

## Решение задач дифракции в САПР Zemax в смешанном режиме трассировки лучей

Научно-исследовательская группа  
«Конструктивная кибернетика»

*Юдин А.Н.*

E-mail: [fduchun@gmail.com](mailto:fduchun@gmail.com)

Показаны возможности применения САПР Zemax для решения задач дифракции в системах с кусочно-гладкими зрачковыми функциями. Рассмотрены различные подходы к созданию модели панели угловых отражателей и к вычислению её дифракционной картины.

## Содержание дифракционных задач

Дифракционные задачи – задачи нахождения распределения электромагнитного поля после взаимодействия с рассматриваемым объектом.

- Большой интерес для решения широкого круга практических задач представляет моделирование дифракционной картины – распределения интенсивности на каком-либо регистраторе.
- Широко распространённые задачи – дифракция на эллиптической (в т.ч. круглой) и прямоугольной апертуре, в том числе с присутствием центрального экранирования и гауссовой аподизации.
- Наиболее распространённый метод, реализованный в большинстве сред разработки ОС – БПФ зрачковой функции, позволяет моделировать дифракцию Фраунгофера.
- Менее распространёнными, но более универсальными, являются реализации решения задачи в приближении Гюйгенса-Френеля.

## Различные виды дифракционных задач

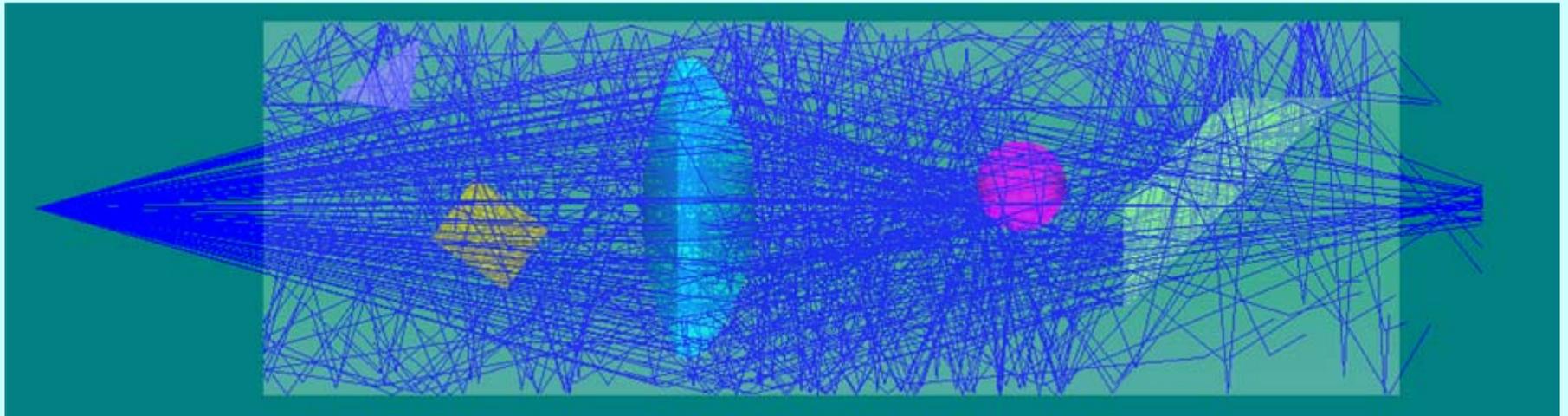
- Классические задачи имеют фазово- и поляризационно-непрерывную постановку, допускаются лишь амплитудные скачки на границе непрерывной апертуры простой формы.
- Существует широкий круг задач, в которых зрачковая функция представляет собой набор сдвинутых по фазе друг относительно друга некруглых субапертур, внутри которых также присутствует сложное распределение фазы, амплитуды и поляризации света.

Характерными примерами такой задачи является анализ систем, содержащих уголкового отражатели (УО) и панели из них.

Необходимость совершенствования таких систем влечёт за собой потребность в высокоточном моделировании получаемых распределений освещённости, что является необходимым для оптимизации энергетических и метрологических характеристик оптического тракта.

## Описание смешанного режима трассировки лучей

Смешанный (последовательный + непоследовательный) режим трассировки лучей состоит в использовании в последовательно-трассируемой системе особого типа поверхности – поверхности непоследовательного компонента, которая представляет собой область пространства, внутри которой осуществляется непоследовательная трассировка лучей, запущенных из предшествующей части последовательной системы, в результате которой лучи, достигнувшие заданной поверхности («выходного порта») выводятся далее в последующую часть системы, где продолжается последовательная трассировка.



## Достоинства смешанного режима

- Сохранена применимость большинства инструментов анализа последовательного режима.
- Лучи задаются в нормализованных полевых и зрачковых координатах.
- В значительной степени сохраняется высокая производительность вычислений, присущая последовательному режиму.

Несмотря на наличие альтернатив в виде обработки результатов работы полностью непоследовательной модели во внешних программных средствах, именно смешанный режим позволяет с минимальными трудозатратами и высоким быстродействием анализировать частотные характеристики системы.

## Ограничения смешанного режима

- Отсутствует разделение лучей – моделируется только одно изображение, лучи делятся только по нормализованным координатам, но не по интенсивности. Соответственно, метод не может использоваться для адекватного моделирования паразитных изображений, возникающих в непоследовательном компоненте, для их исследования требуется полностью непоследовательная модель.
- Лучи, запускаемые через входной порт смешанного режима не могут анализироваться детекторами непоследовательного режима – анализ осуществляется только после выходного порта.
- Лучи, запускаемые через внутренние источники непоследовательной системы, не могут выводиться через выходной порт и участвовать в последовательной трассировке.

## Ограничения смешанного режима – обработка виньетирования лучей

Последовательный режим, в т.ч. последовательная часть смешанной системы:

- Виньетированный луч продолжает трассироваться до поверхности изображения с флагом «Vignetted».
- Доступна координатная информация без учёта передаваемой энергии.

Внутри непоследовательного компонента:

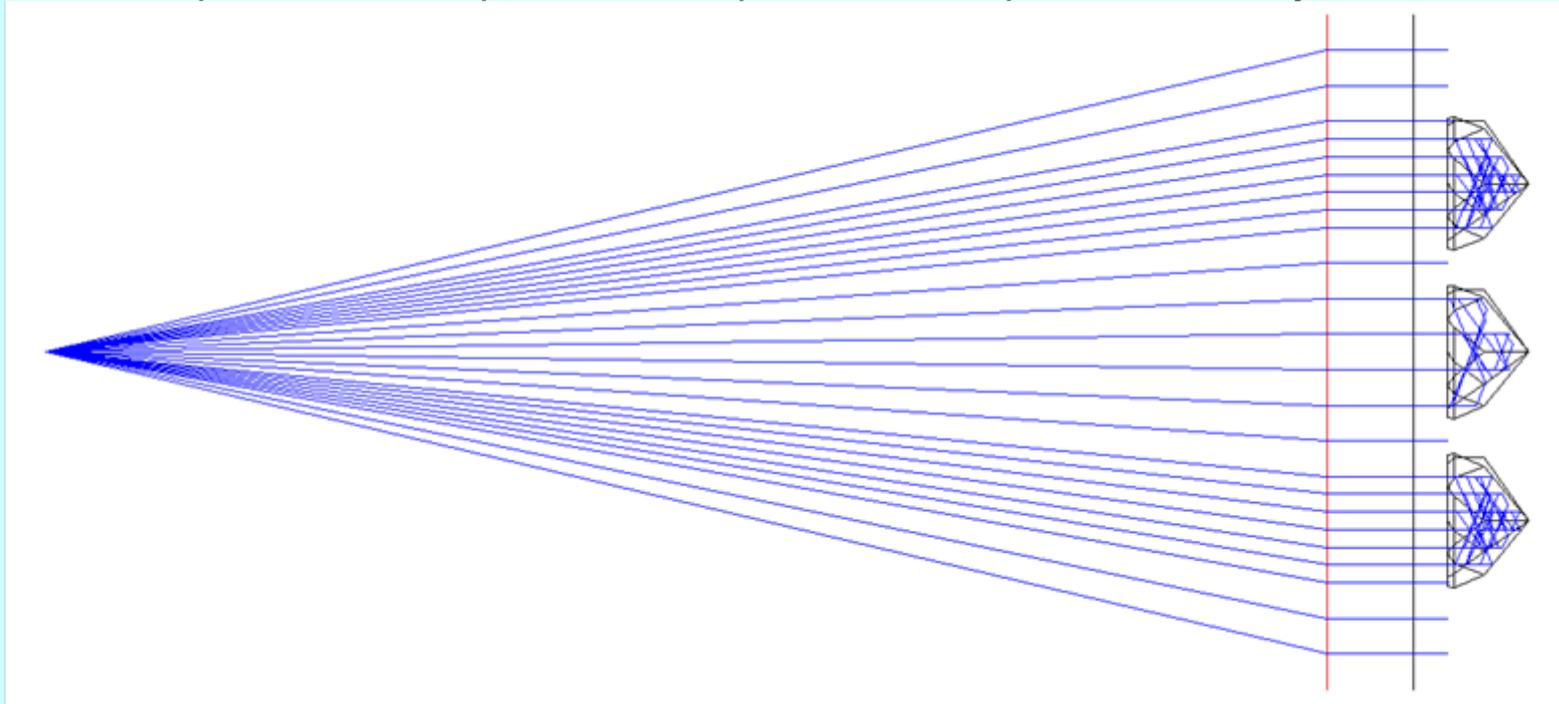
Луч считается прерванным, координатная информация после точки прерывания недоступна. Ограничена применимость ряда инструментов анализа, использующих трассировку параксиального луча в качестве источника опорных данных для моделирования:

- вычисление ФРТ в приближении Гюйгенса-Френеля и связанные с ним (ЧКХ, концентрация энергии и т.п.)
- блок анализа физического распространения
- встроенные алгоритмы прицеливания главного луча (при работе через непоследовательный компонент, находящийся до апертурной диафрагмы).

В ряде случаев обход этих ограничений требует специализированных программных решений, адаптированных к особенностям моделируемого компонента. Более того, по этим же причинам могут возникать ошибки в операндах целевой функции, затрудняющие оптимизацию подобных систем.

## Синтез и анализ системы с уголковыми отражателями в САПР ZEMAX

Анализируемая система - автоколлимационная установка, засвечивающая уголковые отражатели и строящая изображение в обратном ходе лучей.



Этот подход наиболее естественен, прост в реализации и соответствует типовой лабораторной методике испытания УО и панелей из них. Коллиматор в прямом и обратном ходе реализован последовательно, применением параксиальной линзы. Панель УО играет роль апертурной диафрагмы, входной и выходной порты непоследовательного компонента разнесены на расстояние  $-0,1$  мм для обеспечения корректного выхода лучей из панели. Апертура системы задаётся круглой, реальные субапертуры находятся автоматически в ходе трассировки лучей внутри панели УО.

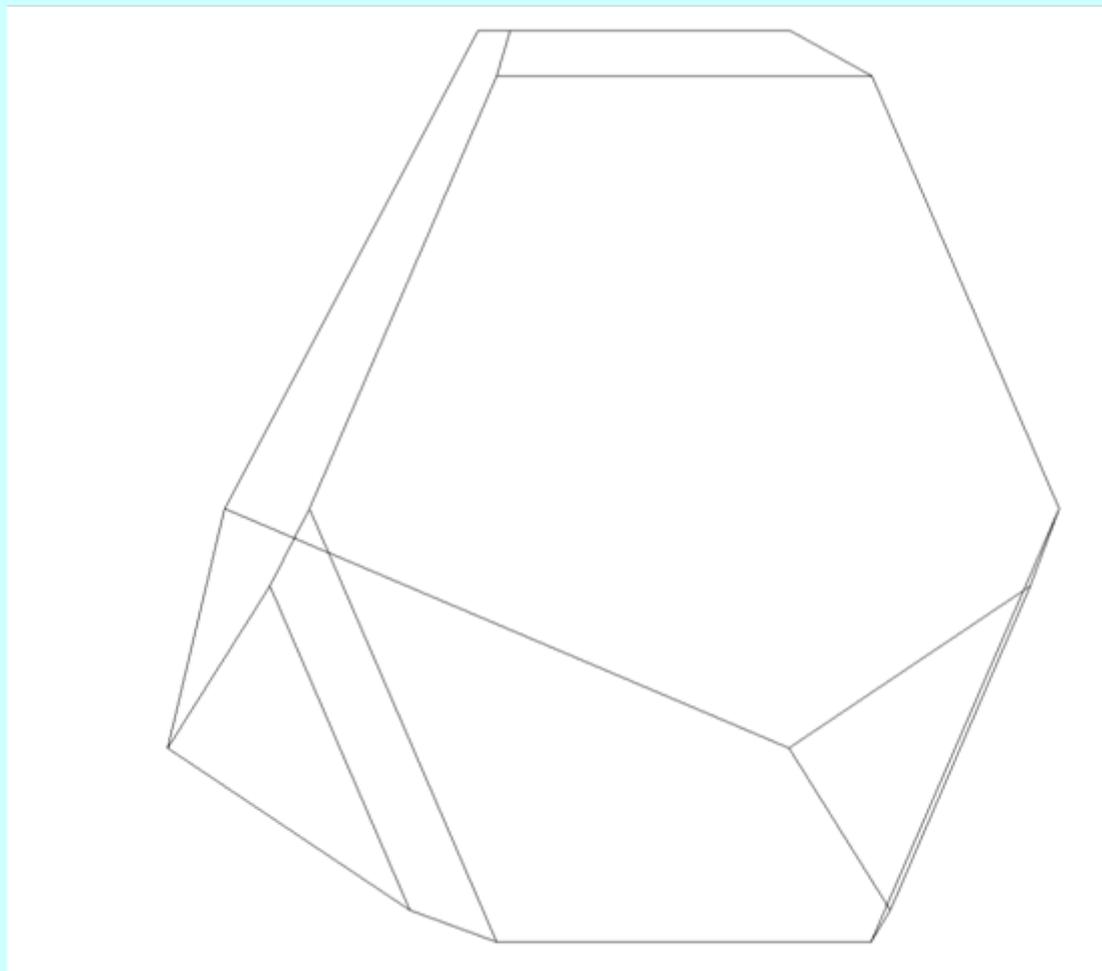
## Моделирование углового отражателя в Zemax

- Полигональная модель на основе набора вершин.
- Импорт объекта из САПР твердотельного моделирования.
- Булевое объединение встроенных примитивов.
- Создание пользовательского объекта, используя динамическую библиотеку.

В данной работе рассмотрена полигональная модель УО на основе набора координат вершин. Этот метод позволяет с умеренными трудозатратами получить модель, характеризующуюся высокими точностью и быстродействием вычислений – простые плоские поверхности трассируются значительно быстрее сплайнов, образующихся при использовании Булевых функций объединения объектов. С помощью полигонов можно легко задать типичные элементы УО – переднюю преломляющую грань, отражающие грани, в том числе различными отражающими покрытиями и светопоглощающие конструктивные фаски.

К недостаткам данной модели следует отнести обязательную плоскостность граней, что не позволяет учитывать деформацию граней, а лишь менять их наклон, а также неудобство модификации модели с целью внесения конструктивных отклонений – приходится перезаписывать текстовый файл модели. В то же время генерация модели может выполняться как средствами с дружественным интерфейсом пользователя (в данной работе использовалась среда Maple, пакет geom3d), так и программироваться на встроенном языке ZPL без привлечения внешних программных средств.

## «Проволочный» вид реализованной модели углового отражателя



Смоделированы с полным соответствием реальному УО преломляющие, отражающие и поглощающие поверхности. Для каждой поверхности возможно задание произвольного покрытия.

## Особенности других способов моделирования УО в Zemax

### 1. Импорт объекта из твердотельной САПР

- В ряде технологических циклов может оказаться наименее трудоёмким для анализа характеристик номинального конструктива.
- Вычислительная производительность таких моделей как правило существенно ниже чем у полигональных в силу более универсального представления данных.
- Введение произвольных конструктивных отклонений может быть не вполне удобным в силу необходимости включения САПР твердотельного моделирования в процесс генерации большого количества реализаций УО.

## Особенности других способов моделирования УО в Zemax

## 2. Булевое объединение встроенных примитивов.

Сравнительно новый и весьма привлекательный способ моделирования сложных объектов без привлечения сторонних инструментов. Результирующая модель основана на сплайновой аппроксимации.

- Менее быстродействующая по сравнению с полигональной (используются сплайны).
- Позволяет динамически вносить произвольные конструктивные отклонения в модель, используя удобный интерфейс языка ZPL.
- Позволяет с низкой трудоёмкостью реализовывать сложные модели с учётом большого количества факторов одновременно – сложная деформация граней, исходный разброс углов, неравномерности покрытий и т.п.

3. Реализация пользовательского объекта в виде подключаемой динамической библиотеки – наиболее гибкий, но и наиболее трудоёмкий метод моделирования УО. Он позволяет при необходимости задавать как поверхностные, так и объёмные отклонения конструктивных параметров, а также моделировать недоступные для реализации встроенными инструментами системы.

## Пример – моделирование одиночного УО

Моделируемый уголкового отражателя представляет собой призму из оптического стекла с плоскими рабочими гранями, снабжённую конструктивными поглощающими фасками. В данной работе рассматривается УО с полным внутренним отражением (ПВО).

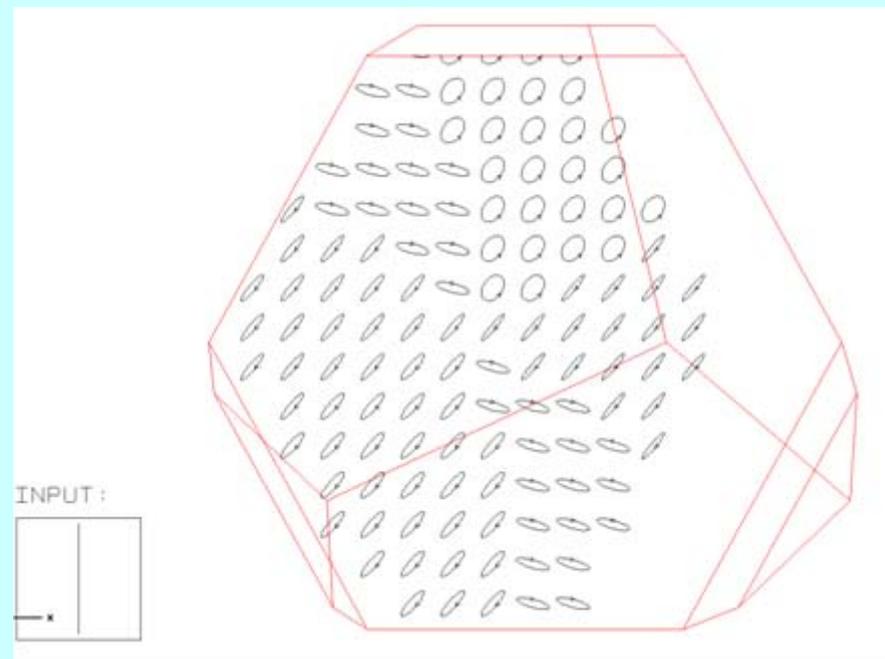
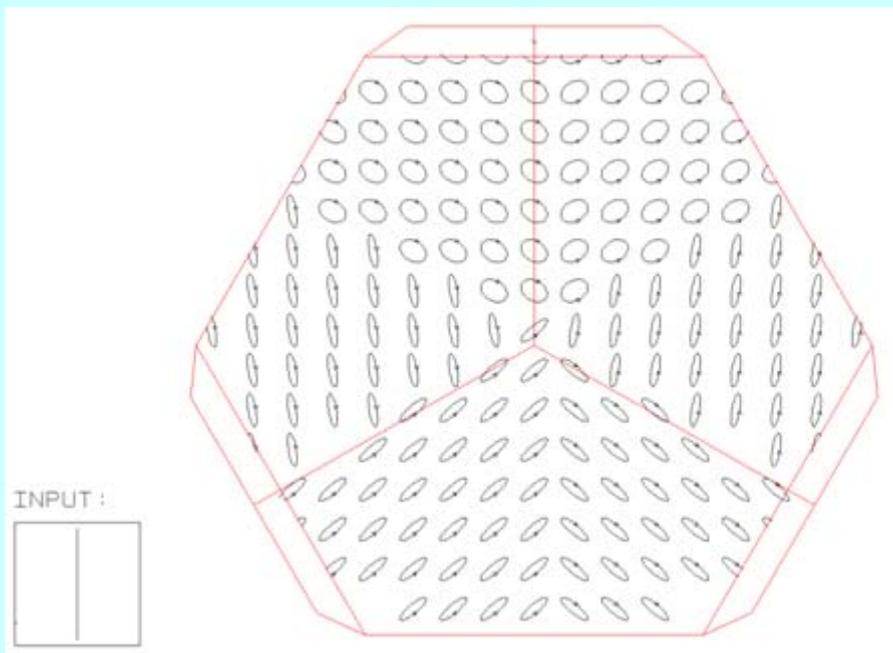
Моделирование одиночного УО преследует следующие основные цели:

- Моделирование изменения субапертур УО в зависимости от угла разворота.
- Моделирование изменения поляризации и нарушения ПВО в зависимости от угла разворота.

Эти данные автоматически используются для вычисления зрачковой функции системы с УО, что даёт возможность вычислять и анализировать передаточные функции системы, например дифракционную ФРТ.

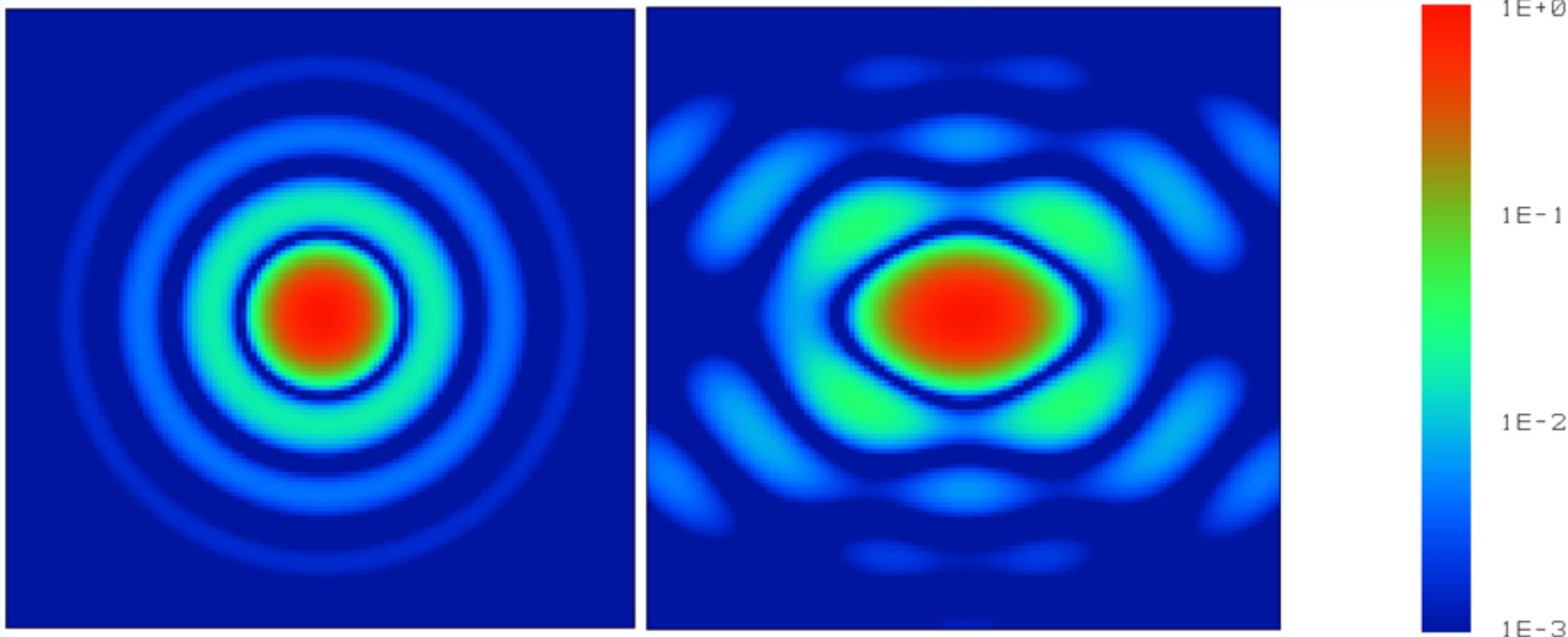
## Пример – моделирование одиночного УО

В уголкового отражателе при нормальном падении пучка апертура делится на 6 равных субапертур-секторов, различающихся по влиянию на поляризацию падающего излучения. Субапертуры и поляризация меняются в зависимости от угла падения пучка на УО. Ниже приведены карты поляризации излучения в выходном зрачке системы для случаев нормального (слева) и под углом  $20^\circ$  к нормали фронтальной поверхности (справа) падения вертикально-поляризованного пучка излучения.



## Пример – моделирование одиночного УО

Изменениям зрачковой функции соответствует изменение передаточных функций системы – на иллюстрациях показаны соответствующие вышеуказанным конфигурациям дифракционные ФРТ, рассчитанные с применением инструмента ZEMAX Huygens PSF (отображение в логарифмическом масштабе).



## Моделирование панели УО

При переходе от одиночного УО к панели УО возникают следующие проблемы:

- Происходит усложнение структуры апертуры системы – панель УО состоит из разнесённых отражателей, каждый из которых, в свою очередь, разделён на смежные субапертуры.
- Между отражателями возникает разность хода, достигающая в ряде случаев долей метра.

Таким образом, модель панели УО в общем случае оперирует с кусочно-гладкой зрачковой функцией, имеющей амплитудные, фазовые и поляризационные скачки.

Возможны 2 различных подхода к вычислению передаточных функций такой системы с использованием инструмента Huygens PSF:

1. Однопроходный расчёт с покрытием панели УО общей сеткой лучей.
2. Моделирование отдельных УО с последующим когерентным сложением пучков.

## Моделирование панели УО

1. Однопроходный расчёт с покрытием панели УО общей сеткой лучей.

- Происходит аналогично моделированию отдельного уголка.
- Производится усложнение непоследовательного компонента, последовательная часть остаётся неизменной.
- С усложнением панели требуется применение сетки большей плотности.
- Часть лучей теряется, тем больше, чем разреженнее панель.
- Возникает опасность обрыва трассировки главного луча с последующим отказом инструментов анализа!

Обход последнего ограничения в принципе возможен искусственным вводом пренебрежимо малого по площади ретрорефлектора, виньетируемого в последовательной части системы и не возмущающего дифракционный расчёт.

Для заполненных панелей также возможно пользовательское прицеливание главного луча применением ZPL-макросов.

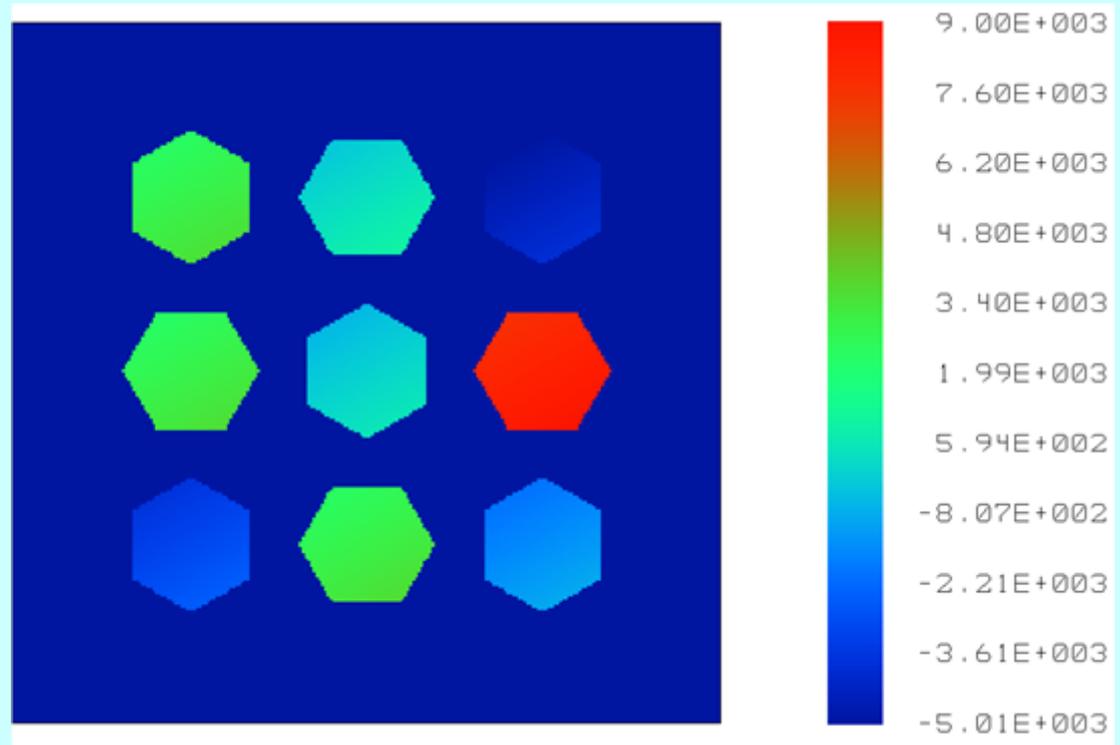
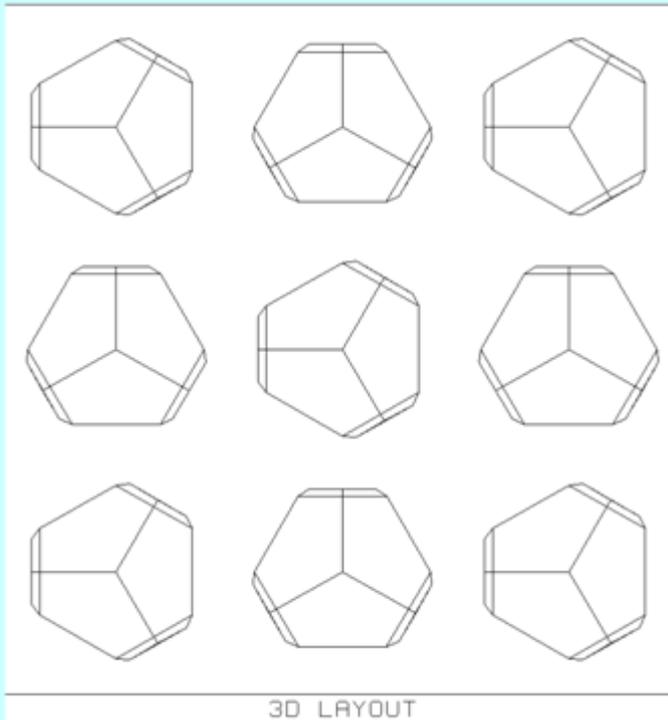
## Моделирование панели УО

### 2. Моделирование отдельных УО с последующим когерентным сложением пучков.

- Модифицируется последовательная часть системы – она становится мультikonфигурационной, включая в себя операнды управления координатами непоследовательного компонента и разворотом УО.
- Непоследовательный компонент не усложняется, а только модифицируется мультikonфигурационными операндами.
- Каждый УО получает свою относительно небольшую сетку лучей.
- Эффективность использования сетки лучей не зависит от разреженности панели.
- Благодаря прицеливанию главного луча к децентрируемой апертурной диафрагме практически устраняется опасность его обрыва при трассировке (в сочетании с искусственным выводом за т.н. «расстояние склейки»).
- (Метод наиболее перспективен в свете развития блока физического распространения!)

## Моделирование панели УО

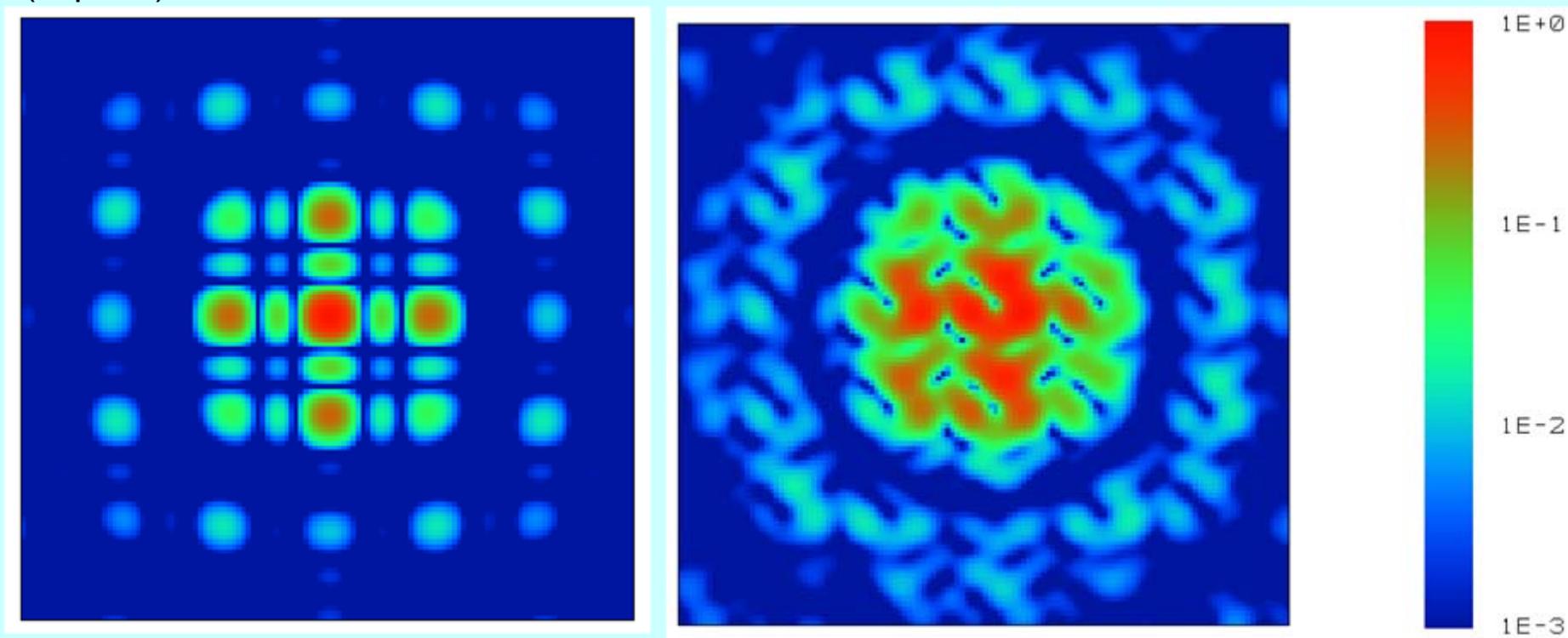
Пример – плоская панель УО, размещённых в узлах прямоугольной сетки.



Справа показана карта волнового фронта в случае смещения УО по оси  $Z$  в диапазоне  $\pm 1.5$  мм, с вычетом наклона. Также сохраняется поляризационное деление УО на субапертуры, продемонстрированное выше.

## Моделирование панели УО

Дифракционные ФРТ, полученные от рассматриваемой панели методом однопроходного расчёта, для случая сфазированных УО (слева) и расфазированных (справа)



Нетрудно видеть, что взаимная расфазировка УО при отсутствии прочих изменений в системе радикально меняет вид дифракционной ФРТ.

## Выводы

1. САПР ZEMAX позволяет эффективно решать задачи дифракции на объектах сложной формы, создающих сложную амплитудную, фазовую и поляризационную структуру зрачковой функции.
2. Возможно как создание сложных объектов встроенными инструментами программы, так и импорт объектов из сторонних программных сред. Также присутствует интерфейс расширения программы пользовательскими динамическими библиотеками.
3. Высокопроизводительное вычисление передаточных функций панелей угловых отражателей открывает широкие перспективы их оптимизации.