

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра компьютерной физики и метаматериалов
на базе Саратовского филиала Института радиотехники
и электроники им. В. А. Котельникова РАН

**ПРИЕМ И ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ДАННЫХ
В ОПТИЧЕСКИХ КОГЕРЕНТНЫХ СИСТЕМАХ СВЯЗИ**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Демченко Виталия Валерьевича
студента 4 курса, 4022 группы,
направления подготовки 03.03.02 Физика
Института физики

Научный руководитель
к.ф.-м.н., доцент

А.И. Колюхов

Заведующий кафедрой
компьютерной физики и метаматериалов
на базе Саратовского филиала Института радиотехники
и электроники им. В. А. Котельникова РАН
д.ф.-м.н. профессор

В.М. Аникин

Саратов 2021 г

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Данная работа является актуальной в связи с возросшим интересом к использованию оптических линий для передачи информации.

Целью работы является изучение методов модуляции и детектирование сигналов в оптических когерентных системах связи.

Задачами работы являются:

1. Изучить историю и развитие когерентной оптической связи.
2. Исследовать основной принцип работы когерентного оптического обнаружения. Изучение метода работы гетеродинного, гомодинного и гомодинного приемника с разнесением фаз и поляризации. Выявить отношение несущей к шуму.
3. Изучить основную концепцию и детали цифровой обработки сигналов для когерентных приемников.
4. Анализ и оценка основных характеристик цифрового когерентного приемника. Рассмотреть предел чувствительности приемника, поляризационную зависимость чувствительности приемника и допуск фазового шума.

Методы исследования, использованные в работе – теоретические, а именно, принципы когерентного оптического обнаружения.

Объектом исследования являются гетеродинные и гомодинные приемники, а *предметом исследования* – являются их отличия, достоинства и недостатки, а так же когерентная модуляция/демодуляция многоуровневых кодированных сигналов.

К числу *новых (защищаемых) результатов* относятся:

- Оригинальность обзора теории оптических когерентных систем связи.

Структура ВКР. Выпускная квалификационная работа (ВКР) содержит введение, 1 главу, 4 подглавы, заключение, список использованных источников (37 наименований).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении формулируются аспектные характеристики выпускной работы (объект и предмет исследования, цель и задачи данной работы).

В первой, обзорной по характеру главе, излагается то, что когерентные системы связи позволяют реализовывать любые многоуровневые форматы модуляции, обеспечивая увеличение скорости передачи информации в несколько раз в зависимости от емкости формата.

Исследования и разработки в области волоконно-оптических систем связи начались в первой половине 1970-х годов. В таких системах использовалась модуляция интенсивности полупроводниковых лазеров, а интенсивность оптического сигнала, передаваемого по оптическому волокну, детектировалась фотодиодом, который действовал в качестве квадратичного детектора. Эта комбинация передатчика и приемника называется схемой модуляции интенсивности и прямого обнаружения. Такая схема IMDD имеет большое преимущество, заключающееся в том, что чувствительность приемника не зависит от фазы несущей и состояния поляризации (SOP) входящего сигнала, которые случайным образом колеблются в реальных системах.

На рисунке 1 показан гетеродинный приемник, предложенный в [2] для систем оптической связи с частотным мультиплексированием (FDM). Каждый канал FDM был выбран посредством гетеродинного детектирования с помощью множества локальных генераторов (LO), подготовленных в приемнике.

В таблице 1 показано сравнение когерентных схем и схем IMDD. С помощью когерентных приемников можно восстановить полную информацию об оптических носителях, а именно о фазных и квадратурных компонентах (или амплитуде и фазе) комплексной амплитуды оптического электрического поля и состоянии поляризации (СОП) сигнала. В обмен на такие преимущества когерентные приемники чувствительны к фазе и SOP входящего сигнала. Для решения этой проблемы конфигурация когерентных систем становится намного сложнее, чем у систем IMDD.

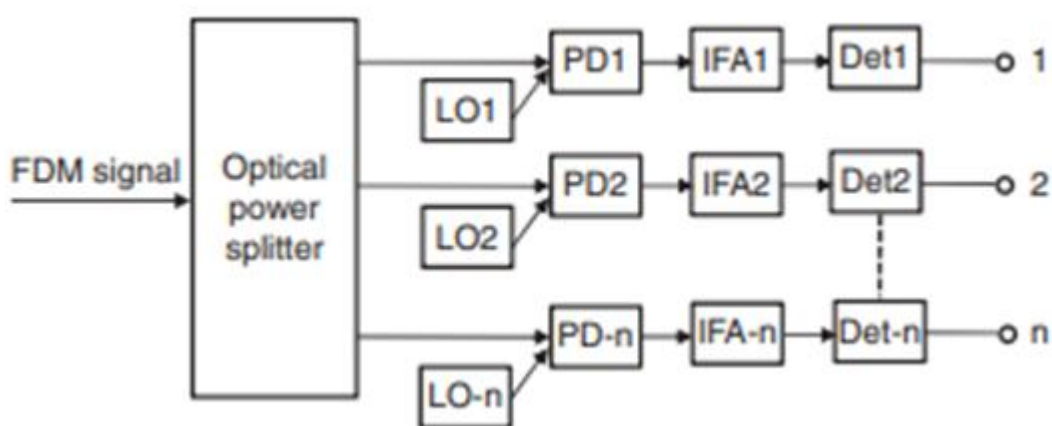


Рис. 1. Гетеродинный приемник для систем оптической связи FDM [2]. LO: гетеродин, PD: фотодиод, IFA: усилитель промежуточной частоты, и Det: детектор.

Таблица 1. Сравнение когерентных схем и схем IMDD.

	Когерентная схема	IMDD
Параметры модуляции	I и Q или амплитуда и фаза	Интенсивность
Метод обнаружения	Гетеродинное или гомодинное обнаружение	Прямое обнаружение
Адаптивное управление	Обязательно (несущая фаза и SOP)	Необязательно

Возрождение когерентной оптической связи. Первым шагом в возрождении исследований когерентных оптических коммуникаций стал квадратурный эксперимент по модуляции/демодуляции PSK (QPSK) с оптической синфазной и квадратурной (IQ) модуляцией и детектированием оптической задержки [14]. В такой схеме один символ несет в себе два бита при использовании на комплексной плоскости созвездия из четырех точек, поэтому мы можем удвоить скорость передачи данных при сохранении символьной скорости, либо поддерживать скорость передачи даже при уменьшенной вдвое спектральной ширине.

На рисунке 2 показано сравнение структуры устройства и фазовой диаграммы между фазовой модуляцией (PM), амплитудной модуляцией (AM) и IQ модуляцией.

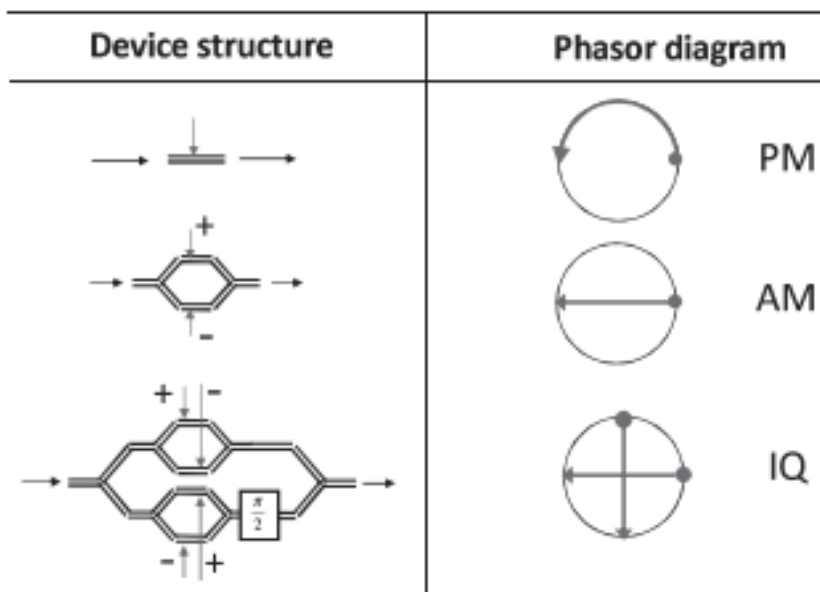


Рис. 2. Сравнение структуры устройства и фазовой диаграммы между фазовой модуляцией, амплитудной модуляцией и IQ модуляцией.

На рисунке 3 показана конфигурация дифференциального приемника QPSK. Два дифференциальных детектора измеряют синфазную и квадратурную составляющие дифференциального сигнала PSK.

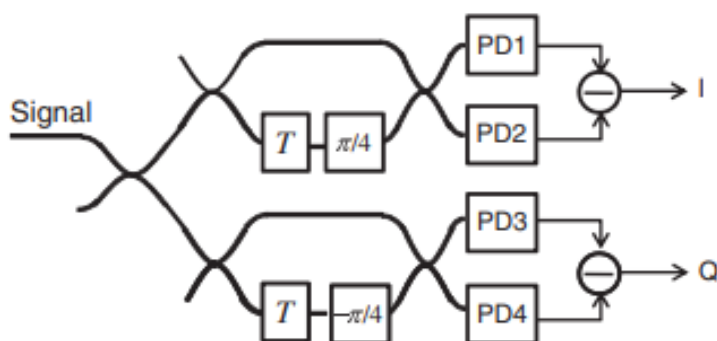


Рис. 3. Конфигурация дифференциального приемника QPSK. Два дифференциальных детектора измеряют синфазную и квадратурную составляющие дифференциального сигнала PSK.

Когерентное обнаружение. Основная концепция когерентного обнаружения состоит в том, чтобы взять произведение электрических полей модулированного сигнального света и гетеродина непрерывной волны (CW) и (LO). На рисунке 4 показана конфигурация когерентного оптического приемника.

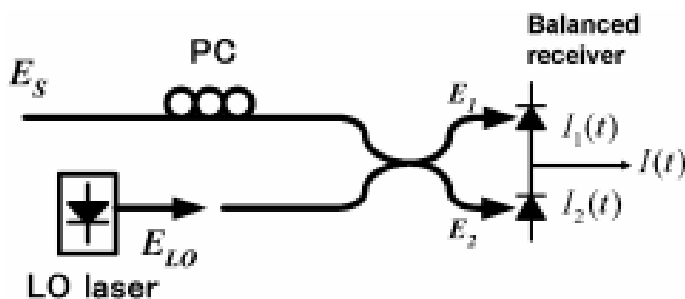


Рис. 4 Конфигурация когерентного приемника, измеряющего биение между сигналом и LO.

Пусть оптический сигнал, поступающий от передатчика, будет

$$E_s(t) = A_s(t)e^{j\omega_s t} \quad (1)$$

где $A_s(t)$ - комплексная амплитуда, а ω_s - угловая частота. Аналогично, электрическое поле LO, подготовленное в приемнике, может быть записано как

$$E_{LO}(t) = A_{LO} e^{j\omega_{LO}t} \quad (2)$$

где A_{LO} - постоянная комплексная амплитуда, а ω_{LO} - угловая частота LO. Отметим, что комплексные амплитуды A_s и A_{LO} связаны с мощностью сигнала P_s и мощностью LO P_{LO} на $P_s = |A_s|^2/2$ и $P_{LO} = |A_{LO}|^2/2$, соответственно.

Сбалансированное обнаружение обычно вводится в когерентный приемник как средство подавления составляющей постоянного тока и максимизации фототока сигнала. Концепция заключается в использовании 3-х децибельного оптического ответвителя, который добавляет 180-и градусный фазовый сдвиг либо в поле сигнала, либо в поле LO между двумя выходными портами.

Когда сигнал и LO сополяризованы, электрические поля, падающие на верхний и нижний фотодиоды, задаются как

$$E_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}(E_s + E_{LO}) \quad (3)$$

$$E_2 = \frac{1}{\sqrt{2}}(E_s - E_{LO}) \quad (4)$$

и выходные фотопотоки записываются как

$$I_1(t) = R \left[\text{Re} \left\{ \frac{A_s(t)e^{j\omega_s t} + A_{LO}e^{j\omega_{LO}t}}{2} \right\} \right]^{ms} = \frac{R}{2} [P_s(t) + P_{LO} + 2\sqrt{P_s(t)P_{LO}} \cos\{\omega_{IF} t + \theta_{sig}(t) - \theta_{LO}(t)\}], \quad (5)$$

$$I_2(t) = R \left[\text{Re} \left\{ \frac{A_s(t)e^{j\omega_s t} - A_{LO}e^{j\omega_{LO}t}}{2} \right\} \right]^{ms} = \frac{R}{2} [P_s(t) + P_{LO} - 2\sqrt{P_s(t)P_{LO}} \cos\{\omega_{IF} t + \theta_{sig}(t) - \theta_{LO}(t)\}], \quad (6)$$

где «ms» означает средний квадрат по отношению к оптическим частотам, «Re» означает взятие действительной части, ω_{IF} известен как промежуточная частота (IF) задаваемая $\omega_{IF} = |\omega_s - \omega_{LO}|$, и $\theta_{sig}(t)$ и $\theta_{LO}(t)$ - фазы передаваемого сигнала и (LO) соответственно. R - чувствительность фотодиода заданная выражением

$$R = \frac{e\eta}{\hbar\omega_s}, \quad (7)$$

где \hbar обозначает константу Планка, e - электронапряжённость, и затем сбалансированный выходной сигнал детектора задается как

$$I = I_1(t) - I_2(t) = 2R\sqrt{P_s(t)P_{LO}} \cos\{\omega_{IF} t + \theta_{sig}(t) - \theta_{LO}(t)\}, \quad (8)$$

Где P_{LO} всегда постоянна, и $\theta_{LO}(t)$ включает только фазовый шум, который изменяется во времени.

Гетеродинные приемники. Гетеродинное обнаружение относится к случаю, когда $|\omega_{IF}| \gg \omega_b/2$, где ω_b - полоса модуляции оптической несущей, определяемая скоростью передачи символов

На рисунке 5 продемонстрировано преобразование спектра оптического сигнала в когерентном гетеродинном приемнике:

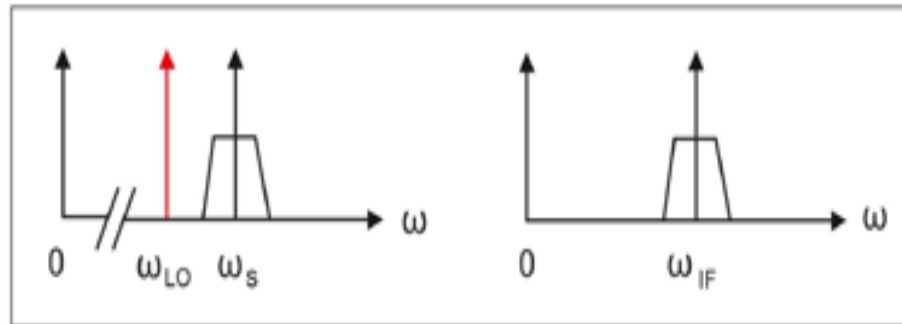


Рис. 5 Преобразование спектра оптического сигнала в когерентном гетеродинном приемнике.

Слева показаны спектры оптического сигнала (трапеция), несущей волны (черная стрелка) и опорного излучения (красная стрелка); справа — спектры сигнала (трапеция) и несущей на промежуточной частоте.

В таком случае, выражение (8) показывает, что электрическое поле сигнального света преобразуется с понижением частоты в сигнал ПЧ, включающий амплитудную информацию и фазовую информацию, как показано на рис. 5.

Фаза сигнала представлена как $\theta_{sig}(t) = \theta_s(t) + \theta_{sn}(t)$, где $\theta_s(t)$ - фазовая модуляция и $\theta_{sn}(t)$ - фазовый шум. Выходной сигнал задается как

$$I(t) = 2R\sqrt{P_s(t)P_{LO}} \cos\{\omega_{IF} t + \theta_s(t) + \theta_n(t)\}, \quad (9)$$

и мы можем определить комплексную амплитуду на $e^{j\omega_{IF}t}$ из уравнения (2.9) как

$$I_c(t) = 2R\sqrt{P_s(t)P_{LO}} e^{j\{\theta_s(t) + \theta_n(t)\}}, \quad (10)$$

где $\theta_n(t)$ - общий фазовый шум, приведенный как

$$\theta_n(t) = \theta_{sn}(t) - \theta_{LO}(t). \quad (11)$$

Следует отметить, что уравнение (10) эквивалентно комплексной амплитуде $A_s(t)$ оптического сигнала, за исключением увеличения фазового шума, возникающего из LO.

Гомодинные приемники. Гомодинное обнаружение относится к случаю, когда $\omega_{IF} = 0$. Ток фотодиода от гомодинного приемника становится

$$I(t) = 2R\sqrt{P_s(t)P_{LO}} \cos\{\theta_{sig}(t) + \theta_{LO}(t)\}. \quad (12)$$

Уравнение (12) означает, что гомодинный приемник измеряет внутреннее произведение между фазором сигнала и фазором LO, как показано на рис. 6. Для того, чтобы правильно декодировать символ, LO-фаза $\theta_{LO}(t)$ должна отслеживать фазовый шум $\theta_{sn}(t)$ передатчика таким образом, чтобы $\theta_n(t) = 0$. Эта функция реализуется оптическим фазоэлектрическим контуром (OPLL); однако на практике реализация такой петли не является простой и добавляет гомодинному обнаружению сложности конфигурации. Кроме того, уравнение (12) дает только косинусную составляющую (другими словами, синфазную составляющую относительно фазы LO), и синусоидальная составляющая (квадратурная составляющая) не может быть обнаружена. Поэтому гомодинные приемники этого типа не способны извлекать полную информацию о комплексной амплитуде сигнала.

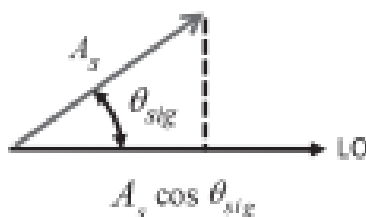


Рисунок 6. Фазорная схема сигнала и LO для обнаружения гомодина, которая измеряет внутреннее произведение между фазами сигнала и LO.

Цифровая обработка сигнала в когерентных приемниках. На рисунке 7 показана базовая концепция цифрового когерентного приемника. Сначала входящий сигнал обнаруживается линейно с помощью гомодинного приемника, включающего фазовую и поляризационную дивергенцию. С помощью этого приемника можно получить полную информацию об оптической несущей, а именно комплексную амплитуду и состояние поляризации. Такая комплексная амплитуда, измеренная приемником, преобразуется в цифровые данные с помощью АЦП и обрабатывается схемами DSP. Прогресс в повышении производительности, скорости и надежности интегральных схем в настоящее время делает цифровую обработку сигнала привлекательным подходом к восстановлению оптической комплексной амплитуды из обнаруженного гомодином базового сигнала.

Комбинация оптического IQ-модулятора и IQ-демодулятора реализует систему линейной оптической связи, как показано на рис.8. В передатчике мы определяем вектор на комплексной плоскости, используя два напряжения, возбуждающих IQ-модулятор. Этот вектор отображается на фазоре оп-

тической несущей через IQ-модулятор. Такая оптическая IQ-модуляция прекрасно восстанавливается посредством IQ-демодуляции, которая выполняется цифровым когерентным приемником.

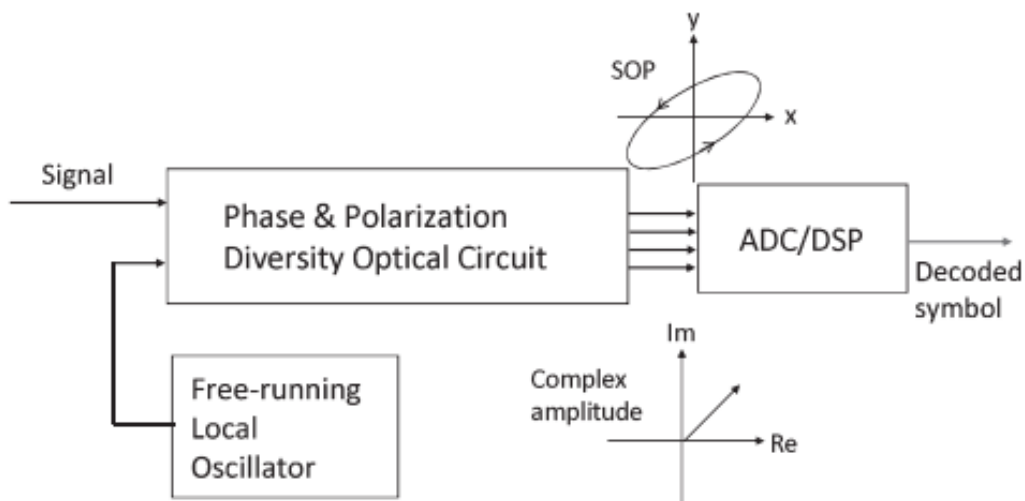


Рис. 7. Концепция цифрового когерентного приемника

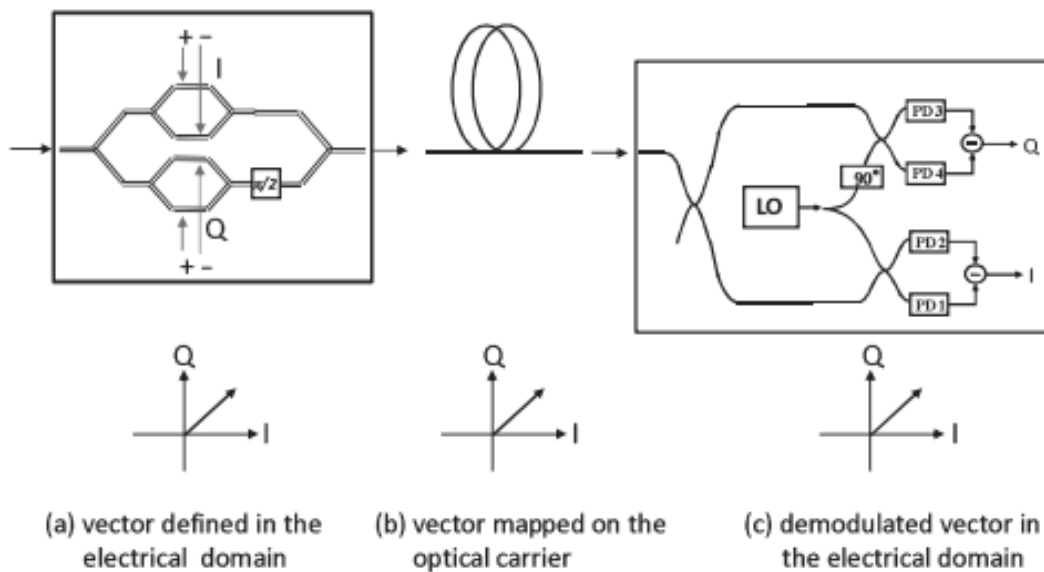


Рис. 8. Система линейной передачи.

Схема цифровой обработки сигналов обычно состоит из последовательности операций, показанной на рис.9, для извлечения информации из принятого сигнала.

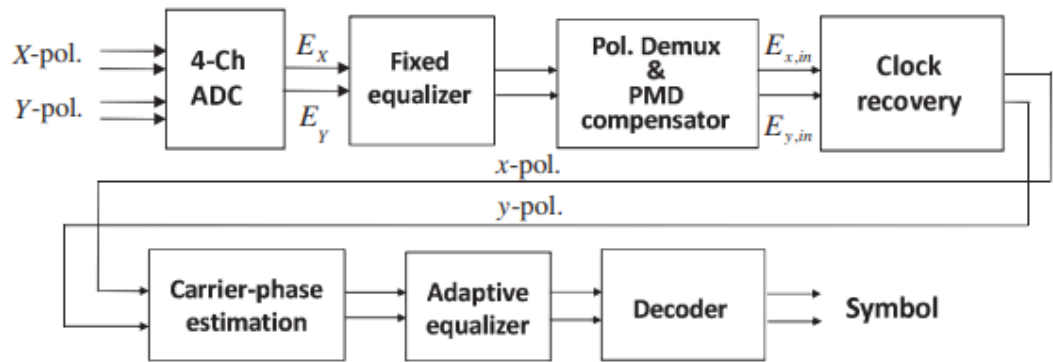


Рис. 9. Типичная последовательность обработки цифрового сигнала для декодирования символа.

Оптическая схема гомодинного приемника, включающая разнесения фаз и поляризации. Оптический 90-градусный гибрид может быть реализован в гомодинном приемнике с фазовым разделением частот с помощью оптических компонентов свободного пространства, как показано на рис. 10. [19,20].

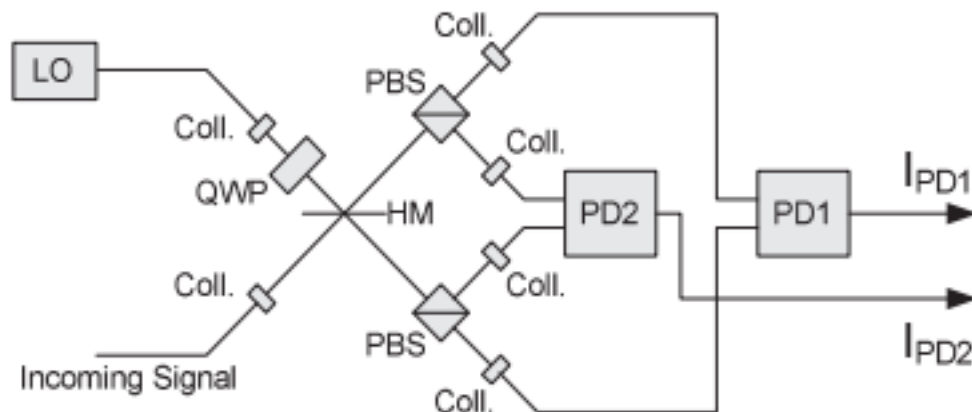


Рис. 10. Оптическая схема гомодинного приемника с фазовым разнесением. QWP: четвертьволновая пластина. PBS: поляризационный делитель луча. HM: поляризационно-независимое полупрозрачное зеркало, Coll.: коллиматор.

Оптическая схема приемника разнесения фазы/поляризации гомодина, состоящая из оптических компонентов свободного пространства, показана на рис. 11. В этом приемнике два гомодинных приемника фазового разнесения объединены с конфигурацией поляризационного разнесения. Входящий сигнал с произвольным SOP разделяется на две поляризационные компоненты с помощью поляризационного делителя луча (PBS).

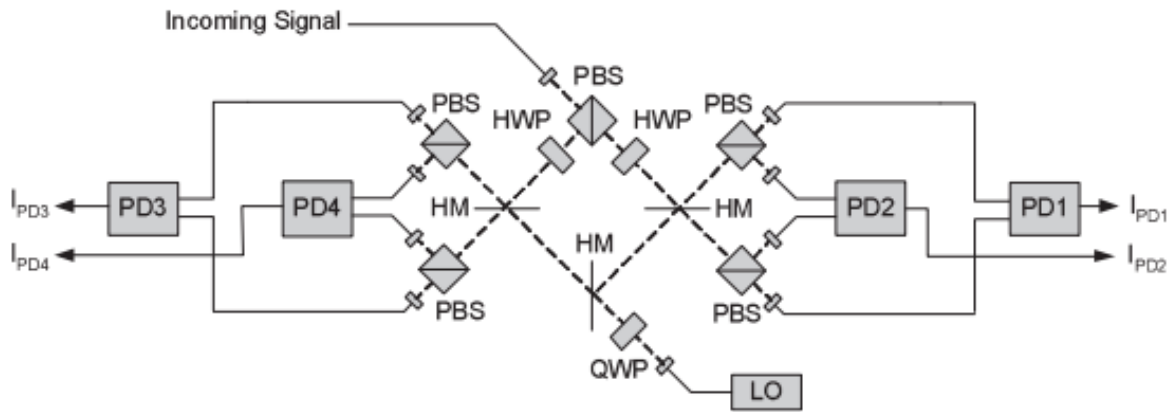


Рис. 11. Оптическая схема гомодинного приемника с разнесением фаз и поляризации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выпускной квалификационной работе была продемонстрирована работа в реальном времени приемников QPSK со скоростью 46 Гбит/с с двойной поляризацией, и следующей целью является работа на скорости 100 Гбит/с, которая направлена на передачу эфирных сигналов со скоростью 100 Гбит/с. Что касается автономных экспериментов, то была продемонстрирована спектрально эффективная передача с использованием форматов модуляции более высокого уровня, таких как 8QAM [36] и 16QAM [37]. Тем не менее, ниже перечислены технические проблемы, которые необходимо изучить и решить до того, как в будущем будет реализована практическая система когерентной оптической связи.

(1) Гибридная интеграция планарных световых цепей (ПЛЦ) для разнесения фаз и поляризации, двойных сбалансированных фотодиодов и гетеродина является важной технической задачей, которая позволяет снизить стоимость когерентного приемника и повысить стабильность системы.

(2) Настраиваемый гетеродин с узкой шириной линии по-прежнему является ключевым компонентом высокопроизводительного когерентного приемника.

(3) Высокоскоростная работа когерентного приемника основана на разработке высокоскоростных АЦП и ЦПС. Скорость обработки, позволяющая справляться с > 25 Гсимвол/с желательна для систем с эфиром 100 Гбит/с.

(4) В ядре DSP должна быть доступна более гибкая обработка сигналов, такая как расширенная прямая коррекция ошибок (FEC).

(5) При передаче на большие расстояния многоуровневых кодированных оптических сигналов нелинейность волокна в конечном итоге ограничивает производительность системы. Пост-компенсация нелинейности волокна [37], такие как самофазная модуляция (SPM), фазовая кросс-модуляция (XPM) и четырехволновое смешение (FWM) является важной проблемой.

Комбинация когерентного обнаружения и DSP обеспечивает новые возможности, которые были невозможны без обнаружения фазы оптического сигнала. Мы считаем, что возрожденная когерентная оптическая технология позволит обновить существующие оптические системы связи в ближайшем будущем.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. O.E. DeLange, Proc. IEEE 58, 1683 (1970)
2. T. Okoshi, K. Kikuchi, Electron. Lett. 16, 179 (1980)
3. F. Favre, D. LeGuen, Electron. Lett. 16, 709 (1980)
4. T. Okoshi, K. Kikuchi, A. Nakayama, Electron. Lett. 16, 630 (1980)
5. C. H. Henry, IEEE J. Quantum Electron. 18, 159 (1982)
6. Y. Yamamoto, IEEE J. Quantum Electron. 19, 34 (1983)
7. K. Vahala, A. Yariv, IEEE J. Quantum Electron. 19, 1096 (1983)
8. B. Glance, J. Lightwave Technol. LT-5, 274(1987)
9. Y. Yamamoto, IEEE J. Quantum Electron. QE-16, 1251(1980)
10. T. Okoshi, K. Emura, K. Kikuchi, R. Th. Kersten, J. Optical Commun. 2, 89 (1981)
11. T. Imai, Y. Hayashi, N. Ohkawa, T. Sugie, Y. Ichihashi, T. Ito, Electron. Lett. 26, 1407 (1990)
12. S. Norimatsu, K. Iwashita, K. Sato, IEEE Photonics Technol. Lett. 2, 374(1990)
13. J. Kahn, K.-P. Ho, IEEE J. Select. Topics on Quantum Electron. 10, 259 (2004)
14. R. Griffin, A. Carter, in Optical Fiber Communication Conference (OFC 2002), WX6, Anaheim, CA, USA, 17–22 March 2002
15. F. Koyama, K. Iga, J. Lightwave Technol. 6, 87 (1988)
16. S. Shimotsu, S. Oikawa, T. Saitou, N. Mitsugi, K. Kubodera, T. Kawanishi, M. Izutsu, IEEE Photonics Technol. Lett. 13, 364 (2001)
17. D. MacGhan, C. Laperle, A. Savchenko, C. Li, G. Mak, M. O'Sullivan, in Optical Fiber Communication Conference (OFC 2005), PDP27, Anaheim, CA, USA (6–11 March 2005)
18. S. Tsukamoto, D.-S. Ly-Gagnon, K. Katoh, K. Kikuchi, in Optical Fiber Communication Conference (OFC 2005), PDP29, Anaheim, CA, USA (6–11 March 2005)
19. D.-S. Ly-Gagnon, S. Tsukamoto, K. Katoh, K. Kikuchi, J. Lightwave Technol. 24, 12 (2006)
20. K. Kikuchi, IEEE J. Selected Topics on Quantum. Electron. 12, 563 (2006)
21. S. Tsukamoto, K. Katoh, K. Kikuchi, IEEE Photonics Technol. Lett. 18, 1131 (2006)
22. Tsukamoto, K. Katoh, K. Kikuchi, IEEE Photonics Technol. Lett. 18, 1016 (2006)
23. S. Tsukamoto, Y. Ishikawa, K. Kikuchi, in European Conference on Optical Communication (ECOC 2006), Mo4.2.1, Cannes, France (24–28 Sept. 2006)
24. S. J. Savory, Optics Express 16, 804 (2008)
25. H. Sun, K.-T. Wu, K. Roberts, Optics Express 16, 873 (2008)
26. L.E. Nelson, S.L. Woodward, M.D. Feuer, X. Zhou, P.D. Magill, S. Foo, D. Hanson, D. McGhan, H. Sun, M. Moyer, M.O'Sullivan, in Optical Fiber Communication Conference (OFC 2008), PDP9, San Diego, CA (24–28 Feb. 2008)
27. H. Hodgkinson, R.A. Harmon, D.W. Smith, Electron. Lett. 21 867 (1985)
28. F. Derr, Electron. Lett. 23 2177 (1991)
29. K. Kikuchi, S. Tsukamoto, J. Lightwave. Technol. 26, 1817 (2008)
30. R. Noé, in Opto-Electronics and Communications Conference (OECC 2004), 16C2-5, Yokohama, Japan (12–16 July 2004)
31. K. Kikuchi, LEOS Summer Topicals, TuC1.1, Acapulco, Mexico (21–23 July 2008)
32. D.N. Godard, IEEE Trans. Commun. 28, 1867 (1980)
33. S. Haykin, Adaptive Filter Theory (Prentice Hall, Englewood, 2001)
34. M. Oguma, Y. Nasu, H. Takahashi, H. Kawakami, E. Yoshida, in European Conference on Optical Communication (ECOC 2007), 10.3.3, Berlin, Germany (16–20 September 2007)

34. Y. Mori, C. Zhang, K. Igarashi, K. Katoh, K. Kikuchi, in European Conference on Optical Communication (ECOC 2008), Tu.1.E.4, Belgium, Brussels (21–25 Sept. 2008)
35. X. Zhou, J. Yu, M-F. Huang, Y. Shao, T. Wang, P. Magill, M. Cvijetic, L. Nelson, M. Birk, G. Zhang, S. Ten, H. B. Matthew, S. K. Mishra, in Optical Fiber Communication Conference (OFC 2009), PDPB4, San Diego, CA, USA (22–26 March 2009)
36. A. H. Gnauck, P. J. Winzer, C. R. Doerr, L. L. Buhl, in Optical Fiber Communication Conference (OFC 2009), PDPB8, San Diego, CA, USA (22–26 March 2009)
37. K. Kikuchi, *Opt. Express* 16, 889 (2008)