**Компенсация аберраций в спектральной ОКТ**

**Декорреляция изображения по известной ФИТ.**

Проблема компенсации аберраций в ОКТ давно известна. В последнее время предложен ряд численных методов, позволяющих компенсировать влияния аберраций без использования аппаратной коррекции. Впервые такая возможность была продемонстрирована in-vivo с помощью en-face TD-OCT установки [ссылка]. Также были работы с использованием line-field OCT, SS-FF-OCT. В работе [Боппарт 2018], использовалась классическая, но высокоскоростная SD-OCT, правда совместно с классической адаптивной оптикой.

Обычно предполагается, что ухудшение изображения вызвано искажениями, внесенными в Фурье области. В этой модели аберрированная ATF отличается от безаберационной фазовым множителем .

Рассмотрим упрощенную схему получения ОКТ изображения в сканирующей системе (рисунок 1). Излучение выходит из волокна слева, фокусируется в плоскости 3. Затем рассеянное назад излучение возвращается обратно в волокно. Для удобства схема отражена относительно центральной линии (пунктирная линия в плоскости 3).

|  |
| --- |
|  |
| 1 |

В сканирующих ОКТ-системах регистрируется скалярное произведение поля с модой волокна на его торце. В полнопольных ОКТ-системах можно пренебречь искажениями освещающего волнового фронта, что нельзя сделать в сканирующих системах.

Представим, что на оси Z в плоскости 3 находится точечный рассеиватель и поле подсветки всегда одинаково. Рассеиватель имеет собственную фазу и излучает приближенно сферическую волну. Ее интенсивность пропорциональна интенсивности поля подсветки.

Сферическая волна коллимируется линзой в плоскости 4, где и вносятся искажения. Далее профиль сфокусированного и искаженного изображения точечного рассеивателя регистрируется в плоскости 6. Можно это представить, как сдвиг регистрирующего волокна в этой плоскости.

В реальности же точечный рассеиватель освещается каждый раз с разной интенсивностью из-за аберраций в плоскости 2. Тем самым элементы PSF, зарегистрированные в плоскости 6, будут домножены на некоторую действительную функцию. Это приводит к модуляции интенсивности в плоскости 4. Тем самым необходимо корректировать не только фазу OTF, но и ее амплитуду.

Поэтому предполагать, что в некоторой плоскости искажается только фаза поля – нельзя. В OTF присутствует также амплитудный множитель. На рисунке 2 представлены симулированные амплитуда и фаза OTF. Можем видеть, что амплитуда искажается весьма значительно.

Так как освещение рассеивателя теперь неравномерно, то и соотношение сигнал/шум для разных элементов PSF (а значит и для разных компонент OTF), будет разным. Это вносит дополнительные необратимые искажения сигнала.

|  |
| --- |
|  |
| 2  Реализация PSF, амплитуда OTF, обратная фаза OTF |

На рисунке 3 представлены амплитуды и фазы реальных ОКТ изображений.

|  |
| --- |
| d)  c)  b)  a) |
| 3  *Изображение USAF мишени, полученное через модель глаза и его Фурье в случаях: а) без аберраций b) с аберрациями в виде кривого стекла с) без аберраций, но уже немного другое место d) с аберрациями в виде аберратора специальной формы* |

В сканирующих ОКТ системах регистрируется не поле, рассеянное назад от объекта, а. Изображение получается попиксельно. В FF системах плоскость внесения аберраций и плоскость изображения, как правило, является фокальными плоскостями объектива, поэтому предположение выше – справедливо. Для сканирующих систем это не так, поэтому, вообще говоря, искажения в ATF могут иметь не только фазовый, но и амплитудный характер. Это означает, что для получения скорректированного изображения придется искать не только фазу, но и некоторое преобразование амплитуды, которое позволит исправить получающееся изображение.

**ФРТ и декорреляция изображения**

Первым этапом была найдена обратная ATF (amplitude transfer function) и получено декоррелированное изображение. Работает эта история хорошо.

|  |
| --- |
|  |
| a) Абррированная точка, b) компенсируется только фаза, c) амплитуда и фаза, d) амплитуда ATF e) фаза обратной ATF f) Амплитуда обратной ATF |

Далее были протестированы методы PGA и оптимизационный для подбора ATF и декорреляции изображения.

|  |
| --- |
|  |
| Верхняя строчка – компенсация оптимизационным методом.  Нижняя – декоррелированная точка с использованием PGA и фильтрации Виннера, амплитуда и фаза корректирующей ATF. |

Ни тот ни другой метод, на данном этапе, не могут дать удовлетворительного результата. Во втором методе видны ошибки, по-видимому, из-за апсемплинга.

**Дополнительная регуляризация и подавление шумов.**

Для дополнительной регуляризации были использовано: разложение амплитуды ATF по полиномам Гаусса-Эрмита, разложение фазы по полиномам Цернике. Это позволило улучшить результат, хотя и не до идеального состояния:

|  |
| --- |
|  |
| a) Исходно изображение b) улучшенное c)и d) амплитуда и фаза множителя деконфолюции e) спектр до деконволюции f) после |

С шумами картина получается следующего характера:

|  |
| --- |
|  |
| a) Исходная ФРТ B) улучшенная c) обратная ATF d) ФРТ с помощью оптимизационного метода e) найденная оптимизационным методом фаза |

**Некоторые вычисления**

А-скан у нас получается вот в таком виде:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

– это просто форма спектра, а , где – поле в области s-го рассеивателя. Тогда можем переписать всю эту историю в виде:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Пусть S=1, тогда:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

## Давайте теперь попробуем все последовательно записать:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Встречается с рассеивателем. Тут бы нам нужно проинтегрировать по различным положениям .

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Когда мы это распространяем обратно, то получаем:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Распишем интеграл:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Это при условии, что , иначе нужно заменить на . Итого получим (фурье с фигурными скобочками пропадет):

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Можно из под фурье вынести то, что от не зависит:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Первый множитель вроде действительно можно представить в виде свертки, второй – в виде сдвинутой IR функции, но она умножается, а не сворачивается же?

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Дальше, по идее, это все нужно проинтегрировать по x, тогда получится:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Итого, формула выходит вот такой:

|  |
| --- |
| где |

Получается поле в

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Далее для апертуры запишем как:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Т.е. история похоже такая: мы освещаем аберрированным пучком наш образец, но принимаем нормальные, вообще-то, волны. Стоит отметить, что – это функция от длины волны. С других точек зрения – это просто число.

Если у нас спектр константа, то один A-скан мы получим как:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Давайте распишем все это дело:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Вынесем функцию от х (FT^-1):

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Далее мы должны будем сложить все А-сканы, тогда получим 3D объем (для одного рассеивателя):

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Что тут откровенно странно:

1. Принятая на апертуру волна ни с чем, похоже, не сворачивается. Тогда «обратная» аберрация портит, по сути, только фазу поля, т.к. можно легко вынести из под знака интеграла.
   1. Еще из-за аберраций у нас уширяется пучок. И если мы не «сворачиваем» поле с чем-нибудь – то у нас там появятся новые частоты. Ну т.е. осветятся те рассеиватели, которые в противном случае не осветились бы. В реальной системе лучи со слишком большим наклоном просто не попадут в волокно или еще куда-нибудь. Тут они остаются. Такое ощущение, что где-то нужно домножать на идеальный пучок (дифракционно ограниченный) и править поле уже в нем.
2. Проход туда и обратно, кажется, должен быть равнозначен по теореме взаимности. А с другой стороны – вроде бы и нет тут чего-то по типу коммутативности.

## Как все это корректировать?

По идее нам нужно сделать 2 вещи: заменить на - неаберрированную функцию и брать .

Странность первая, не зависит от k. Чисто формально, выходит, что нам нужно взять фурье по k, получить для каждого 2D чего-то там, убрать фазу и снова взять обратное фурье. Но это странная вещь.

Пока у меня какая мысль. Для каждой спектральной компоненты мы можем записать вот что-то такое (убрали аберрации и взяли Фурье по ):

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Можем взять спектр еще раз и убрать функцию . Запишем два рассеивателя на одной глубине:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Интересно было бы осветить аберрациями, а принять без аберраций. Как бы оно выглядело?

В общем, нужно формулы написать с большими комментариями и поговорить с Александром Львовичем.

Наверно еще можно поискать что-нибудь, какие-нибудь файлы с одним и двумя проходами.

Пускай теперь у нас 2 рассеивателя в одном пучке, тогда:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Вторая тема – просто попробовать взять одну точку и посмотреть, какие от нее получаются PSF при разных аберрациях.

**Давайте возьмем 2 точки на одной глубине:**

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Распишем :

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |