

400 ГБИТ/С И ВЫШЕ: детектирование и анализ комплексно- модулированных оптических сигналов

В. Мораренко, технический специалист сектора цифрового анализа и фотоники компании Keysight Technologies

Когерентная обработка оптического сигнала и использование современных форматов цифровой модуляции позволяют существенно повысить пропускную способность сетей – и вопрос измерительной техники для исследования когерентных оптических сетей приобретает все большую актуальность.

ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ С АМПЛИТУДНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

В отличие от предыдущего поколения высокоскоростных оптических сетей, когда использование амплитудной манипуляции для модуляции амплитуды оптической несущей на высоких скоростях передачи данных было достаточно, современные оптические каналы связи, следуя за индустрией беспроводной связи, переходят к использованию форматов модуляции более высокого порядка (рис.1), которые выходят за рамки амплитудной манипуляции посредством кодирования информационных символов как по амплитуде, так и по фазе [1].

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^* (рис.2). Как следует из приведенного на рис.2 уравнения, результат содержит только амплитуду AS . Ток I_{photo} не несет никакой информации о круговой частоте ω_s и фазе Φ_s . Таким образом,

показанный сигнал с квадратурной фазовой манипуляцией (QPSK) во временной области нельзя однозначно сопоставить с диаграммой IQ. Можно лишь сказать, что нижняя, пересекающая нуль кривая, представляет диагональные переходы между четырьмя точками созвездия, а средняя кривая – внешние переходы. Плоский сигнал соответствует случаям,

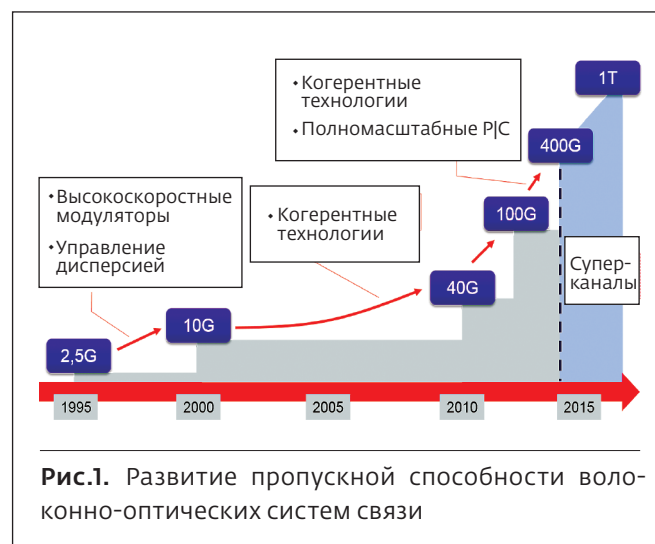
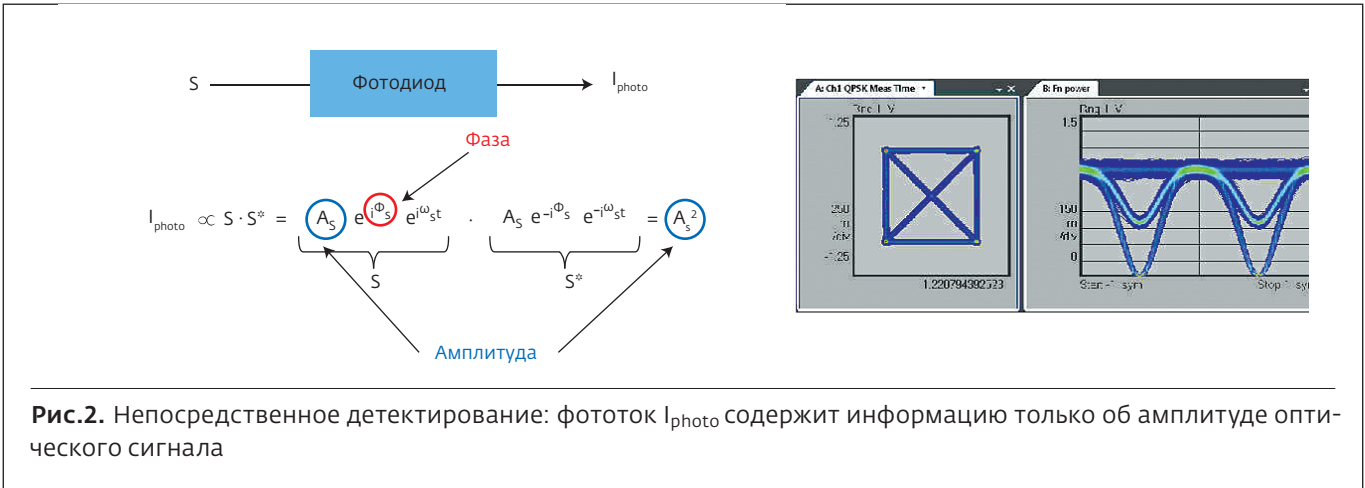


Рис.1. Развитие пропускной способности волоконно-оптических систем связи



когда фаза не меняется, то есть когда за символом следует такой же символ [2].

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 гигагерцовом диапазоне.

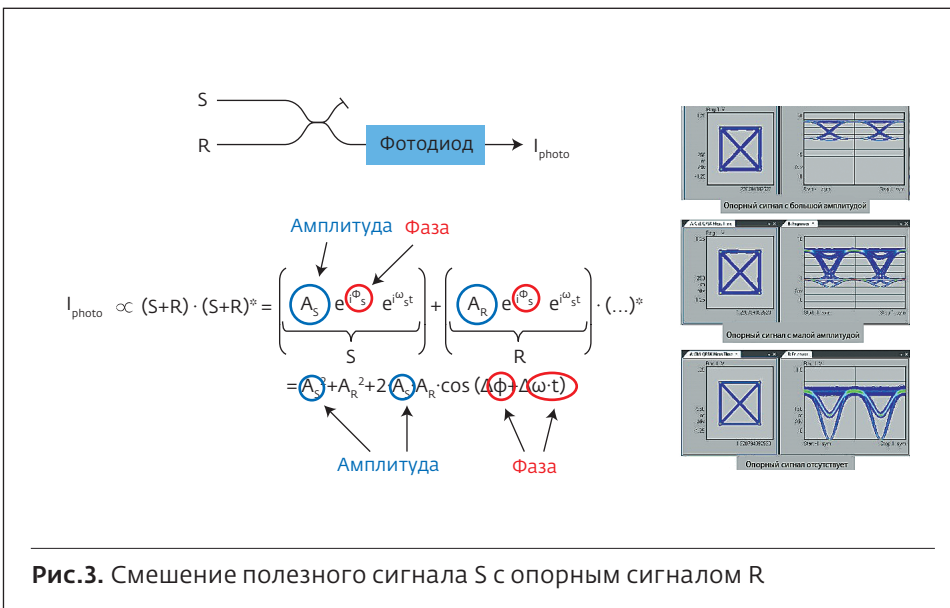
КОГЕРЕНТНОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

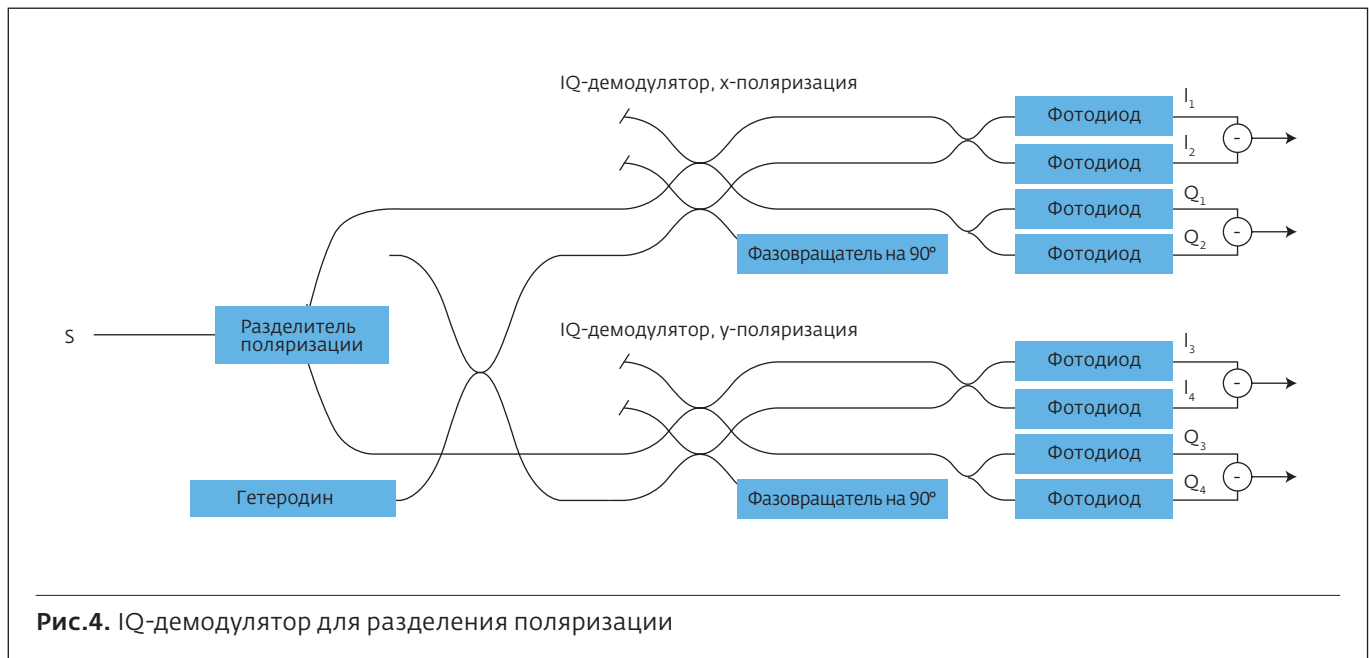
Ключ к решению этой проблемы – измерение не абсолютной фазы, а фазы по отношению к известному опорному сигналу. Базовая схема такого детектора, называемого когерентным, показана на рис.3. Смещение полезного сигнала S с опорным сигналом R позволяет измерять разность фаз. На диаграммах показан сигнал с модуляцией QPSK, смешанный с разными опорными сигналами. "Идеальный" монохроматический лазер, создающий опорный сигнал R , часто называют "гетеродином" по аналогии с радиоэлектроникой.

Конечно, технология когерентного детектирования не нова, она использовалась в сфере радиовещания десятилетия назад. Благодаря ей приемник можно было настроить

на прием определенной радиостанции, распознав ее среди сотен различных сигналов, передаваемых по радиоволнам. Но идея использовать когерентное детектирование для практического применения в сфере оптической передачи данных была реализована сравнительно недавно.

Притом что нет "стандартного" определения когерентного детектирования в сетях, например, DWDM, существуют определенные рыночные ожидания относительно





номинальных признаков, характерных для развертывания решения с применением когерентных технологий: амплитудная/фазовая модуляция высокого порядка, поляризационное мультиплексирование, когерентное детектирование посредством лазера гетеродина в приемнике, высокоскоростные аналогово-цифровые преобразователи и сложные цифровые сигнальные процессоры в приемнике. Кроме наличия перечисленных ключевых признаков, когерентные технологии демонстрируют потенциал дальнейшего развития, поэтому в следующих поколениях этой технологии мы, возможно, увидим функции активного формирования сигнала в передатчике (с использованием аналого-цифрового преобразователя) и компенсацию нелинейных эффектов в оптоволокне.

Итак, 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.3 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. Опорная частота ω_R выбирается 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. Как показано на рис.3, смешение полезного сигнала S с опорным сигналом R позволяет измерять разность фаз. На диаграммах показан сигнал с QPSK, смешанный с разными опорными сигналами. Подавить все другие фазонезависимые составляющие возможно 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 результате получается разность между двумя фототоками.

IQ-ДЕМОДУЛЯЦИЯ И КОГЕРЕНТНОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ

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



Рис.5. Анализаторы оптической модуляции Keysight N4391A и N4392A

гетеродин дает опорный сигнал для двух детекторов, но для получения составляющей Q нужно сдвинуть фазу на $\frac{\pi}{2}$. Такая 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. Также эти принципы когерентного приема распространяются и на две плоскости поляризации x и y.

Блок-схема демодулятора для поляризационно-мультиплексированного сигнала приведена на рис.4. В этом случае для получения координат I и Q используются четыре выходных сигнала, по одному на каждое направление поляризации 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 эта схема используется очень широко и даже для сигналов, не имеющих двойной поляризации [2].

Вопрос измерительной техники для исследования когерентных оптических систем передачи данных стоит на сегодняшний день очень остро, особенно при решении таких задач, как определение параметров целостности сигналов передатчиков, определение параметров гомодинных компонентов, оценка параметров компонентов сети. Принцип детектирования комплексно модулированных оптических сигналов с двойной поляризацией, иллюстрированный рис.4, замечательно подходит для контрольно-измерительной

техники, поскольку методы гетеродинного детектирования во временной области предлагают максимальную гибкость, и 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, например, в контрольно-измерительных сценариях.

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 поляризационномодовую (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.

ТЕСТИРОВАНИЕ КОГЕРЕНТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Анализаторы оптической модуляции обычно используются для анализа комплексно модулированных оптических сигналов на физическом уровне с целью определения качества сигнала или аттестации компонентов, предназначенных для IQ-модуляции или демодуляции. Компания Keysight Technologies предлагает анализаторы оптической модуляции N4391A и N4392A (рис.5) для тестирования систем когерентной передачи оптических сигналов [3].

Анализатор оптической модуляции Keysight N4391A обеспечивает комплексный анализ оптических сигналов с амплитудной и фазовой модуляцией для систем передачи данных от 400 Гбит/с до 1 Тбит/с. Это решение строится на базе осциллографа реального времени Keysight семейства Infiniium, например, серии Z с полосой пропускания до 63 ГГц. Именно осциллограф выполняет роль быстрого четырехканального высокопроизводительного дигитайзера реального времени с очень малыми уровнями джиттера и шума и высоким эффективным числом разрядов (ENOB)



Рис.6. Результаты некоторых измерений, проведенных на анализаторе оптической модуляции

во всем частотном диапазоне. Вместе с программой векторного анализа сигналов (VSA), оптимизированной для оптических измерений, анализатор оптической модуляции обеспечивает: использование технологии широкополосного когерентного оптического приемника с поляризационным разделением и детектированием в режиме реального времени; использование новых алгоритмов обработки сигналов, включая компенсацию нежелательных эффектов; органичную интеграцию с высокоскоростными устройствами сбора данных в режиме реального времени, например, осциллографами Keysight серии Infiniium Z и др. С помощью системы N4391A можно полностью охарактеризовать сигнал передатчика, организовать и проанализировать гомодинный прием, а также провести оценку компонентов когерентной оптической сети.

Точное определение характеристик качества сигнала с цифровой модуляцией на выходе передатчика или на протяжении всего канала связи представляется основной задачей применения этого типа измерительных приборов.

Ниже приведены наиболее важные инструменты анализа и измерений – диаграмма

созвездия оптического сигнала, модуль вектора ошибки (EVM), фазовая ошибка, измерение BER на физическом уровне, измерение и коррекция параметров хроматической (CD) и поляризационно-модовой дисперсии (PMD) первого порядка, квадратурная ошибка, разбаланс I/Q-сигналов, глазковая диаграмма I- или Q-сигнала, анализ спектра с высоким разрешением, ширина спектральной линии излучения лазера, поляризация анализируемых символов, поддержка более чем 30 форматов модуляции, в том числе OFDM, изменяемая ширина полосы частот при отслеживании фазы (рис.6).

На базе анализатора оптической модуляции N4391A строится исследовательское решение для анализа терабитной передачи с использованием супер-канала с несколькими несущими (рис.7).

В свою очередь, комбинированный анализатор оптической модуляции Keysight N4392A представляет собой компактный прибор, оснащенный дисплеем с диагональю 15 дюймов (38,1 см). Анализатор предназначен для выполнения повседневных работ в процессе исследований и разработок, определения характеристик устройств, а также для тестирования компонентов и модулей систем стандартов 40G/100G в процессе производства. Это первый в отрасли анализатор оптической модуляции, который имеет встроенные возможности по проверке характеристик и калибровке,

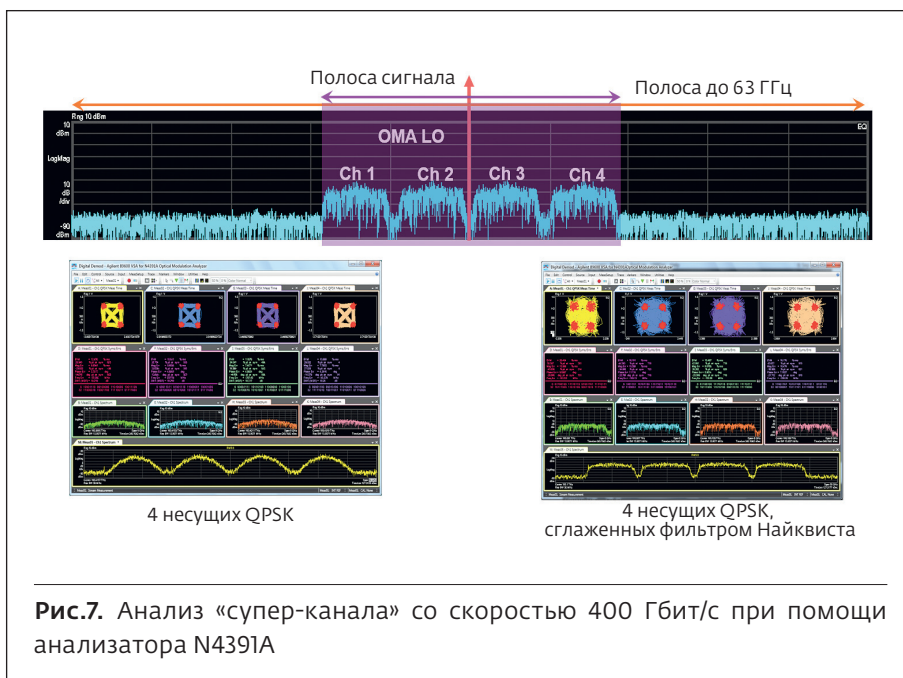


Рис.7. Анализ «супер-канала» со скоростью 400 Гбит/с при помощи анализатора N4391A

Модели	N4392A	N4391A
Полоса пропускания, ГГц	4 × 23	4 × 33
Уровень шумов при измерении EVM	< 3,5 % EVM скз	< 1,8% EVM скз
Частота дискретизации, Гвыб/с	4 × 63	4 × 80
Скорость передачи, Гбод	42	62
Глубина памяти	16 квыб / канал	20 Мвыб до 2 Гвыб / канал
Масса, кг	< 13	~ 55
Мобильность	Переносной	Стационарный

что позволяет существенно расширить интервалы между заводскими калибровками. Объединение в одном корпусе дигитайзера, оптической системы и компьютера для анализа результатов измерений позволяет создать компактное законченное техническое решение, для которого не требуются дополнительные внешние кабели, что делает этот прибор более надежным и простым в использовании. При сравнительно небольших размерах анализатор оптической модуляции Keysight N4392A оснащен крупным, как у ноутбука, экраном, что дает возможность более детально исследовать поведение сигнала и быстрее выполнять отладку устройств. Благодаря компактному корпусу анализатор N4392A представляет собой малогабаритный переносной прибор, который при необходимости можно легко переместить в пределах лаборатории или производственного участка. Это преимущество в полной мере смогут оценить и операторы, которым требуется осуществлять анализ и отладку сигналов на физическом уровне. Самое существенное отличие прибора N4392A от N4391A – наличие независимо от оптических каналов восьми электрических каналов (4 пары дифференциальных сигналов), благодаря чему на этом приборе стало возможным тестировать интегрированные интрадинные когерентные приемники (ICR). Эти компоненты объединяют в одном корпусе оптические и электрооптические компоненты [4]. Основные характеристики анализаторов оптической модуляции N4391A и N4392A представлены в таблице.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализаторы оптической модуляции Keysight N4391A и N4392A – такие же испытательные инструменты для инженеров, работающих в области фотоники, как осциллографы для инженеров-электротехников. Анализаторы оптической модуляции – это приборы, построенные для анализа оптического поля на основе дискретизированных по Найквисту данных, представляющих I- и Q-сигналы в каждой ортогональной плоскости поляризации X и Y. Имея эти данные, можно осуществить множество вариантов анализа и обработки сигнала для оптимизации необработанного сигнала. Типовые результаты имеют вид: диаграммы созвездия, IQ-диаграммы, отображающей переходы, или глазковой диаграммы, представляющей проекцию на мнимую часть квадратурных осей.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Макаров Т.В.** Когерентные волоконно-оптические системы передачи. – Одесса: ОНАС (Одесская Национальная Академия Связи) им. А. С. Попова, 2009.
2. **Michel S.** How to detect complex modulated optical signals // Lightwave magazine. April, 2014.
3. Keysight Lightwave Catalog 2015 | Volume II – Optical-Electrical, Signal Generation, Complex Modulation Analysis. Keysight Technologies, 2014–2015. Published in USA, January 31, 2015.
4. Block diagram from "OIF Implementation Agreement for Integrated Dual Polarization Intradynе Coherent Receivers".