

СИСТЕМЫ ГЕТЕРОДИННОГО ПРИЕМА В РАДИО И ОПТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНАХ

Скороходов Р.В., студент гр.067001/магистрант

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Тарченко Н.В. – канд. технических наук

Аннотация. Тематика работы обусловлена повсеместным использованием волоконно-оптических систем передачи, в том числе и со спектральным уплотнением. При постоянном увеличении пропускной способности волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) совершенствуются способы обработки оптического сигнала как в передающем и приемном оборудовании, так и в процессе передачи по оптическому волокну. Совершенствование оптических технологий расширяет возможности алгоритмов обработки сигналов на приемной стороне и требует оценки их эффективности.

Ключевые слова. Когерентный прием, цифровая обработка сигналов, оптическое гетеродинирование.

1 Введение

Многоуровневые форматы модуляции сочетают в себе высокую спектральную эффективность и устойчивость к воздействию дисперсии [1, 2]. Эти достоинства многоуровневых форматов модуляции делают их перспективными при необходимости увеличения скорости передачи в действующих системах связи со спектральным уплотнением. Сочетание когерентного детектирования с цифровой обработкой сигналов позволяет достигнуть еще более высоких значений количества передаваемой информации на один символ [3]. Когерентные оптические системы связи были предложены в 1970-е гг. [4] и в 1980-е начали интенсивно исследоваться, поскольку обеспечивают достижение квантового предела чувствительности приемников [5, 6]. Однако с появлением систем связи со спектральным уплотнением и оптическими усилителями научно-исследовательские работы в этом направлении были прерваны примерно на 20 лет.

После демонстрации в 2005 г. нового поколения приемников – цифровых когерентных приемников – повсеместный интерес к когерентным системам связи вновь возродился. Он обусловлен возможностями реализации в этих системах множества разнообразных многоуровневых форматов модуляции. Кроме того, цифровая обработка сигналов в электронной форме позволяет компенсировать искажения, связанные, например, с хроматической и поляризационно-модовой дисперсией. Существенным недостатком первых когерентных систем связи была их высокая поляризационная чувствительность. Однако проблема была решена благодаря изобретению поляризационной диверсификации (*polarization diversity*) [7]. Более того, современные цифровые когерентные приемники позволяют удвоить скорость передачи информации за счет поляризационного уплотнения информации.

В настоящей работе рассмотрены принципы работы когерентных систем связи и гетеродинного приема, сегодняшний уровень их развития и перспективы.

2 Гетеродинный фотоприём

Структурная схема гетеродинного фотоприёмника изображена на рисунке 1. В его состав входит гетеродин – источник монохроматического оптического излучения с частотой ν_r , близкой к частоте принимаемого сигнала ν_c . Оба сигнала – принимаемый и гетеродинный – одновременно поступают на фотодетектор, тип которого может быть любым, лишь бы время его инерции было меньше периода колебаний разностной частоты $T = \frac{1}{|\nu_r - \nu_c|}$. Роль гетеродина играет лазер [8] с непрерывным излучением высокой спектральной чистоты (монохроматичности).

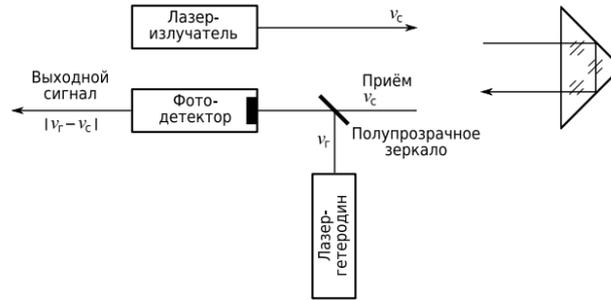


Рисунок 1 – Структурная схема гетеродинного фотоприёмника

В результате интерференции оптических полей гетеродинного и принимаемого сигналов (для чего необходима взаимная параллельность волновых фронтов и одинаковость поляризации обеих волн) на чувствительную площадку фотодетектора воздействует результирующее поле, амплитуда которого изменяется с разностной частотой $|\nu_r - \nu_c|$. В фототоке детектора также возникает составляющая разностной частоты, величина которой, как показывает анализ, определяется формулой:

$$I_p = \frac{e \cdot \eta_{кв}}{h\nu} \sqrt{2P_r P_c}, \quad (1)$$

где P_r и P_c – соответственно оптическая мощность гетеродина и сигнала;

e – заряд электрона;

h – постоянная Планка;

ν – частота колебаний сигнала или гетеродина (различием между ν_r и ν_c , в данном случае можно пренебречь ввиду его малости);

$\eta_{кв}$ – квантовый выход фотодетектора.

В случае приёма слабых сигналов $P_r \gg P_c$, и, как видно из формулы (1), за счёт мощности гетеродина происходит как бы усиление сигнала в фотодетекторе. Величина этого усиления пропорциональна $\sqrt{P_r/P_c}$ и может быть весьма значительной. Предельно допустимая мощность гетеродина определяется угрозой перегрузки фотодетектора [8] из-за его нагрева гетеродинным излучением и других причин; типичные значения P_r имеют порядок 10^{-3} Вт. Шумы гетеродинного приёмника при отсутствии фона и флуктуации мощности гетеродина определяются выражением:

$$P_m = \frac{hc}{\lambda \eta_{кв}} \Delta f, \quad (2)$$

где c – скорость света;

λ – длина волны принимаемого излучения;

Δf – ширина частотного спектра электрического сигнала на выходе ФД (фотодетектора).

Напряжение с частотой $|\nu_r - \nu_c|$, возникающее на сопротивлении нагрузки фотодетектора при протекании по нему тока I_p , представляет собой сигнал промежуточной частоты. Этот сигнал обычно усиливается последующим усилителем промежуточной частоты, подвергается детектированию с помощью радиочастотного детектора (промежуточная частота $|\nu_r - \nu_c|$ обычно имеет порядок $10^7 - 10^9$ Гц, т.е. лежит в радиочастотном диапазоне) и превращается в сигнал переменного тока, форма которого отражает форму огибающей оптического сигнала.

В некоторых случаях частоту гетеродина выбирают равной частоте сигнала. Разностная (промежуточная) частота при этом равна нулю, а в токе фотодетектора непосредственно содержится составляющая, пропорциональная амплитуде, огибающей модулированного оптического сигнала. Такой фотоприёмник называется гомодинным; в нём сохраняются достоинства гетеродинного приёма (усиление сигнала в фотодетекторе за счёт мощности гетеродина и малый собственный шум) и отсутствует надобность в усилителе промежуточной частоты. Гомодинный приём рассматривается как частный случай гетеродинного приёма.

Недостатками гетеродинного приёма являются весьма жёсткие требования к точности совмещения фронтов гетеродинной и сигнальной волн, а также к относительной стабильности

их частот. Во многих практических случаях выполнение этих требований оказывается сложным делом, что требует дополнительных исследований в связи с развитием технологий.

3 Преимущества передачи информации с помощью когерентного приема

Максимальная скорость передачи информации в когерентных системах связи определяется возможностями современных аналого-цифровых преобразователей (АЦП), скорость работы которых достигла 56 Гбод. На их основе удалось увеличить скорость работы цифровых систем обработки сигналов и довести скорость работы когерентных приемников до 28 Гбод.

Когерентные приемники обеспечивают возможность внедрения различных типов многоуровневых форматов модуляции включая фазовые и квадратурные форматы. Наиболее перспективным форматом для скорости передачи информации 100 Гбит/с является формат *DP-QPSK* [9]. В каждом из двух ортогонально поляризованных потоков информация передается с использованием 4-х уровневой фазовой модуляции (*QPSK*). В результате в каждой поляризации передается по 2 бита на символ, всего 4 бит/символ. При символической скорости 28 Гбод обеспечивается битовая скорость 112 Гбит/с, которая достаточна для передачи информации со скоростью 100 Гбит/с и применения предварительной коррекции ошибок с 12 % избыточностью.

В стандартной сетке *DWDM* (*Dense Wavelength Division Multiplexing* (плотное мультиплексирование с разделением по длине волны.) 50 ГГц системы связи 100 Гбит/с формат модуляции *DP-QPSK* обеспечивают спектральную эффективность 2 бит/Гц. Увеличить спектральную эффективность до 3-х бит/Гц можно при использовании плотной спектральной сетки 33,3 ГГц. Применение сложных алгоритмов многосимвольной обработки (*MAP* (*Maximum a posteriori probability* (оценка апостериорного максимума) или *MLSE* (*Maximum-likelihood sequence estimation* (последовательное оценивание по методу максимального правдоподобия) позволило довести спектральную эффективность до 4-х бит/с/Гц в сетке 25 ГГц/с [9, 10]. Поскольку при использовании сетки 33,3 ГГц не требуется применение сложных алгоритмов многосимвольной обработки (*MAP* или *MLSE*), то *DWDM* системы связи с 100 Гбит/с *DP-QPSK* форматом модуляции и скоростью передачи информации порядка 12–15 Тбит/с могут быть реализованы на основе коммерчески доступных компонент с использованием только *C* диапазона.

Основным доводом в пользу перехода от волоконно-оптической системы передачи (ВОСП) с энергетическим приемом к системам с когерентным приемом является возможность использования различных видов многоуровневой модуляции: амплитудной (АМ), фазовой (ФМ), частотной (ЧМ) и поляризационной, а также их комбинаций, например, квадратурной амплитудной модуляции (КАМ). Отметим, что все известные фотодетекторы дают отклик на поток фотонов и мало чувствительны к оптической фазе и частоте несущей, а также состоянию поляризации [11].

Для определения параметров вектора напряженности электрического поля в модулированной световой волне принимаемого сигнала применяют когерентный прием, основанный на смешении сигнала с когерентным опорным оптическим полем со стабильной фазой от дополнительного источника излучения (гетеродина) и детектирования интерференции двух оптических полей на фоточувствительной площадке ФД. Регистрируемый в результате когерентного приема фототок содержит информацию об амплитуде, частоте и фазе сигнального поля.

По сравнению с энергетическими приемниками прямого детектирования гетеродинные и гомодинные приемники имеют следующие преимущества:

- возможность электронной компенсации хроматической и поляризационно-модовой дисперсии;
 - увеличение отношения сигнала к шуму примерно на 3 дБ даже по сравнению с идеальным не шумящим ФП прямого детектирования. Реальный выигрыш от использования когерентного приема значительно больше и может составлять 10–15 дБ;
 - малая чувствительность когерентного приема к нежелательному фоновому излучению.
- При достаточной мощности гетеродина гетеродинный и особенно гомодинный методы приема позволяют достичь квантового предела детектирования.

Недостатком когерентного приема является техническая сложность обеспечения согласования волновых фронтов и поляризаций на поверхности фотодиода принимаемого излучения и излучения гетеродина. В настоящее время для смешивания сигнала и гетеродина используются устройства интегральной оптики. Высокие требования предъявляются к стабильности частот и фаз несущих частот источника излучения и гетеродина.

Когерентные системы связи позволяют реализовывать любые многоуровневые форматы модуляции, обеспечивая увеличение скорости передачи информации в несколько раз в зависимости от емкости формата.

Другое преимущество когерентных систем состоит в сохранении фазовой и поляризационной информации оптического сигнала при преобразовании в электрическую форму. Это позволяет осуществлять постобработку электрических сигналов, включая компенсацию хроматической и поляризационно-модовой дисперсии. Следует особо подчеркнуть, что, благодаря такой обработке сигналов могут быть адаптивно компенсированы также и колебания во времени величины поляризационно-модовой дисперсии.

В настоящее время *Nippon Telegraph and Telephone Corporation (NTT)* в сотрудничестве с *Technical University of Denmark, Fujikura Ltd., Hokkaido University, the University of Southampton* и *Coriant GmbH* продемонстрировали возможность создания системы передачи сверхбольших емкостей на несколько сотен километров с усилителями. Они построили экспериментальную систему с пропускной способностью 1 Пбит/с на 32-сердцевинном оптическом волокне, работающую на расстоянии 205,6 км.

Таким образом, был установлен новый мировой рекорд по дальности системы передачи в 1 Пбит/с с использованием оптического усилителя в одном частотном диапазоне C.

В качестве дальнейшего улучшения своих результатов исследователи отмечают, что дальность передачи может быть увеличена в будущем до 1000 км. Для этого с целью увеличения помехоустойчивости необходимо уменьшить канальную скорость оптического канала до 510 Гбит/с, тогда потенциал системы позволит увеличить расстояние передачи до тысячи километров.

Объединение когерентного детектирования с цифровой обработкой сигналов предоставляет новые возможности, неосуществимые в отсутствие фазовой информации об электрическом поле оптического сигнала. Поэтому исследователи когерентных систем связи надеются, что возрождение систем когерентной оптической связи уже в ближайшем будущем обеспечит инновационное развитие существующих оптических систем связи [12].

Список использованных источников:

1. Winzer, P.J. *Advanced optical modulation formats* / R.J. Essiambre – Rimini: Proc. ECOC 2003, 2003. – Vol. 4 – 1002 p.
2. Величко, М.А. *Новые форматы модуляции в оптических системах связи* / О.Е. Наний, А.А. Сусьян – М.: *Lightwave Russian Edition*, 2005. – № 4 – 21 с.
3. Kikuchi, K. *Coherent transmission system* / K. Kikuchi. – ECOC, 2008. – Paper Th2A1.
4. De Lange, O.E. *Wideband optical communication systems: Part II 'frequency division multiplexing* / O.E. De Lange – Proc. IEEE, 1970. – Vol. 58. – no. 10 – 1683 p.
5. Okoshi, T. *Frequency stabilization of semiconductor lasers for heterodyne-type optical communications systems* / K. Kikuchi. – *Electron. Lett.*, 1980. – Vol. 16. – no. 5. – 179 p.
6. Favre, F. *High frequency stability of laser diode for heterodyne communications systems* / D. Le Guen. – *Electron. Lett.*, 1980. – Vol. 16. – no. 18. – 709 p.
7. Derr, F. et al. / F. Derr. – *Electron. Lett.*, 1991. – Vol. 27 – no. 23 – 2177 p.
8. О'Ши, Д., *Лазерная техника* / Р. Коллен, У. Родс. – Пер. с англ. М.: «Атомиздат», 1980. – 256 с.
9. *Перспективные DWDM системы связи со скоростью 20 Тбит/с на соединение* / О.Е. Наний [и др.]. // *Фотон-экспресс*, 2012. – № 3, С.34–37.
10. *Spectrally Efficient Long-Haul Optical Networking Using 112-Gb/s Polarization Multiplexed 16-QAM*. / P.J. Winzer [et al.]; ed.: J. *Lightw. Technol.*, 2010. – V. 28 – P. 547–556.
11. Наний О.Е. *Дальность работы и пропускная способность когерентных систем связи* / В.Н. Трещиков, Р.Р. Убайдуллаев – М.: *Вестник связи*, 2013. – № 9 – С.13–19.
12. *Сайт о провайдере и телекоммуникациях nag.ru [Электронный ресурс]*. – Режим доступа: <http://nag.ru/go/text/32269/>. – Дата доступа: 24.02.2021.