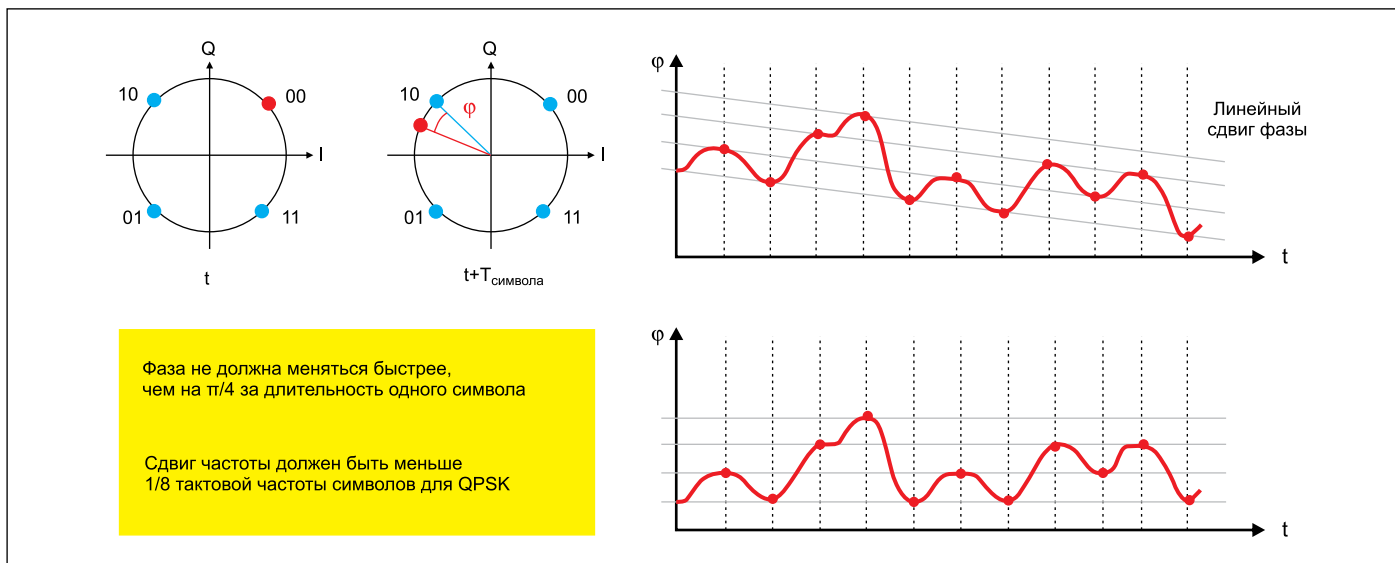


Рис. 1. Архитектура приемника, рекомендованная OIF для реализации интегрированных интрадинных когерентных приемников



Фаза не должна меняться быстрее, чем на $\pi/4$ за длительность одного символа

Сдвиг частоты должен быть меньше $1/8$ тактовой частоты символов для QPSK

Рис. 2. Разность частот передающего лазера и гетеродина порождает «вращающееся» сигнальное созвездие

В меньшей полосе мы получаем более реалистичные круглые символы. В еще меньшей полосе мы достигаем предела на фазовой диаграмме несущей, где фазу отслеживать больше не удастся. Угловое распределение символов явно подвержено влиянию фазового шума, который нельзя подавить.

Вычисление матрицы Джонса

Поскольку цифровому демодулятору нужны два независимых модулирующих сигнала (для плоскостей поляризации x и y), важным этапом цифровой обработки сигнала становится демультимплексирование поляризации. На этом этапе мы компенсируем PMD и PDL и учитываем, что состояние поляризации в одномодовом оптоволокне в процессе распространения не сохраняется.

Направление поляризации меняется по мере прохождения сигнала по оптоволокну (рис. 5), поэтому состояние поляризации сложно связано с ориентацией приемника. Вот почему разделитель поляризации в приемнике не позволяет получить два независимых сигнала, давая вместо этого линейную комбинацию двух составляющих поляризации. Волокно, сохраняющее поляризацию, конечно, сохраняет состояние поляризации, но не используется для передачи данных из-за сильного затухания и высокой стоимости.

Все искажения полностью поляризованного света в оптоволоконном канале можно математически описать так называемой матрицей Джонса. Передаваемый сигнал S перемножается с матрицей Джонса и дает в результате принимаемый сигнал R . Для идеального канала без поляризационных искажений матрица Джонса — это единичная матрица. В таком случае принимаемый сигнал совпадает с излучаемым сигналом (рис. 6). В общем виде матрица Джонса представляет собой комплексную матрицу 2×2 соответственно с восьмью

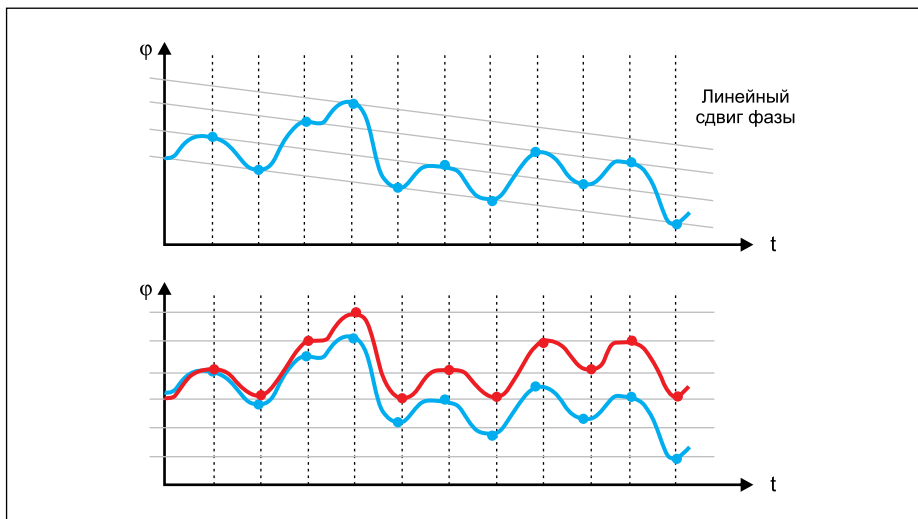


Рис. 3. В реальной системе связи часто не удастся восстановить фазу из-за слишком низкой частоты дискретизации, фазового шума и смещения

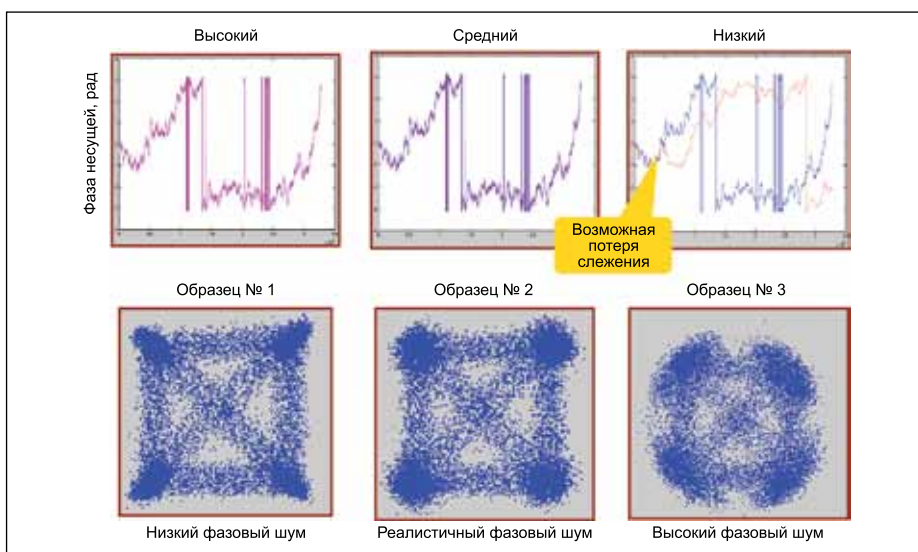


Рис. 4. Примеры отслеживания фазы несущей лазера с распределенной обратной связью в зависимости от полосы слежения

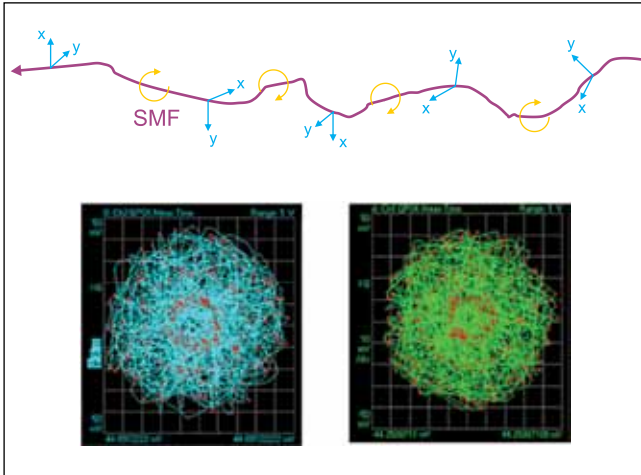


Рис. 5. Одномодовое оптоволокно меняет состояние поляризации передаваемого сигнала, поэтому разделитель поляризации на стороне приемника не дает два независимых сигнала, а создает вместо этого их линейную комбинацию. Здесь показаны сигнальные созвездия QPSK с двойной поляризацией после демультиплексирования поляризации

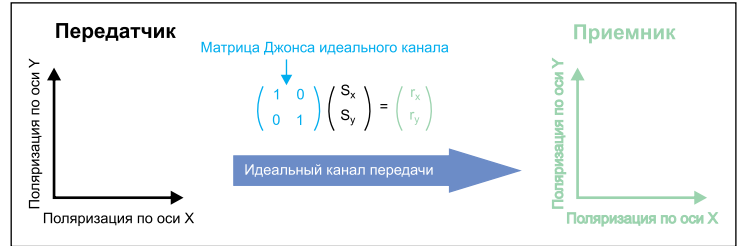


Рис. 6. Матрица Джонса идеального канала

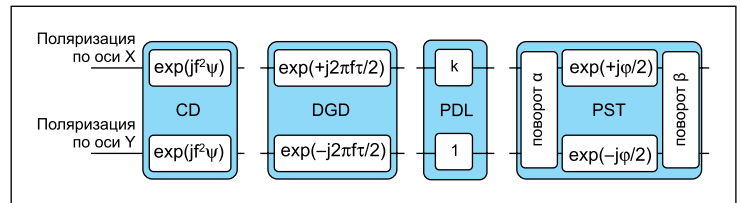


Рис. 7. Модель корректирующих фильтров для компенсации хроматической дисперсии (CD), дифференциальной групповой задержки (DGD), зависящих от поляризации потерь (PDL) и трансформации состояния поляризации (PST)

(для реальной и мнимой части) независимы параметрами.

А потому для восстановления исходного сигнала по измеренному принимаемому сигналу нужно найти матрицу Джонса, что сделать довольно трудно, поскольку обычно мы имеем очень мало информации о численных значениях искажений, воздействующих на сигнал в канале, или не имеем такой информации вообще.

Поэтому для аппроксимации исходного сигнала часто используются так называемые слепые алгоритмы. Данные алгоритмы представляют собой методы оценки, не требующие знания исходного сигнала (кроме вида модуляции). В таком случае обратная матрица Джонса представляется примененными к принимаемому сигналу корректирующими фильтрами (рис. 7). Каждый элементарный фильтр моделирует некоторый эффект искажения сигнала. Алгоритм итерационно подбирает переменные фильтров ($\alpha, \beta, k \dots$), добиваясь схождения, то есть того, чтобы измеренная карта символов имела минимальные

расхождения с символами, рассчитанными алгоритмом.

Недостаток указанного метода в том, что он может дважды восстановить один и тот же канал поляризации. Эта проблема известна как сингулярность алгоритма. Кроме того, сам метод очень сложен, поскольку для расчета следующего шага итерации каждый символ должен обрабатываться индивидуально.

Проще в координатном пространстве Стокса

Оценку проще выполнить с помощью параметров Стокса, где демультиплексирование поляризации является истинно слепой процедурой, поскольку не требуется ни демульциации, ни знание используемого вида модуляции или частоты несущей. Кроме того, в пространстве Стокса мы не сталкиваемся с проблемой сингулярности.

Пространство Стокса помогает визуализировать состояния поляризации оптических сигналов и, следовательно, отлично подходит

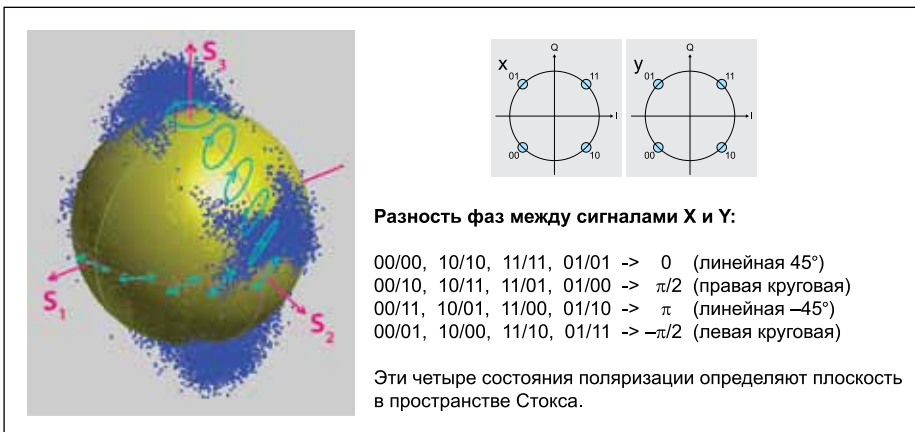
для наблюдения изменения поляризации вдоль оптического канала. Любое состояние поляризации полностью поляризованного света можно описать точкой в этом трехмерном пространстве, которая лежит на поверхности сферы — так называемой сферы Пуанкаре, чей центр находится в начале координат. Радиус сферы соответствует амплитуде светового сигнала. Круговая поляризация располагается вдоль оси S_3 . Вдоль экватора в плоскости, образованной осями S_1 и S_2 , располагается состояние линейной поляризации, а промежуточные положения соответствуют эллиптической поляризации. На рис. 8 зеленым цветом показано расположение на сфере разных состояний поляризации.

Также на рис. 8 представлен измеренный сигнал QPSK, поляризованный по плоскостям x и y . В точках выборки возможны четыре состояния разности фаз между двумя сигналами. Комбинация этих сигналов x и y с разностями фаз дает измеренные «облака» синих точек в пространстве Стокса. (Используя сигнал QPSK с одним направлением поляризации, мы получим одно скопление на оси S_1 .)

Переходы между четырьмя состояниями определяют в пространстве Стокса объект, напоминающий линзу (рис. 9). Можно доказать, что сигналы с мультиплексированной поляризацией любого формата всегда определяют такие линзы.

Когда мы сталкиваемся с трансформацией состояния поляризации вдоль оптического тракта одномодового волокна, линзы в пространстве Стокса поворачиваются (рис. 10). По этому повороту можно получить матрицу Джонса, которая представляется нормалью линзоподобного объекта.

А как представлены в пространстве Стокса другие искажения? В случае PDL линзы



Разность фаз между сигналами X и Y:

- 00/00, 10/10, 11/11, 01/01 -> 0 (линейная 45°)
- 00/10, 10/11, 11/01, 01/00 -> $\pi/2$ (правая круговая)
- 00/11, 10/01, 11/00, 01/10 -> π (линейная -45°)
- 00/01, 10/00, 11/10, 01/11 -> $-\pi/2$ (левая круговая)

Эти четыре состояния поляризации определяют плоскость в пространстве Стокса.

Рис. 8. Сфера Пуанкаре в пространстве Стокса для сигнала QPSK с поляризационным разделением (PDM)

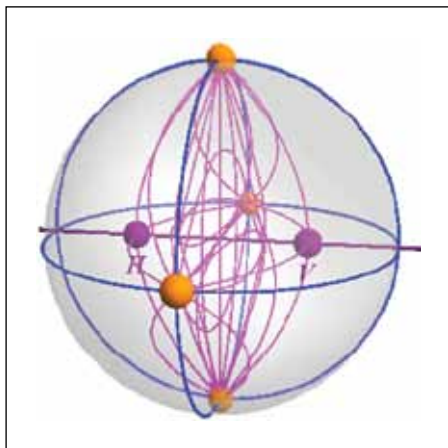


Рис. 9. Межсимвольные переходы сигнала PDM QPSK: в левой полусфере расположены переходы сигнала с поляризацией по оси x (H, горизонтальная), а в правой полусфере — переходы сигнала с поляризацией по оси y (V, вертикальная)

деформируются и смещаются. Тем не менее это не вызывает проблем с восстановлением матрицы Джонса. Деформация позволяет количественно оценить PDL. CD не зависит от поляризации и не препятствует ее демуль-

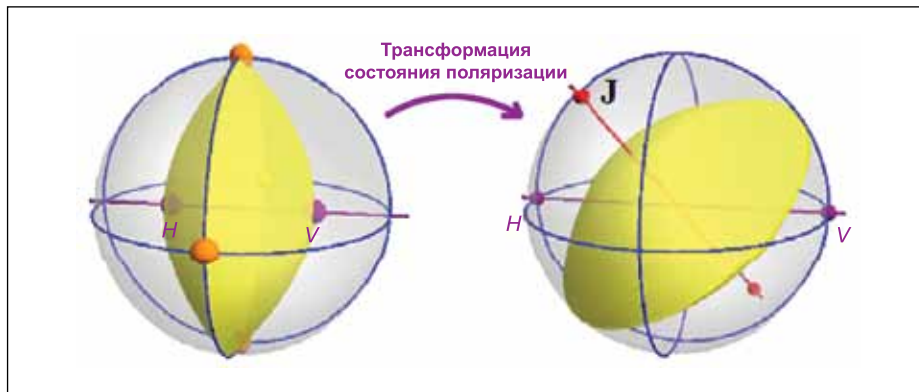


Рис. 10. Трансформация состояния поляризации приводит к повороту линз в пространстве Стокса. Нормаль к линзе определяет матрицу Джонса — здесь приведен пример сигнала PDM QPSK

типлексированию. В данном случае количественные характеристики можно получить по сигнальному созвездию.

Определение символов

После успешной цифровой обработки сигнала и демультиплексирования поляризации мы можем, наконец, определить принимаемые символы. В QPSK критерием принятия реше-

ния являются значения I и Q в измеренной точке сигнального созвездия (рис. 11), например все точки с положительными значениями I и Q интерпретируются как «11». В более сложных форматах использовать I и Q в качестве критерия принятия решения нельзя. В этом случае точки привязываются к ближайшему символу. По размытым «облакам» в правой части рис. 11 можно сказать, что даже когерентное детектирование не избавляет нас от битовых ошибок. Как же выполнить количественную оценку? Этот вопрос будет обсуждаться в следующей статье данной серии, посвященной когерентным оптическим сигналам. ■

Литература

1. OIF Implementation Agreement for Integrated Dual Polarization Intradynе Coherent Receivers. IA # OIF-DPC-RX-01.2. 2013. Nov. 14. // http://www.oiforum.com/public/documents/OIF_DPC_RX-01.2.pdf
2. Geyer J. C., Hauske F. N., Fludger C. R. S., Duthel T., Schulien C., Kuschnerov M., Piyawanno K., van den Borne D., Schmidt E.-D., Spinnler B., de Waardt H., Lankl B., Schmauss B. Channel Parameter Estimation for Polarization Diverse Coherent Receivers // IEEE Photonics Technology Letters. 2008. Vol. 20, No. 10. May 15.

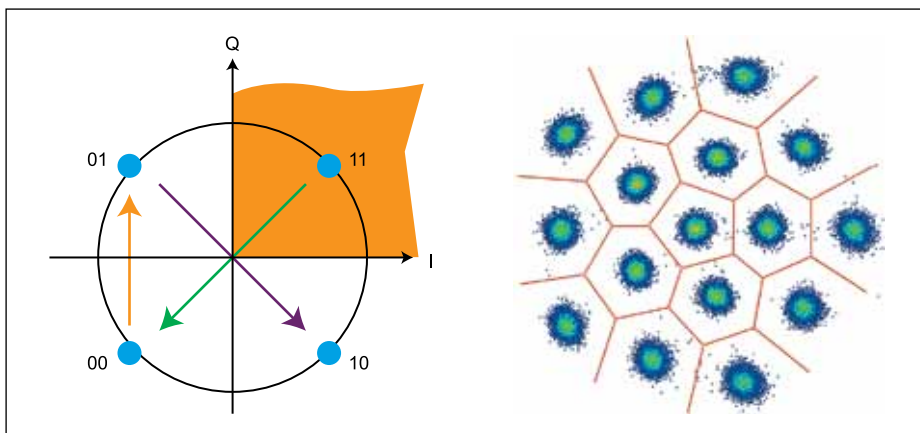


Рис. 11. В QPSK критерий принятия решения основан на значениях I и Q , а в более сложных форматах — на расстоянии до ближайшего соседнего символа