Долой лаг

Ч

етырехфазный электрооптический модулятор. Современный мир тяжело представить без современных коммуникационных технологий, позволяющих людям из разных уголков планеты, к примеру, общаться по видео связи в режиме реального времени. Для нас этот пример кажется вполне обыденным, но еще несколько десятков лет назад подобное казалось чем-то невероятным. Если же пойти еще дальше в прошлое, то о таком могли говорить исключительно писатели-фантасты. Тем не менее какой бы крутой технология ни была, она так или иначе сопряжена с проблемами. Если речь идет о коммуникации, т. е. передаче данных, одной из самых раздражающих проблем (особенно для геймеров) является лаг, т. е. задержка. Ученые из университета Центральной Флориды (США) разработали устройство, которое способно сделать передачу данных по оптоволокну более эффективной и быстрой, избавив ее от лагов. Из чего сделано устройство, какой принцип его работы, и насколько оно эффективно? Ответы на эти вопросы мы найдем в докладе ученых.

**Основа исследования**

Оптоволоконная связь является фундаментом современного цифрового мира. Основные компоненты таких линий связи — оптическое волокно, полупроводниковый лазер, оптический модулятор и фотоприемник — налагают ограничения на полосу пропускания и эффективность передачи данных. Три наиболее фундаментальных ограничения в оптической связи связаны с дисперсией волокна, лазерным шумом и нелинейностью волокна. При передаче аналоговых сигналов линейность электрооптического (EO от electrooptic) модулятора также имеет первостепенное значение. В рассматриваемом нами сегодня труде ученые описывают электрооптический модулятор (EOM от electrooptic modulator), который решает две из этих проблем, а именно дисперсию волокна и лазерный шум. В частности, модулятор устраняет дисперсию и синфазные шумы, такие как шум относительной интенсивности (RIN от relative intensity noise), предоставляя несколько разнородных выходных сигналов, которые обрабатываются посредством простой цифровой обработки.

Хроматическая дисперсия оптических волокон приводит к дисперсии групповой скорости (GVD от group-velocity dispersion), которая приводит к уширению оптических импульсов во временной области, а это приводит к межсимвольной интерференции. Это накладывает ограничение на максимальную скорость передачи данных, которая может передаваться при заданной длине волокна. Дисперсию можно уменьшить с помощью компенсации оптической дисперсии, электронного выравнивания или их комбинации.

Основным механизмом появления шума в полупроводниковых лазерах является спонтанное излучение со случайным фазовым вкладом, приводящее к RIN и к ухудшению отношения сигнал/шум (SNR от signal-to-noise ratio) на стороне приемника.

Основными достоинствами любой системы оптической связи являются полоса пропускания и чувствительность. Несмотря на ограничения скорости передатчика и приемника, полоса пропускания в первую очередь ограничивается эффектом затухания частоты из-за потери дисперсии. В типичном оптическом канале или приборе с растяжением во времени чувствительность ограничивается лазерным RIN или тепловым шумом приемника. Что касается потерь ввиду дисперсии, то существует два основных метода их уменьшения, а именно односторонняя полосовая модуляция (SSB от single-side band modulation) и фазовое разнесение.

ЭТО РЕКЛАМА ПО СРЕДИ ТЕКСТА ПОКУПАЙТЕ НАШИ ТОВАРЫ ПОЖАЛУЙСТА КУПИТЕ НАШИ ТОВАРЫ ИНАЧЕ МЫ РАЗОРИМСЯ

Метод SSB сложно реализовать на практике, поскольку он очень чувствителен к несоответствию путей прохождения сигналов в оптическом гибриде. Между тем, чтобы смягчить RIN, можно использовать дифференциальную двухтактную модуляцию. Как отмечают ученые, основная цель их труда заключается в создании модулятора, способного одновременно обеспечивать как фазовое разнесение, так и дифференциальную модуляцию.

Проблема в том, что существующие структуры EOM не способны одновременно обеспечивать фазовое разнесение и дифференциальные функциональные возможности. Оба требуют конструкции с двумя выходами, но фазовое разнесение традиционно основано на одном электроде, тогда как дифференциальный режим требует конструкции с двумя электродами.

Оптические модуляторы являются ключевыми устройствами в любой системе связи или обработки сигналов. Фазовая и амплитудная модуляции являются двумя фундаментальными механизмами создания таких устройств. Эффект Поккельса (например, в ниобате лития (LiNbO3) и полимерах) и эффект плазмы свободных носителей заряда (в основном в кремнии) обычно используются для фазовой модуляции, тогда как квантово-размерный эффект Штарка (например, в кремний-германий и композитных полупроводниках) обычно используется для амплитудной модуляции. Интерферометры Маха-Цендера (MZI от Mach-Zehnder interferometer) и микрокольца обычно используются для преобразования фазовой модуляции в модуляцию интенсивности.

В последние годы сообщалось о значительных улучшениях в характеристиках оптических модуляторов на различных материальных платформах и структурах. Например, полоса пропускания модуляции в субтерагерцовом диапазоне обнаружена в тонкопленочных MZI из ниобата лития (TFLN от thin-film lithium niobate). Кроме того, кремниевые модуляторы продемонстрировали впечатляющий прогресс: заявленная скорость передачи данных превышает 100 Гбит/с, а эффективность модуляции ниже 1 В/см.

Усовершенствованные когерентные каналы связи полагаются на такие форматы модуляции, как квадратурная фазовая манипуляция (QPSK от quadrature phase shift keying). Как показано на 1a, оптический модулятор QPSK состоит из двух вложенных друг в друга MZI, за которыми следует фазовый модулятор. Это обеспечивает желаемую π/2 разность фаз между синфазной и квадратурной составляющими оптического сигнала. Модулятор QPSK с двойной поляризацией (DP от dual-polarization) способен использовать преимущества двух ортогональных направленных мод в оптических волокнах, хотя и с более сложной оптической архитектурой (1b).

Несмотря на все преимущества, ни один из этих модуляторов не предлагает фазового разнесения, чтобы компенсировать потери от дисперсии волокна. Они также не обеспечивают дифференциальную модуляцию для подавления синфазного шума. Потому ученые и решили создать свой модулятор, способный выполнять обе функции. Ученые назвали его четырехфазным электрооптическим модулятором (FEOM от four-phase electrooptic modulator).

Концепция FEOM показана на 1c. Он состоит из двух одноприводных модуляторов Маха-Цендера (MZM от Mach-Zehnder modulator) с двумя выходами, вложенных в другой MZM. Также показаны четыре выхода синфазной (I), противофазной (Ī), квадратурной (Q) и обратной квадратурной (Ǭ) составляющих. Модулятор придает разность фаз π между компонентами I и Ī (аналогично Q и Ǭ), что позволяет обеспечить дифференциальную работу. Впоследствии FEOM инициирует разность фаз π/2 между наборами компонентов {I, Ī} и {Q, Ǭ}, что облегчает реализацию операции разнесения фаз. Более того, два модулятора работают в одной и той же квадратурной точке.

Следует отметить, что термины «синфазный» и «квадратурный» имеют разные определения в мо­дуля­торах FEOM и QPSK. В FEOM они связаны с двумя из четырех выходных компонентов, тогда как в модуляторах QPSK они относятся к двум независимым входам субмодуляторов. FEOM име­ет только один вход для кодирования данных, что, по-видимому, снижает скорость передачи данных вдвое по сравнению с модулятором QPSK при идентичных скоростях передачи данных. Тем не ме­нее способность FEOM удалять нули, вызванные дисперсией, в частотной характеристике приводит к значительно более высокой эффективной полосе пропускания и, следовательно, к более высокой скорости передачи данных. Кроме того, FEOM способен подавлять общий лазерный шум и улучшать соотношение сигнал/шум, что значительно снижает коэффициент битовых ошибок (BER от bit error rate) по сравнению с модуляторами QPSK. Как показано на 1d, поляризация управляемых мод мо­жет быть использована для модификации архитектуры FEOM для получе­ния только одного выход­но­го канала для‑телекоммуникационных прило­жений.

Учитывая использование нескольких вложенных интерферометров в одном устройстве, FEOM лучше всего реализовать на интегрированной оптической платформе и, в идеале, на такой, которая обеспечивает чистый EO-эффект (в отличие от электропоглощения или их комбинации). По мнению ученых, TFLN — идеальная платформа для реализации такой схемы. LN (ниобат лития) — широко известный материал благодаря своим сильным электро- и нелинейно-оптическим свойствам. Оп­тические волноводы, изготовленные по этой развивающейся тонкопленочной технологии, обла­дают непревзойденными свойствами по сравнению с традиционными волноводами с диффузией титана или протонным обменом. FEOM, показанные на 1c, были спроектированы и изготовлены на базе TFLN.

| **Лабораторная работа № 3** | | | | | | | | | | | | |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Заголовок 1** | | | **Заголовок 2** | | | **Заголовок 3** | | | | | | |
| Заголовок 4 |  |  |  |  |  | |  |  | |  | |  |
|  |  |  |  |  | |  |  | | |  |  |
|  |  |  |  |  | |  |  |  | | |  |
| Заголовок 5 |  |  |  |  |  |  | |  |  | | |  |
|  |  | |  |  |  | |  |  | | |  |
|  |  |  |  |  |  | |  |  | | |  |
| Заголовок 7 |  |  |  |  |  |  | |  |  | | |  |
|  |  |  |  |  |  | |  |  | | |  |
|  |  |  |  |  |  | |  |  | | |  |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 356 | 435 | 333 |
| 126 | 3 | 6 |
| 78 | 0 | 1 |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 77 | 46 | 23 |
| 2 | 11 | 53 |
| 4 | 0 | 2 |
| 83 | 45 | 27412 |