ПЕРСПЕКТИВЫ ЧИСЛЕННОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ РАДИОИСТОЧНИКА В РАВНОВЕСНОЙ ПЛАЗМЕ

Ступишин А.Г.¹, Кальтман Т.И.²

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

²Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

PROSPECTS FOR NUMERICAL RECONSTRUCTION PARAMETERS OF THE RADIO SOURCE'S ATMOSPHERE IN AN EQUILIBRIUM PLASMA

Stupishin A.G.¹, Kaltman T.I.²

¹SPBU, St. Petersburg, Russia

²SAO RAS, St. Petersburg, Russia

The paper presents the development of an iterative method for reconstructing the height temperature profile based on modeling radio observations of a solar spot source in a reconstructed magnetic field. The method shows high quality of atmospheric parameters recovery on realistic models. A system of equations is introduced for finding temperatures at different altitudes with additional regularizing equations connecting temperatures at neighboring altitudes. The possibility of reconstructing different atmospheres over different active regions zones into the algorithm and using observations of a radio telescope RATAN-600 with an one-dimensional diagram at different scan points is developed. An example of using the method of reconstruction of the temperature profile of a radio source for a dipole magnetic field model for different points of the simulated scan and for different atmospheres (above an umbra and a penumbra) is given. The possibility of generalizing the method using data from radio telescopes with a two-dimensional antenna pattern is indicated. Further prospects for the development of the method for reconstruction of radio source plasma parameters are discussed.

DOI: 10.31725/0552-5829-2020-281-284

1. Введение

Несмотря на многие годы исследований и значительный прогресс в теории и наблюдениях солнечной атмосферы, характеристики атмосферы над солнечными пятнами до сих пор остаются вызовом для солнечной астрономии. Работа посвящена развитию реконструкции параметров солнечной атмосферы (высотного профиля электронной температуры и, до некоторой степени, электронной плотности) над активной областью (АО) на основании реконструированного магнитного поля и данных многочастотных наблюдений (в частности, радиотелескопа РАТАН-600).

Такой метод был предложен нами в работе [1] на основе моделирования радионаблюдений циклотронного излучения в реконструированном магнитном поле. Однако нами были найдены недостатки, способы устранения которых мы представляем в настоящей работе, а также реализуем некоторые новые возможности метода и очерчиваем его перспективы.

2. Усовершенствование метода численной реконструкции температурного профиля

Основная проблема в реализации метода в [1] состояла в том, что мы привязывали излучение на определенной частоте к одной “эффективной” высоте, в то время как излучает довольно большой диапазон высот. Также важно, что обе гармоники вносят вклад в излучение. Это приводило к плохой сходимости итераций. Кроме того, приходилось вводить дополнительную процедуру, обеспечивающую монотонность роста температуры с высотой.

Суть усовершенствованного метода состоит в следующем. Разобьем весь диапазон высот на некоторый набор “рабочих интервалов”. Каждый интервал будем характеризовать центром интервала и характеристической температурой. Зададим некоторый высотный профиль температурной зависимости. Для каждой частоты наблюдения и для каждой поляризации возьмем смоделированную на этой частоте радиокарту, домноженную на диаграмму направленности антенны, например, РАТАН-600, позиционированную в некоторой точке скана и определим вклад каждого интервала высот в полный расчетный поток. Наша цель — скорректировать заданный профиль температурной зависимости так, чтобы расчетный поток был равен наблюдаемому потоку. Введем для каждого высотного интервала корректирующий множитель температуры α . Тогда все вышесказанное можно записать как систему линейных уравнений для всех частот и обеих поляризаций для нахождения всех α .

Для повышения устойчивости решения дополняем систему уравнениями, связывающими температуры на соседних высотах. Веса добавочных уравнений могут быть подобраны так, чтобы не сильно исказить искомый профиль температуры, но при этом повысить устойчивость решения. Получается переопределенная система уравнений, которую будем решать методом наименьших квадратов (из-за недостатка места сами уравнения здесь не приведены и будут опубликованы в расширенной статье). Полученное таким образом решение используется для построения нового температурного профиля для следующей итерации.

3. Обобщение метода для разных точек смоделированного скана и для разных атмосфер и его тестирование на модели диполя

Итак, выше введена система уравнений для поиска температуры на различных высотах с дополнительными регуляризирующими уравнениями, связывающими температуры на соседних высотах. Т.к. использование одной модели атмосферы на всю АО может приводить к “размыванию” переходной зоны по высоте, разработана возможность ввода в алгоритм разных атмосфер над разными зонами АО и использования наблюдений в разных точках скана (рис. 1).

Рис. 1 Схематическое изображение положения ДНА в трех точках скана под разными зонами солнечного пятна.

В работе ([1]) для моделирования был использован спектр в одной точке — максимуме скана. Теперь в качестве исходных данных возьмем спектры в нескольких точках скана соответственно областям с предположительно различными высотными профилями температуры (тень, полутень, спокойное Солнце) и найдем профили над тенью и полутенью.

Рис. 2. Вверху 2 левые панели: высотные профили температуры над тенью и полутенью. Средний ряд — спектры в правой поляризации в трех точках скана. Внизу — то же для левой поляризации. Толстые линии — правильно найденное решение, тонкие — начальный шаг итерации, серые — ход итераций. Снижение невязки в ходе итераций для всех трех позиций показано вверху справа.

Проведем дальнейшее обобщение системы уравнений: расширим ее на несколько точек скана и на несколько зон излучающей области, например, тени и полутени и введем дополнительное условие на отсутствие резкого скачка температуры на границе тени и полутени. Пример работы метода с решением такой системы уравнений для модели дипольного магнитного поля приведен на рис. 2.

Предложенный подход очевидным образом обобщается на произвольное количество зон с различной атмосферой и соответствующих точек

скана. При достаточно стабильном магнитном поле возможно использовать данные наблюдений в различных азимутах РАТАН-600. Отметим также, что предложенное обобщение не опирается на специфическую форму ДНА РАТАН-600 и может быть применено к любому инструменту с двумерной диаграммой при достаточно большом количестве наблюдаемых частот в достаточно широком диапазоне. Это позволит более подробно определить температурные профили АО.

Результаты и выводы

1. Разработанный метод показывает высокое качество восстановления параметров атмосферы на реалистичных моделях магнитного поля и электронной температуры.
2. Моделирование радионаблюдений для случаев дополнительного прогрева части атмосферы АО перспективно для диагностики данным методом температурных профилей вспышечно-активных областей, областей с плазменными струями и в целом на применимость результатов реконструкции параметров атмосферы к различным энерговыделяющим процессам.
3. Важным условием применения метода является наличие сильных магнитных полей, достаточных для возникновения циклотронного излучения (со стратификацией по гироуровням).
4. Метод может быть обобщен на:
 - учет различной структуры атмосферы над различными зонами пятна (тенью, полутенью);
 - наблюдения в нескольких точках одномерного скана и наблюдения на инструментах с двухмерным разрешением (например, SPG, EOVSА, VLA, MUSER);
5. Дальнейшие перспективы развития метода:
 - использование дополнительных наблюдений (например, ALMA в суб-ТГц, УФ (AIA)) ;
 - учет вклада нетепловых электронов электронов (комбинирование с алгоритмом фитирования [3]).

Работа поддержана грантами РФФИ 18-29-21016 и 18-32-20165.

Литература

1. Stupishin A.G., T.I. Kaltman, V.M. Bogod, L.V. Yasnov // Solar Phys., 2018, 293, 13.
2. Alissandrakis C.E., V.M. Bogod, T.I. Kaltman, et al. // Solar Phys., 2019, 294(2), 23.
3. Gary D.E., G.D. Fleishman, Nita, G.M. // 2013, 288, 549.