

3D ОПТИЧЕСКАЯ ТОМОГРАФИЯ ИНДУЦИРОВАННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ В УСЛОВИЯХ БЛИЖНЕГО КОСМОСА

О.В. Филонин, М.А. Петров

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет) (СГАУ), Самара, Россия

Рассмотрены методы решения обратных 3D - задач для диагностики параметров индуцированных плазменных образований вокруг непрозрачных объектов в условиях ближнего космоса. Приведены схемы экспериментальных установок для исследования пространственного распределения параметров плазменных объектов, разработанные для использования их на борту наноспутников типа 3 CubeSat.

Ключевые слова: информационные технологии, свёртка, обратные некорректные задачи, 3D-томография, индуцированное плазменное образование, наноспутник, ближний космос.

Введение

Индуцированное излучение физических объектов, помещаемых во внешние переменные электрические поля, является разновидностью электролюминесценции - излучения света атомами или молекулами, переведенными предварительно в возбужденное состояние электрическим переменным полем в диапазоне частот (10÷100) кГц (при напряжении между электродом и объектом от 5 кВ до 30 кВ). Такие виды газовых разрядов являются весьма информативными для диагностических целей применительно к полупроводниковым элементам, смазкам, конструкционным элементам, биологическим объектам и пр. Информационная способность индуцированных плазменных образований определяется пространственными параметрами таких функций распределения как: локальные концентрации электронной и ионной компонент, температуры, спектральный состав и т.д.

В условиях ближнего космоса пространственное распределение указанных параметров может кардинально изменяться под воздействием протонных и нейтронных пучков, потоков рентгеновских квантов, электромагнитных полей и пр. Следовательно, анализ изменения плазменных индуцированных образований, например, от полупроводниковых элементов, при всех прочих равных условиях, в условиях ближнего космоса, является высокоинформативным диагностическим методом для анализа работоспособности элементов РЭА.

В настоящее время для индуцированных газовых разрядов не существует адекватного и объективного метода реконструкции функций 3D распределения таких параметров, как: интенсивность, температуры, концентрации ионной и электронной компонент и т.д. Авторами разработан ряд методов пространственной реконструкции исследуемых параметров для плазменных образований такого класса на основе решения обратных некорректных задач. Эти методы и устройства ориентированы для работы на борту наноспутников (НС), на орбитах высотой порядка 400 км.

1. Способы и средства формирования исходных проекционных данных

Исходя из условий эксперимента, система сбора двумерных исходных проекционных данных, должна быть размещена в объеме 1 CubeSat, т.е. $(10 \times 10 \times 10)$ см³. С другой стороны высокую информационную отдачу при газоразрядной визуализации можно получить, решив трехмерную задачу реконструкции таких параметров плазменного образования как 3D распределения локальных значений температур, электронной и ионной концентраций. Кроме того, в условиях реального эксперимента, необходимо учитывать крайне скромную энергетику НС формата 3 CubeSat, в модулях которого необходимо разместить: высоковольтный источник импульсного напряжения, блок управления оптико – электронной системы сканирования, передатчик для связи с центром управления, аккумуляторы, контроллеры солнечных панелей и пр.

Учитывая малые размеры спутника, возможности его энергетики в качестве исследуемого объекта выбран безкорпусной транзистор, размещенный в переменном электрическом поле (напряжение $(5 \div 20)$ кВ, частота меандра импульсов $(5 \div 20)$ кГц). Для возбуждения газового разряда была использована газонепроницаемая камера в виде шестигранной усеченной пирамиды, выполненной из дюралюминиевого сплава и заполненная смесью инертных газов при давлении 250 Па (см. рис. 1 б)). Для формирования исходных двумерных проекционных данных были разработаны малогабаритные цифровые 3х линзовые микроскопы, «плоскости» тубусов которых оказываются касательными к некоторой полусфере, в центре основания которой расположен исследуемый плазменный объект 10. Разработанная 3D томографическая система сбора исходных данных содержит плиту основание 1 на которой расположены плата высоковольтного блока питания 2, газовая камера 3. В последнюю вмонтировано четыре цифровых микроскопа 4, 7, позволяющие собирать двумерные проекционные данные в сферо – тангенциальной геометрии. В основании камеры находятся электроды 9, разделенные изолятором и газовым промежутком, в котором инициируется газовый разряд.

В каждом микроскопе в качестве входного элемента используется стекловолоконная планшайба. Это позволяет реализовать плоскопараллельную геометрию формирования исходных проекционных данных. Увеличенное изображение с помощью линзы проецируется на ПЗС матрицу - выполняется условие определяющее функцию проекции в смысле Радона:

$$g(\vec{p}) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\vec{r}) \delta(\vec{p} - \vec{n}\vec{r}) d\vec{l};$$

$$\Re[f(\vec{r})] = \int_0^{2\pi} d\alpha \int_{-\infty}^{\infty} f(\vec{r}) \delta(p - \vec{n}\vec{r}) dl$$
(1)

Для формирования исходных двумерных проекционных данных в данной системе целесообразно использовать ПЗС матрицы с переносом кадра фирмы e2v (Великобритания) типа CCD 67. Эти матрицы имеют размер пикселя 26 мкм, тактовую частоту 5 МГц, разрешение (256 × 256) элементов, а диапазон регистрируемых длин волн (200 ÷ 1100) нм и снабжены сверхмал шумящим усилителем. Пример типичного разряда в смеси инертных газов приведён на рис. 1 б) позиция 5. Формат разрешения выбран исходя из возможностей управляющего микропроцессора Cortex (тактовая частота 600 МГц), и уровнем быстродействия обмена данными с центром управления. В модуле НС размещены также системы опроса матриц, оцифровки данных б.

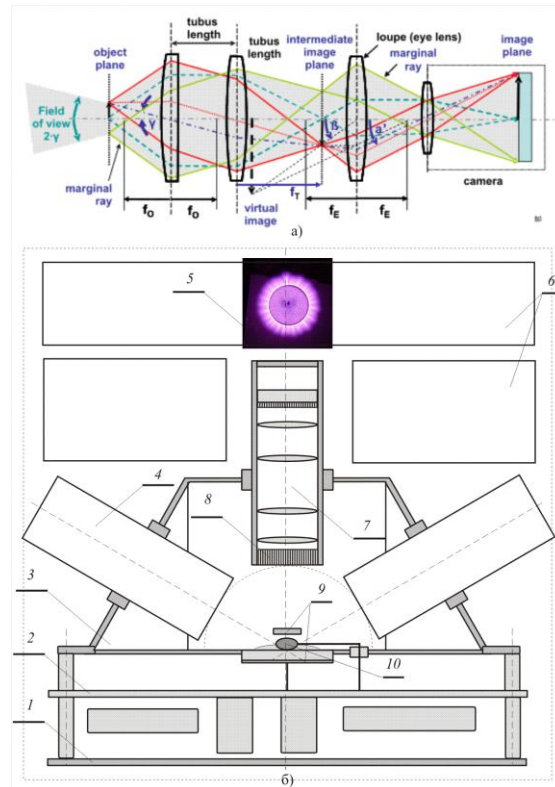


Рис. 1. а) – оптическая схема малогабаритного цифрового микроскопа б) – эскиз 3D томографической системы формирования исходных данных

2. Методы и алгоритмы 3D реконструкции искомым функциональных распределений плазменных объектов

Для оптически прозрачной плазмы при рассматриваемом способе регистрации функция проекции можно определить как:

$$I(p, \xi, \lambda) = \int_{\Delta l} \varepsilon(x, y, \lambda) dl \quad (2)$$

здесь, p, ξ - параметры потока излучения в данном ракурсе, Δl - область определения функции проекции, $\varepsilon(x, y, \lambda)$ - локальное значение коэффициента излучения. Уравнение (2) является интегральным уравнением первого рода, общее решение которого в интегральной геометрии известно как преобразование Радона R от функции $\varepsilon(x, y, \lambda)$, то есть:

$$R[\varepsilon(x, y, \lambda)] = I(p, \xi, \lambda) \quad (3)$$

В полярной системе координат (r, θ) обратное преобразование Радона определяется [2] следующим образом:

$$\varepsilon(x, y, \lambda) = \frac{1}{2\pi^2} \int_0^\pi d\xi \int_0^\infty \frac{\partial I(p, \xi, \lambda)}{\partial p} \cdot \frac{dp}{p_0 - p} \\ p_0 = r \sin(\theta - \xi), \quad (4)$$

где p_0 - параметр, определяющий хорду P (направление проецирования).

Последнее соотношение удобно представить в операторной форме:

$$\varepsilon(x, y, \lambda) = BH_V D_V I(p, \xi, \lambda), \quad (5)$$

где B - оператор обратного проецирования, H_V - оператор преобразования Гильберта по отношению к первой переменной, D_V - оператор дифференцирования по первой переменной функции двух вещественных переменных. Главной особенностью задач типа (2) оказывается их некорректность в классическом смысле, а именно регистрируемые функции проекции являются приближенными функциями. Следовательно, речь может идти о поиске приближенных решений. В дополнении к этому, ситуация усугубляется тем, что при оптических методах регистрации вносятся дополнительные искажения (погрешности оптического канала регистрации) в (2), появляются искажения и при вычислении преобразования Гильберта. Наконец, не надо забывать о погрешностях, возникающих при дискретизации данных, вследствие большой разреженности данных по углу при малоракурсной регистрации.

Исходные 2D массивы данных, являющиеся проекциями, полученными в сферотангенциальной геометрии, после оцифровки 8 - разрядными АЦП представляют собой массивы, заданные в декартовой системе координат (см. рис. 2 а)). Процедуры реконструкции искомым функциональных распределений выполняются частично на борту НС – осуществляется формирование одномерных проекционных массивов для передачи их в ЦУП. Основные этапы процессов восстановления искомым трехмерных распределений заданных параметров в плазме производятся на кластерных вычислительных системах ЦУПа. С целью уменьшения объемов исходных данных, передаваемых по каналу связи, на борту НС, во-первых производится пересчет исходных 2D проекций из декартовой сетки в полярную. Во-вторых, осуществляется усечение данных до формата (128×128) элементов. Таким образом, на каждом диаметре 2D проекции, переопределенной на полярной сетке, заданной оказывается одномерная проекция, полученная в определенном ракурсе [1]. Понятно, что каждый ракурс соответствующий одномерной проекции определяется значениями углов φ_j, θ_k в дискретном пространстве, определенном в сферической системе координат. В конечном итоге исходные данные оказываются сформированными в виде одномерного массива представляющего собой последовательный набор (128×4) одномерных проекций, каждая из которых содержит по 128 отсчёта.

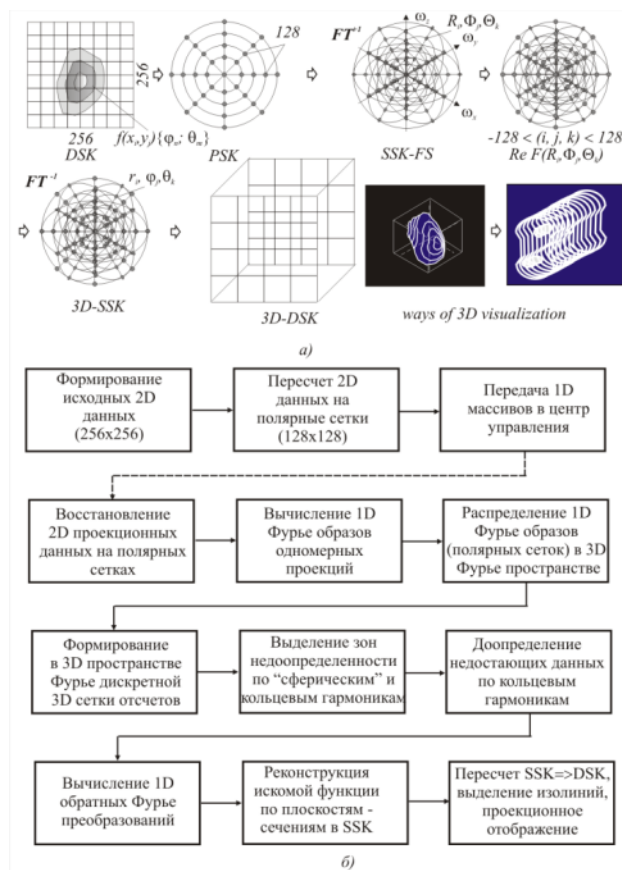


Рис. 2. Иллюстрация порядка выполнения вычислительных операций по реконструкции искомого 3D распределения

Структура вычислительных процедур - порядок выполнения операций по реконструкции искомого 3D распределения показана на рис. 2 б). Сущность разработанного метода реконструкции трёхмерных искоемых функциональных зависимостей сводится к следующему. Полученный со спутника одномерный массив предварительно восстанавливается до «исходных» двумерных проекций заданных на полярных сетках в формате 128×128 отсчетов. Затем 2D функции проекций нормируются обычным образом [2], то есть должно выполняться равенство интегралов от функций проекций. Напомним, что каждый диаметр на этих сетках представляет собой одномерную проекцию в соответствующем направлении φ_j, θ_k . Совершенно очевидно, что исходное количество данных – четыре 2D-проекции совершенно недостаточно для реконструкции искоемых функциональных распределений в формате 128×128×128 элементов. Для доопределения исходных объемов данных можно воспользоваться теоремой о центральном сечении [1]. Действительно 3D Фурье – спектр (Re - часть) от искомого функционального распределения обладает свойствами эллипсоидальной симметрии. Следовательно, для вычисления недостающих проекционных данных необходимо вычислить одномерные ФТ от всех одномерных массивов – «диаметров» для каждой 2D проекции, т.е.:

$$\begin{aligned}
 F^{\Gamma+1}(P_n(r\delta(r-r_0); \Delta\varphi_i)) &= \\
 &= \int_{R_0=1} P_n(r\delta(r-r_0); \Delta\varphi_i) e^{-2\pi i(\omega-\alpha_0)(r-r_0)} dr
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

$\Delta\varphi_i$ - здесь означает, что вычисляются одномерные массивы при фиксированных значениях углов $\Delta\varphi_i$, P_n - массив данных вдоль выбранного «диаметра».

Далее на основании теоремы о центральном сечении, производится синтез части 3D Фурье образа исследуемого объекта – т.е. в дискретном шаре Фурье будет заполнено только 4 круговых области, сориентированных друг относительно друга в соответствие с геометрией получения исходных 2D проекций. Задача доопределения сводится к выполнению процедур интерполяции по кольцевым гармоникам. Для выполнения процедур интерполяции задаются сферические Фурье-гармоники, представляющие собой комбинации кольцевых гармоник. Шаг дискретизации при выборе сферических и затем кольцевых гармоник задается форматом реконструируемого массива для объекта. Шаг дискретизации по радиальным направлениям 3D Фурье – спектра должен быть порядка $\Delta R_j = 2\pi / \Delta r_j$. В зависимости от конфигурации формы исследуемых объектов определяются кольцевые гармоники, по которым производится вычисление недостающих отсчетов. По кольцевым гармоникам производится вычисление спектров проекций, с помощью методов интерполяции. Это дополняет 3D-Фурье спектр, т.е. полностью заполняется Фурье пространство в объеме дискретного «шара». Выполнив теперь процедуры обратных Фурье – преобразований для полного набора спектров проекций в пространстве сигналом мы имеем дело с полным набором 1D проекционных данных в сферической системе координат (3D-SSK, см рис. 2 а)). Теперь достаточно точно можно реконструировать двумерные сечения, для углов $(\varphi_j; \theta_k)$.

Имея наборы 2D-сечений, восстанавливаемые методами свертки [3,4], после пересчета данных из каждой полярной системы в декартову, несложно сформировать искомые 3D-распределения параметров плазмы. Их удобно представить в виде изопараметрических кривых соответствующим образом расположенных в 3D пространстве в виде аксонометрических (проекционных) изображений (см. рис. 2 а)). Однако, восприятие таких изображений затруднительно, несмотря на возможности их наблюдения в любом ракурсе. Задача восприятия реконструированных данных значительно облегчается, если информацию представить в виде стереоскопического проекционного изображения изопараметрических значений [3]. На рис. 3 приведены результаты модельного эксперимента по восстановлению искомым функциональных распределений и способы отображения полученной информации. В основу модели положено распределение интенсивности индуцированного излучения бескорпусного транзистора (КТ 308), помещенного в вакуумную камеру (давление аргона ~ 250 Па). Напряжение на обкладках 20 кВ, частота импульсов 20 кГц. Результирующая погрешность алгоритмов реконструкции $(6\div 10)\%$.

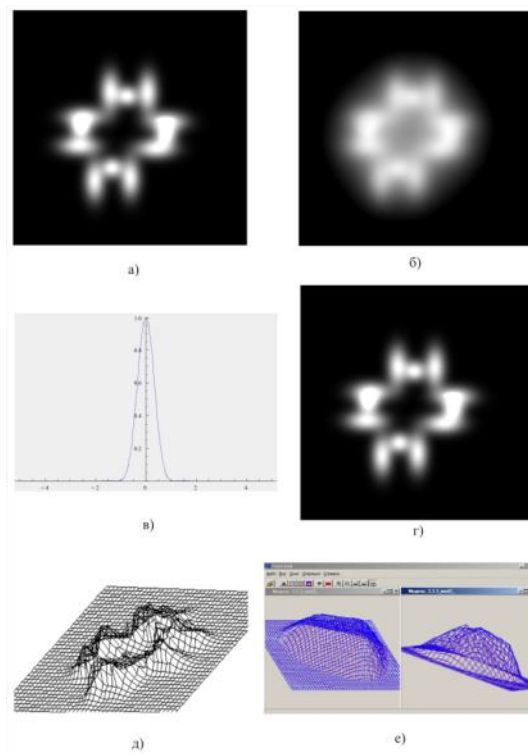


Рис. 3. Иллюстрация модельного эксперимента а) – исходное (модельное) распределение интенсивности в сечении, б) – реконструкция по 4 2D проекционным данным, в) – вид ядра, в) – реконструкция по полному набору данных, д) – проекционное отображение сечения в заданном ракурсе, е) – стереопроекционное представление

Выводы

1. Разработаны высокоэффективные методы и алгоритмы реконструкции плазменных образований, возбуждаемых в индуцированных высокочастотных электромагнитных полях в условиях ближнего космоса.
2. Разработана малогабаритная 3D томографическая система для исследования индуцированных плазменных образований на борту наноспутников.

Литература

1. Филонин О.В. Малоракурсная томография, Самара, СНЦ РАН, 2006, -256 с.
2. Пикалов В.В., Преображенский Н.Г. Реконструктивная томография в газодинамике и физике плазмы. Новосибирск. - Наука. 1987, 230 –с.
3. Филонин О.В. Малоракурсная реконструктивная томография в физическом эксперименте // Saarbrücken, Germany: Palmarium Academic Publishing, 2012. 606 с.
4. Faridani, E.L. Ritman and U.T. Smith, “Local tomography II”, SIAM J. Appl. Math. v. 57, 1997, p. 1095–1127.