Оптическое гетеродинирование

Оглавление

[Введение 1](#_Toc132290892)

[Простейший случай: два одночастотных источника 2](#_Toc132290893)

[Простой случай: одночастотный ЛО и двухчастотный сигнал 3](#_Toc132290894)

[Общий случай: два неодночастотных сигнала 3](#_Toc132290895)

[Кратко: 3](#_Toc132290896)

[Подробно: 4](#_Toc132290897)

[Результат: 5](#_Toc132290898)

[Разрешение 6](#_Toc132290899)

[Примеры 6](#_Toc132290900)

[Гетеродинирование с бесконечно узким локальным осциллятором 6](#_Toc132290901)

[Гетеродинирование одночастотного сигнала 6](#_Toc132290902)

[Гетеродинирование лоренцовского контура с лоренцовским 6](#_Toc132290903)

[Как избавиться от сигнала биений интенсивности сигнала? 6](#_Toc132290904)

[Ослабление исследуемого сигнала 6](#_Toc132290905)

[Использование балансной схемы 6](#_Toc132290906)

[Применения 6](#_Toc132290907)

[Измерения динамики мгновенного спектра методом оптического гетеродинированием 7](#_Toc132290908)

[Анализатор оптического спектра на перестраиваемом гетеродине 7](#_Toc132290909)

[Про скорость перестройки и ширину фильтра: 7](#_Toc132290910)

[Измерение фазы и когерентное детектирование 8](#_Toc132290911)

[Доплеровские измерители, лидары и т.д. Изучение атмосферы. 9](#_Toc132290912)

[Гомоденирование 9](#_Toc132290913)

[Список литературы 10](#_Toc132290914)

[Демонстрации 10](#_Toc132290915)

[Два одночастотных лазера 10](#_Toc132290916)

[Два одночастотных лазера с модуляцией частоты. 11](#_Toc132290917)

[Два одночастотных лазера с модуляцией фазы. 11](#_Toc132290918)

[Одночастотный лазер с движущимся зеркалом(???) 11](#_Toc132290919)

# Введение

Исторически термин «гетеродинирование» возник в радиотехнике для обозначения процесса преобразования частоты радиосигнала при его квадратичном детектировании с более мощным опорным сигналом. Практически все современные радиоприемные устройства строятся по этому принципу и настолько прочно вошли в обиход, что даже трудно вспомнить, когда появились первые гетеродинные приемники (согласно Википедии, в 1920 гг.).

Этот способ мигрировал из радиофизики в оптику, после того как появились лазеры.

Лазерное гетеродинирование основано на нелинейности фотодетектора по отношению к полю излучения. Если сумма двух гармонических сигналов подвергается нелинейному преобразованию (в частности, квадратичному), то в результате появляются гармоники как с суммарными, так и с разностными частотами. Детектирование оптического сигнала есть не что иное, как квадратичное преобразование поля излучения. Поэтому естественно ожидать, что при одновременном детектировании двух оптических сигналов с различными частотами на выходе фотодетектора возникнет электрический сигнал на разностной частоте.

Уже в 1947 г. Г. С. Горелик в СССР и А. Форрестер в США высказали предложение об использовании гетеродинирования для спектроскопических исследований. Однако осуществить такой эксперимент оказалось далеко не просто, поскольку яркость традиционных источников света была слишком мала. Ситуация коренным образом изменилась с появлением лазеров. Уже в 1961 г. в экспериментах с первым гелий-неоновым лазером удалось наблюдать биения между его модами.

Дальнейшее расширение областей применения лазерного гетеродинирования связано главным образом с созданием надежных высокостабильных лазеров с узкой спектральной линией. Фундаментальные исследования в этой области были выполнены В. С. Летоховым и В. П. Чеботаевым и их американским коллегой Ч. Фридом. [1].

Лазерное гетеродинирование не только имеет высокую чувствительность обнаружения, но и обладает превосходной частотной селективностью, поскольку процесс когерентного детектирования преобразует оптический спектр в радиочастотную область. Анализ оптического спектра, например, с использованием перестраиваемого лазера и гетеродинирования становится популярным, поскольку в последние годы стали широко доступны перестраиваемые полупроводниковые лазеры с широким диапазоном непрерывной перестройки и высокой скоростью сканирования длины волны. Из-за узкой ширины линии перестраиваемых лазеров на субмегагерцовом уровне, может быть получено беспрецедентное спектральное разрешение.

# Простейший случай: два одночастотных источника



**Будем считать, что поляризации одинаковые.** *Также здесь мы посчитали, что волновые фронты полностью совпадают (волоконное исполнение, и волокна с поддержкой поляризации). Если не так, то еще надо учесть угол между волновыми фронтами.*

Тогда

и сигнал на фотодетекторе

Фототок

(1)

где .

**Сигнал осциллирует во времени с разностной частотой. Измеряя эту частоту, можем определить частоту падающего сигнала, если знаем частоту локального осциллятора. Кроме того, используя мощный локальный осциллятор, можем измерять слабые сигналы.**

**Пример1.** Возьмем два лазера с длиной волны 1550 нм и 1550.001 нм. Какая будет частота биений?

# Простой случай: одночастотный ЛО и двухчастотный сигнал

Пусть

(2)

Во-первых, будут сигналы биений двух компонент исследуемого сигнала. Они могут затруднять анализ интерференции. Во-вторых, будут биения между локальным осциллятором и обеими компонентами сигнала – интересующий нас сигнал. Сигнал биений внутри исследуемого сигнала можем убрать (см. ниже).

Тогда преобразование Фурье от сигнала даст нам два пика на разностных частотах, амплитуда которых пропорциональна и . Таким образом, квадраты фурье-компонент будут пропорциональны , т.е. оптическому спектру такого двухчастотного излучения

# Общий случай: два неодночастотных сигнала

По аналогии с (Протопопов, Лазерное Гетеродинирование, пункт 1.2.1)

### Кратко:

Квадрат фурье от интерференционного члена - произведения двух функций и косинуса - есть свертка от оптических спектров со сдвигом по частоте:

=

,

Где – оптический спектр сигнала, – аналогично.

### Подробно:

Для простоты опустим коэффициент деления (пусть он будет 50%). Запишем неодночастотные поля сигнала и локального оциллятора как

Здесь мы учли, что и поляризации могут поворачиваться или даже быть случайным. – несущие (т.е. «центральные») частоты

Но измеряем мы не мгновенный, а усредненный по временам, много большим, чем периоды оптических колебаний.

(3)

Здесь учли, что, как правило, и оказываются независимыми случайными функциями. Поэтому при нахождении среднего значения их произведения можно в отдельности подвергать усреднению члены, содержащие в (t) и А(t), а затем производить перемножение результатов. **В дальнейших выводах мы не будем учитывать корреляторы , но будем помнить, что все выводы распространяются только на согласованные поляризации** (т.е. ). Если поля сигнала и локального осциллятора статистически независимы (например, они оба сильно широкополосные), то в третьем члене может получиться и 0! Так как .

Тем не менее, мы будем мерять не усредненный по большим временам ток, а спектр электрической мощности (например, с помощью радиочастотного спектрального анализатора или с помощью осциллографа и БПФ с последующего возведения в квадрат фурье-компонент).

Спектральный состав тока выведем через вычисление корреляционной функции и теорему Винера-Хинчина .

Запишем корреляционную функцию с использованием (2)

Здесь добавили еще шумы на фотодетекторе n(t).

(4)

Поля сигнала и локального осциллятора статистически независимы, поэтому здесь переписали .

Предположим для простоты, что (это не уменьшит общности полученных результатов). Оставим только линейные члены по . Будем считать все случайные поля стационарными. Слагаемые занулятся при усреднении по времени за счет экспоненты . Среднее от шума .Зеленым отмечены члены, которые не занулятся.

*(5)*

где , - функции автокорреляции интенсивности локального осциллятора, интенсивности поля, и шума соответственно, , , – функции автокорреляции полей.

Радиочастотный спектр интенсивности фототока

*(6)*

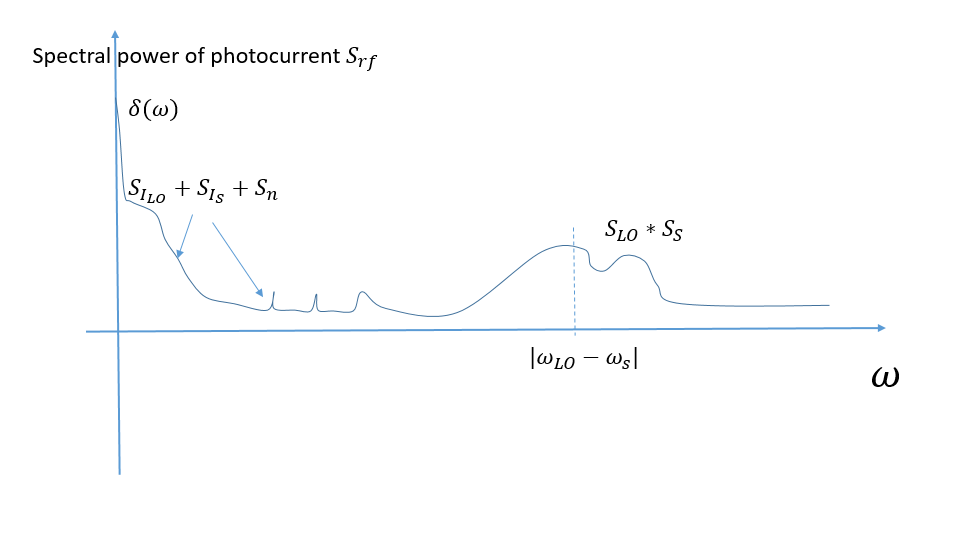
Здесь – это спектр интенсивности фототока, создаваемого локальным осциллятором, – аналогично, спектр интенсивности сигнала, –спектр шумов системы (обычно он широкополосный, и может содержать какие-то резонансы)

Перепишем слагаемые, составляющих предпоследнюю сумму в формуле (6).

Таким образом,

(7)

### Результат:



Т.е. в **радиочастотном спектре интенсивности фототока** в области вблизи разностной частоты возникает вклад, пропорциональный **свертке оптических спектров локального осциллятора и сигнала.**

Обратите внимание, что как минимум у малых частот возник член, пропорциональный =, и, аналогично, . Вообще говоря, эти члены могут проявиться и в произвольной части радиочастотного спектра. Кроме того, поскольку в выражении (7) есть еще и шумовой ток на фотодетекторе, то возникают шумы на нулевых частотах из-за фликкер-шума, а также ненулевая подложка во всем спектре фототока.

## Разрешение

Разрешение , таким образом, складывается из ширины спектра локального осциллятора и точности определения спектра биений (неточности выполнения преобразования Фурье, определяется соотношением неопределенности, и может быть уменьшено сколь угодно для стационарных процессов). Например, для одночастотных лазеров на длине волны 1550 нм с эффективной шириной линии 1 МГц предельное разрешение составит =2.5\*108.

## Примеры

### Гетеродинирование с бесконечно узким локальным осциллятором

Если ЛО – дельта функция (огибающая имеет спектр ()), то получим сдвинутый на спектр огибающей исследуемого сигнала

### Гетеродинирование одночастотного сигнала

Наоборот, дельта-функция исследуемого сигнала превратится в спектр локального осциллятора.

### Гетеродинирование лоренцовского контура с лоренцовским

Ширины складываются при свертке лоренцовских контуров.

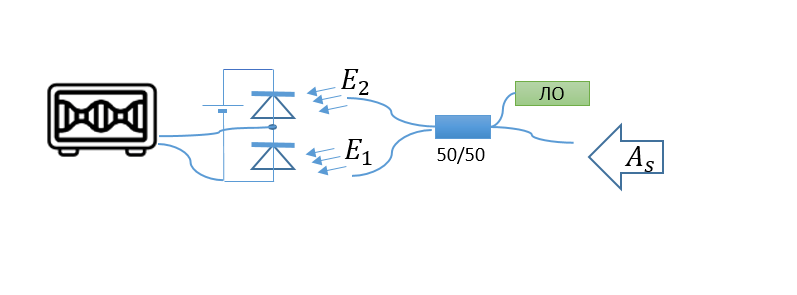
# Как избавиться от сигнала биений интенсивности сигнала?

## Ослабление исследуемого сигнала

Например, если в (2) уменьшить , то в изменяющемся сигнале останется только интересующий нас интерференционный член.

## Использование балансной схемы

Можем воспользоваться балансной схемой. Целью использования сбалансированного когерентного детектирования является минимизация компонент фототока, связанных с и улучшение отношения сигнал/шум при измерении.



И тогда фототок

# Применения

Важный плюс – увеличивая мощность локального осциллятора, увеличиваем фототок. Т.е. можем измерять даже слабые сигналы. Это и в радио используется.

Применений много, они множатся с большой скоростью. Приведем несколько примеров

## Измерения динамики мгновенного спектра методом оптического гетеродинированием

Пусть исследуемый сигнал имеет спектр, который меняется со временем, причем на малых временах. Возьмем локальный осциллятор с длиной волны, близкой к центральной длине волны спектра сигнала.

Спектр фототока оптических биений будем измерять не с помощью медленного анализатора радиочастотного спектра, а с помощью быстрого осциллографа и БПФ. Применяя оконное преобразование Фурье с шириной окна к измеренной с помощью осциллографа временной динамике фототока , и возводя результат в квадрат, получим где – положение центра окна преобразования Фурье. Т.е. спектр фототока, а значит, и спектр сигнала, в зависимости от времени.

Временное разрешение связано со спектральным разрешением , хотя может быть и меньше, если окно сдвигать каждый раз на доли .

Область спектра сигнала , доступная для измерения, будет определяться способностью осциллографа воспринимать такие частоты. Т.е. (для топовых осциллографов)

Длительность, доступная для измерения, будет определяться стабильностью локального осциллятора и доступной памятью осциллографа.

Кроме того, нужно учитывать эффекты, связанные с работой АЦП и БПФ – элайзинг и т.д.

## Анализатор оптического спектра на перестраиваемом гетеродине



В схеме используется обычно балансный фотодетектор. После балансного фотодетектора ставится фильтр низких частот, который также влияет на разрешение.

### Про скорость перестройки и ширину фильтра:

В гетеродинном АС, использующем гетеродин с качанием частоты, важным аспектом является преобразование измеренной формы волны фототока, зависящей от времени, в спектр оптической мощности; это преобразование зависит от скорости развертки частоты гетеродина. Обратите внимание, что разрешение когерентного анализатора определяется шириной линии гетеродина и полосой пропускания фильтра приемника. При выборе полосы пропускания фильтра нижних частот следует учитывать частоту развертки гетеродина. Если предположить, что частота сканирования гетеродина равна γ ГГц / с, а желаемое когерентное разрешение по частоте АС равно Δf, то временной интервал сканирования по ширине полосы разрешения равен:

Т.е., чтобы фототок с таким характерным временем изменения прошел через фильтр низких частот, полоса фильтра должна быть не слишком маленькой

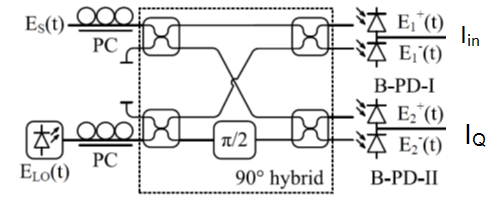
Для измерения широкополосного оптического сигнала когерентное детектирование со сканирующим лазером эквивалентно узкополосному сканирующему оптическому фильтру. Спектральная плотность мощности сигнала может быть получена путем непрерывного сканирования частоты гетеродина в интересующем диапазоне частот.

# Измерение фазы и когерентное детектирование

С помощью оптического гетеродинирования можно измерять динамику комплексного поля , т.е. и амплитуду и фазу, которая набегает у огибающей. Этот подход **используется в современных телекоммуникационных оптических линиях**, в которых сигнал кодируется не только в амплитуде, но и в фазе оптического импульса. Также этот подход может быть использован для анализа произвольных оптических сигналов.

Для этого используется специальное устройство: оптический гибрид 900: сигнал сбивается и с локальным осциллятором, и с его репликой, задержанной на

Пусть исследуемое оптическое поле



Здесь

После балансных фотодетекторов, измеряющих разность сигналов, получается

Сигнал синфазный , квадратурный

Т.е. вычисляем и амплитуду , и фазу . Чтобы найти , необходимо выполнить развертку , а затем вычесть линейную компоненту .

Скорость определяется только скоростью осциллографа. Кроме того, нужен стабильный LO!

## Доплеровские измерители, лидары и т.д. Изучение атмосферы.

Сигнал сбивается с ним же, получившим доплеровскую отстройку. По гетеродинному сигналу определяется доплеровская отстройка и скорость.

**Пример2.** Сбиваем лазер с сигналом того же лазера, но рассеянного на мишени, летящей со скорость 1 км/ч. Какая будет частота биений гетеродинного сигнала?

# Гомоденирование



Из [2]

Метод гомодинирования - частный случай гетеродинирования, в котором в качестве локального осциллятора выступает измеряемый же сигнал. Метод гомодинирования используется для измерения ширины спектра узкополосных лазерных источников.

При реализации метода желательно, чтобы потерялась когерентность между двумя плечами, т.е. разность хода должна быть очень большой. Иначе – получаем интерферометр Маха-Цандера в практически когерентном режиме, на выходе из которого сигнал не будет давать никакой нетривиальной временной зависимости.

Достаточная разность хода осуществима не для всех спектральных ширин. Например, для 10 кГц – 30 км в воздухе или 20 км в волокне. Вообще говоря, степень «достаточной длины» в конкретном случае, может быть сложным вопросом.

Если нет когерентности – работает случай, который рассмотрен выше: два случайных нескоррелированных сигнала дадут спектр, равный свертке спектров.

и спектр интенсивности фототока будет заключать в себе вклад **,** что дляслучая лоренцевского контура с шириной даст также лоренцовский контур с шириной 2



Удобно измерять в схеме гомодинирования со сдвигом частоты излучения в одном из плеч некоторым частотным модулятором. Тогда последний член, определяющийся шириной линии, будет на другой частоте, и его можно будет отделить в радиочастотном спектре фототока :

Это позволяет увести спектр свертки от нулевых частот, т.е. от высоких фликкер шумов 1/f на нулевых частотах и паразитного вклада спектра интенсивности фототока .

Самым популярным преобразователем частоты для этой цели является акустооптический модулятор частоты (AOFM). Частотный сдвиг AOFM вводится взаимодействием между световым сигналом и радиочастотным сигналом бегущей акустической волны с перпендикулярным волновым вектором. Упрощенное объяснение состоит в том, что частота светового сигнала смещается движущейся решеткой, создаваемой бегущей звуковой волной из-за эффекта Доплера. В отличие от обычного частотного модулятора, который часто создает две боковых частоты с большей и меньшей частотой, AOFM сдвигает оптическую частоту сигнала только в одном направлении. Еще одно уникальное преимущество AOFM - это его поляризационная независимость, которая желательна для практического измерения ширины линии на основе волоконно-оптической системы.

Наконец, отметим, что даже если разница плеч недостаточна для **полной** потери когерентности, измерения проводить тем не менее можно – но требуется более аккуратный прямой учет времен когерентности и т.д., см. например, [3]

# Список литературы

|  |  |
| --- | --- |
| [1] | У. Н. Протопопов В.В., Лазерное гетеродинирование, Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1985. |
| [2] | S. Hui, Fiber Optic Measurement Techniques, 2009 . |
| [3] | T. H., «Simple technique for improving the resolution of the delayed self-heterodyne method,» *Opt. Lett. ,* pp. 15 (11), 640, 1990. |

# Демонстрации

## Два одночастотных лазера

Собрать схему из двух перестраиваемых одночастотных лазеров, волоконного ответвителя с поддрежкой поляризации, быстрого фотодетектора и осциллографа.

* Посчитать, насколько должны отличаться длины волн этих лазеров
* Демонстрация постоянности сигнала на осциллографе для одного лазера
* Демонстрация синусоидального сигнала биений для случая, когда оба лазера включены.
* Демонстрация изменения шага синусоиды при тонкой подстройке одного из лазеров
* Обратить внимание на уменьшение амплитуды интерференционного сигнала при увеличении частотной отстройки больше полосы пропускания осциллографа.
* Изменить поляризацию падающего на фотодетектор излучения одного из лазеров (например, вставив в соответствующее плечо волоконного ответвителя кусок волокна без поддержки поляризации). Показать влияние поляризации на видность интерференции
* Оценить ширину спектра генерации лазеров

## Два одночастотных лазера с модуляцией частоты.

Один из лазеров должен иметь опцию быстрой перестройки внешним сигналом. Собрать схему из двух перестраиваемых одночастотных лазеров, волоконного ответвителя с поддержкой поляризации, быстрого фотодетектора и осциллографа, а также задающего генератора.

* Демонстрация синусоидального сигнала биений для случая, когда оба лазера включены.
* Подача управляющего сигнала для частотной модуляции одного из лазеров. Построение спектрограммы и наглядная демонстрация процесса перестройки сигнала биений.
* Показать, что даже если один из лазеров сильно задавлен по мощности, то интерференционную картину и динамику спектра все равно можно наблюдать.

## Два одночастотных лазера с модуляцией фазы.

Собрать схему из двух перестраиваемых одночастотных лазеров, волоконного ответвителя с поддержкой поляризации, быстрого фотодетектора и осциллографа, а также задающего генератора и электрооптического модулятора фазы.

* Демонстрация синусоидального сигнала биений для случая, когда оба лазера включены.
* Подача управляющего сигнала для модуляции фазы на электрооптическом модуляторе. Построение спектрограммы и наглядная демонстрация появления боковых частот в оптическом спектре.
* Показать, что даже если один из лазеров сильно задавлен по мощности, то интерференционную картину и динамику спектра все равно можно наблюдать.

## Одночастотный лазер с движущимся зеркалом(???)

Собрать схему из одного перестраиваемого одночастотного лазера, включенного в схему с интерферометром майкельсона и вращающимся зеркалом.