

Восстановление фазы квазиоптического волнового пучка с потерями

А.А. Богдашов¹

¹Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук

Аннотация: в данной работе предложен новый подход по восстановлению фазы волнового пучка по измерениям амплитуды поля с потерями в нескольких поперечных сечениях. Задача подобного рода возникает при анализе линейно-поляризованного выходного излучения гиротронов, источников мощного микроволнового излучения. В предложенном подходе волновой пучок представляется в виде суперпозиции Эрмит-Гауссовых (ЭГ) мод с неизвестными комплексными амплитудами. Поиск амплитуд и фаз ЭГ мод ведётся методом многомерной оптимизации роем частиц (Particle Swarm Optimization). В компьютерном эксперименте показано, что при измерениях амплитуды пучка с пороговым обрезанием поля в пяти поперечных сечениях (потери в каждом из сечений составили около 10%) удаётся восстановить фазу и частично утраченную амплитуду волнового пучка с приемлемой для практики точностью (95%). Несмотря на существенное отличие модового состава с изменением полуширины системы ЭГ мод, выявлена слабая зависимость конечного результата от этого параметра.

Ключевые слова: гиротрон, восстановление волнового фронта, квазиоптический волновой пучок, измерения амплитуды СВЧ поля, Эрмит-Гауссовы моды, оптимизация роем частиц (Particle Swarm Optimization)

1. Введение

Восстановление фазы волнового пучка по измерениям амплитуды в нескольких поперечных сечениях широко используется при анализе выходного излучения гиротронов, источников мощного микроволнового излучения [1]. При повышении рабочей частоты гиротронов увеличивается влияние точности изготовления и установки элементов электродинамической системы гиротрона на качество выходного волнового пучка. Задача восстановления фазы измеренного пучка гиротронов актуальна в связи с задачами преобразования излучения и синтеза квазиоптических зеркал [2]. Наиболее часто амплитудное распределение излучения определяется по тепловому следу пучка на слабо поглощающей мишени в нескольких поперечных сечениях [3]. Как правило, восстановление фазы поля по измерениям амплитуды в предположении малых потерь излучения на измеряемых апертурах выполняется с помощью алгоритма Каценеленбаума-Семенова (КС) [4-6]. Но в последнее время возникла задача восстановления фазы волнового пучка при визуализации СВЧ разряда в газе на метало-диэлектрической мишени [7]. В этом случае зажигание разряда происходит при амплитуде поля, превышающей величину порогового пробойного поля. Потери части информации об излучении при измерениях существенно усложняет задачу восстановления амплитудно-фазового распределения квазиоптического пучка.

В работе предложен новый подход к восстановлению фазы пучка с потерями. Проведены численные эксперименты по восстановлению фазы квазиоптического линейно-поляризованного волнового пучка сложной структуры. Показано, что при наличии порогового обрезания измеряемого амплитудного распределения поля удаётся восстановить не только фазовое распределение волнового пучка, но и частично утраченное амплитудное распределение.

2. Постановка задачи

При наличии потерь восстановление фазы пучка с помощью алгоритма КС существенно ухудшается, так как при итерационном расчете поля с помощью дифракционного интеграла искажения измеренного волнового пучка приводят к сходимости итерационной процедуры к фазе, отличной от реальной. При наличии существенного порогового обрезания поля пучка влияние этого эффекта усугубляется. Цель работы – развитие метода восстановления фазы волнового пучка по такого рода измерениям с потерями. Для пояснения предложенного подхода рассмотрим распространение волнового пучка сложной структуры в свободном пространстве, а именно – вычислим распределение поля в «измеряемых» поперечных сечениях с помощью интеграла Френеля. Далее, проведем пороговое обрезание поля пучка в каждом из сечений и примем полученные амплитудные распределения за «измеренные». В условиях проводимого компьютерного эксперимента мы знаем истинное амплитудно-фазовое распределение пучка, что позволяет оценить эффективности предложенного подхода.

3. Восстановление волнового пучка с потерями оптимизацией роем частиц

Рассмотрим конкретный численный пример восстановления фазы волнового пучка с потерями излучения. Пусть измеренное амплитудное распределение поля в рассматриваемых сечениях отображается только при величине поля больше порогового, а амплитуда излучения меньше пороговой равна нулю. На рисунке 1 показаны расчетные распределения поля (длина волны 3мм) с пороговым обрезанием поля на величине 25% от максимальной амплитуды в сечении $Z=0$. Потери излучения в случае такого порогового обрезания в $Z(\text{мм})$ -сечениях составляют соответственно ~11% (Z_0), ~10,5% (Z_{150}), ~11,6% (Z_{300}), ~13,2% (Z_{600}), ~17,8% (Z_{900}).

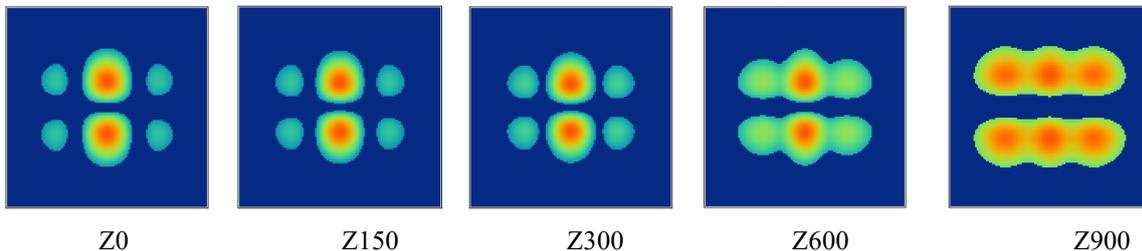


Рисунок 1. «Измеренные» амплитудные распределения поля в сечениях Z . Длина волны излучения - 3мм, апертура – $150 \times 150 \text{мм}^2$, 128×128 точек.

Представим поле волнового пучка в виде ЭГ мод TEM_{mn} с полушириной a и плоской фазой в сечении Z_0 с неизвестными комплексными амплитудами [8]. Для поиска комплексных амплитуд воспользуемся алгоритмом роя частиц PSO (Particle Swarm Optimization) с перезапуском [9-11]. В алгоритме PSO выбраны следующие параметры: число частиц в рое – 30, число итераций – 80, число перезапусков – 20. Эффективность алгоритма определяется как усредненный по пяти поперечным сечениям коэффициент связи «измеренной» амплитуды и амплитуды суперпозиции ЭГ мод в процессе оптимизации (Рисунок 2).

На рисунке 3 показаны оптимальные амплитуды и фазы ЭГ мод с полуширинами $a=25, 35$ и 45мм . Параметр a влияет на скорость сходимости процедуры оптимизации вследствие изменения числа ЭГ мод, задействованных в аппроксимации волнового пучка в измеряемых сечениях. Так для системы ЭГ мод с полушириной $a=45 \text{мм}$ пришлось увеличить индексы m, n мод до 20 (см. рисунок 1). Увеличение размерности пространства оптимизации с $m \times n \times 2=392$ до 800 существенно замедляет процесс поиска комплексных амплитуд ЭГ мод.

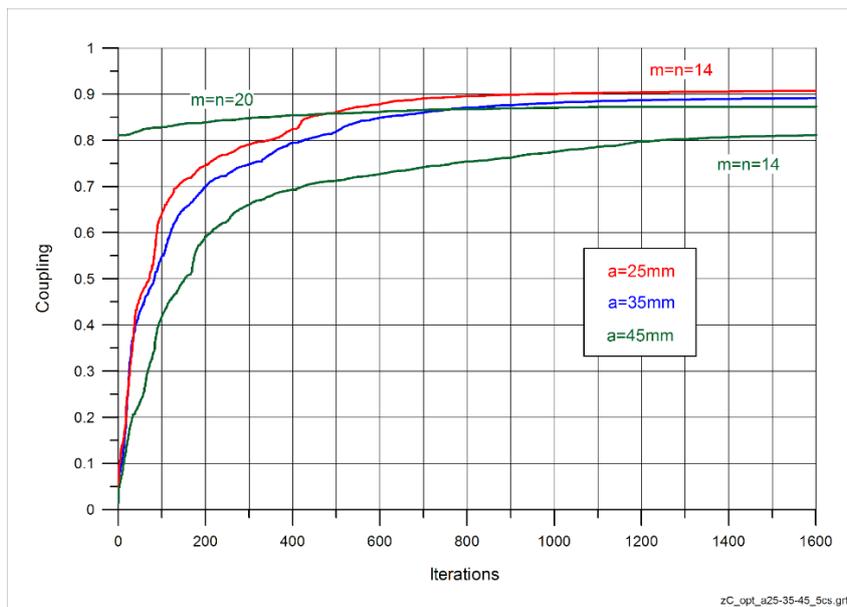


Рисунок 2. Сходимость алгоритма PSO при различных полуширинах a системы ЭГ мод.

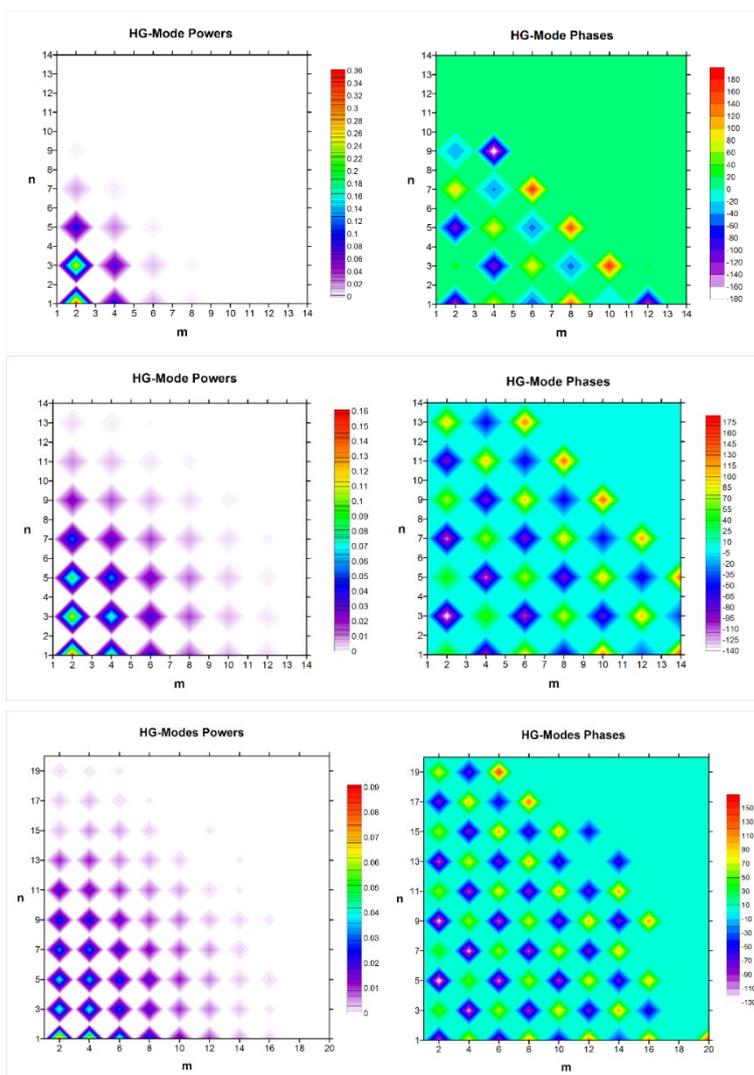


Рисунок 3. Оптимальные амплитуды и фазы систем ЭГ мод с полуширинами $a=25, 35$ и 45 мм.

Например, коэффициенты связи «измеренных» распределений поля и суперпозиции ЭГ мод с полушириной $a=35\text{мм}$ составляют в сечениях Z0-88.4%, Z150-91.3%, Z300-92.2%, Z600-91.2%, Z900-83.3%. То есть коэффициенты связи определяются потерями излучения на соответствующих апертурах за счёт порогового обрезания поля. Однако, если мы рассмотрим коэффициенты связи полей ЭГ мод с исходным полем волнового пучка (истинным полем без порогового обрезания), то обнаружим, что коэффициенты связи значительно выше (см. Таблицу 1).

Таблица 1. Коэффициент связи суперпозиции ЭГ мод с истинным пучком (с фазой)

Полуширина системы ЭГ мод a , мм	Z0	Z150	Z300	Z600	Z900	Z1500 (пересчет ЭГ мод)
25	95,05%	95,04	95,05	95,12	95,33	95,36
35	95,97	95,90	95,89	96,05	96,55	95,91
45	95,80	95,64	95,58	95,74	96,16	95,33%

Полученные результаты мало отличаются для разных полуширин a ЭГ мод в смысле коэффициента связи суперпозиции ЭГ мод с истинным волновым пучком без потерь - 95-96% во всех пяти поперечных сечениях. Распределения поля, представляющие собой суперпозицию ЭГ мод с полушириной $a=35\text{мм}$, показаны на рисунке 4. Замечательно, что полученная в результате оптимизации суперпозиция ЭГ мод ближе по структуре к истинному волновому пучку, чем к измеренному. Видимо, дело в том, что при поиске комплексных амплитуд ЭГ мод одновременно учитывается информация об амплитудном распределении поля всех рассматриваемых поперечных сечений. Это позволяет повысить эффективность аппроксимации волнового пучка суперпозицией ЭГ мод при учёте большего числа поперечных сечений.

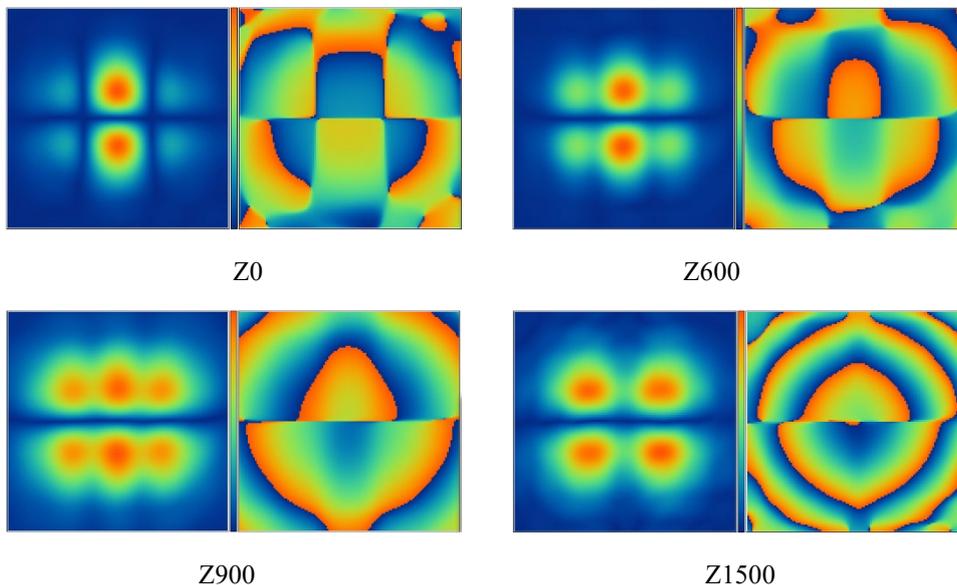


Рисунок 4. Восстановленные распределения амплитуды и фазы волнового пучка (ЭГ моды $a=35\text{мм}$) в сечениях Z0, Z600, Z900, Z1500мм (1500мм пересчитано для сравнения ЭГ мод и истинного пучка). Апертура $150 \times 150 \text{мм}^2$ (Z1500 – $250 \times 250 \text{мм}^2$), длина волны излучения 3мм.

4. Заключение

Эрмит-Гауссовы (ЭГ) моды могут быть использованы для описания распространения линейно-поляризованных квазиоптических волновых пучков в свободном пространстве наряду с расчетами дифракционными интегралами с

приемлемой точностью. Восстановление фазы волнового пучка по амплитудным измерениям в нескольких поперечных сечениях осуществимо как без потерь излучения на апертуре, так и с потерями (например, в случае порогового обрезания поля) с помощью нахождения комплексных амплитуд ЭГ мод оптимизацией рою частиц (Particle Swarm Optimization). Эффективность оптимизации определяется как усредненный по сечениям коэффициент связи суперпозиции ЭГ мод и измеренных амплитудных распределений поля.

Коэффициент связи результирующей суперпозиции ЭГ мод с измеренными распределениями составляет величину, определяемую величиной потерь излучения на апертурах поперечных сечений.

Однако, коэффициент связи суперпозиции ЭГ мод с истинным волновым пучком (амплитудное распределение которого фактически нам известно лишь частично, за счет порогового обрезания поля) выше, чем с измеренным распределением поля. Поиск комплексных амплитуд ЭГ мод позволяет восстановить не только фазовое, но и частично утраченное амплитудное распределение поля.

Так, в компьютерном эксперименте потери излучения на каждой из пяти апертур составили около 10-15% (пороговая величина поля выбрана 25% от максимальной), а коэффициент восстановления волнового пучка с фазой достиг 95% (коэффициента связи с истинным волновым пучком без потерь). Отметим, что восстановленное амплитудное распределение суперпозиции ЭГ мод обладает коэффициентом связи с истинным амплитудным распределением ~97-98%. Это означает, что полученные в результате восстановления амплитудные распределения могут быть использованы для дальнейшего шага по «улучшению» фазы пучка с помощью алгоритма КС.

Работа выполнена при финансовой поддержке проектов ИПФ РАН FFUF-2021-0001, FFUF-2022-0007.

Список литературы

1. Glyavin M.Yu., Denisov G.G., Zapevalov V.E., et al. Terahertz gyrotrons: State of the art and prospects // *Journal of Communications Technology and Electronics*. – 2014. – Т. 59. – С.792-797.
2. Bogdashov A. A., Chirkov A. V., Denisov G. G., et al. Mirror synthesis for gyrotron quasi-optical mode converters // *Int. J. of Infrared and Millimeter Waves*. – 1995. – Т. 16. – №. 4. – С. 735-744.
3. Kuznezov S.O., Malygin V.I. Determination of gyrotron wave beam parameters // *Int. Journal of Infrared and Millimeter Waves*. – 1991. – Т.12. – С.1241-1252.
4. Каценеленбаум Б. З., Семёнов В. В. Синтез фазовых корректоров, формирующих заданное поле // *Радиотехника и электроника*. – 1967. – № 12. С. 244.
5. Chirkov A.V., Denisov G.G., Aleksandrov N.L. 3D wavebeam field reconstruction from intensity measurements in a few cross sections// *Optics Communication*. – 1995. – Т.115. – №. 5-6. – С.449-452.
6. Bogdashov A.A., Chirkov A.V., Denisov G.G., et al. High-efficient mode converter for ITER gyrotron // *Int. Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2005. – Т. 26. – №. 6. – С.771-785.
7. Gitlin M.S., Bulanova S.A., Fokin A.P., Glyavin M.Yu, et al. Imaging of a High-Power Millimeter Wave Beam Using a Millimeter Wave-Induced Gas Breakdown Initiated by a Metal-Dielectric Screen // *IEEE Transactions on Plasma Science*. – 2022. – Т. 50. – №. 2. – С. 267-274.
8. Абрамочкин Е.Г., Волостников В.Г. Современная оптика гауссовых пучков. – М.: Физматлит, 2010.
9. Kennedy J., Eberhart R., Particle Swarm Optimization // *Proc. of the 1995 IEEE International Conference on Neural Networks*. USA. – 1995. – С.1942-1948.
10. Robinson J., Rahmat-Samii Y., Particle Swarm Optimization in Electromagnetics // *IEEE Trans. Antennas Propagation*. – 2004. – Т.52. – №.2. – С.397-407.
11. Bogdashov A.A., Rodin Yu.V. Mode converter synthesis by the Particle Swarm Optimization // *Int. Journal of Infrared and Millimeter Waves*. – 2007. – Т. 4. – №. 28. – С.627-638.