

УДК 523.98

НОВЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ ПОПЕРЕЧНОГО ПОЛЯ ВЕКТОР-МАГНИТОГРАММ

И.И. Мышьяков, Г.В. Руденко

NEW METHOD FOR DETERMINING THE DIRECTION OF TRANSVERSE FIELD OF VECTOR-MAGNETOGRAMS

I.I. Mysh'yakov, G.V. Rudenko

Классический способ решения проблемы π -неопределенности векторных измерений поперечного фотосферного поля основывается на согласовании с ориентацией расчетного потенциального поля. Очевидно, что в случае заметного отклонения от потенциальности поля магнитных областей доля неправильных направлений поперечного поля, определяемых в узлах измерений, может быть существенна. Мы предлагаем метод решения указанной проблемы, основанный исключительно на обработке локальных количественных характеристик данных измерений и использовании следствий теоремы Стокса для произвольного вихревого поля.

Нами представляются результаты, иллюстрирующие хорошее восстановление направлений поперечного поля в узлах модельных магнитограмм аналитически задаваемого бессилового поля с неоднородным параметром α ($\text{rot } \vec{B} = \alpha(r) \vec{B}$). Для сравнения приводятся результаты обработки тех же магнитограмм классическим способом.

Classical method for solution the problem of π -uncertainty of vector measurements of transverse photospheric field is based on the consistency with orientation of the calculated potential field. It is obvious that in the case of significant deviation from potentiality of magnetic regions field the part of the transverse field irregular directions determined in the measurement points can be considerable. The method is proposed for solution of the foregoing problem based purely on the processing the local quantitative characteristics of the measurement data and on using the consequences of the Stokes theorem for arbitrary vortex field.

The results are presented which demonstrate close reconstruction of transverse field directions in model magnetogram points of analytically specified force-free field with inhomogeneous α parameter ($\text{rot } \vec{B} = \alpha(r) \vec{B}$). The results of processing of the same magnetograms using the classical method are presented.

Введение

Среди процессов, протекающих на Солнце, особый интерес для исследования представляет совокупность периодически возникающих в солнечной атмосфере явлений, объединяемых термином «солнечная активность». Состояние вещества внутри и вне активной области отличается по температуре, характеру движения и другим параметрам. Это объясняется тем, что солнечное вещество, находящееся в состоянии плазмы, подвержено воздействию со стороны магнитного поля, которое локально усилено в активных областях. Таким образом, для объяснения и прогнозирования развития процессов солнечной активности необходимо обладать информацией о распределении магнитного поля в изучаемых областях.

В рамках задачи измерения солнечного магнитного поля существует так называемая проблема π -неопределенности – это принципиальная особенность, не позволяющая сделать однозначного вывода о направленности одной из компонент поля. В работе приводится краткое рассмотрение способа измерения магнитного поля и пути устранения π -неопределенности. Основной частью данной работы является описание альтернативного метода решения обозначенной проблемы, основанного на общих закономерностях локальных магнитных полей.

Постановка проблемы π -неопределенности

Измерение солнечных магнитных полей основано на эффекте Зеемана. В магнитном поле спектральные линии излучения атомов расщепляются, а само излучение поляризуется. В магнитном поле можно выделить две составляющих: параллельную и перпендикулярную лучу зрения. Продольное поле расщепляет линию излучения на две циркулярно

поляризованные компоненты. Поперечное поле – на две смещенные и одну несмещенную компоненты, которые линейно поляризованы, причем несмещенная поляризована вдоль поля. Величина расщепления и параметры линейной поляризации зависят только от напряженности поля, т.е. из анализа приходящего света нет возможности определить направление его поперечной составляющей, – в этом и состоит проблема π -неопределенности.

Метод потенциального приближения

Часто π -неопределенность устраняется с привлечением метода потенциального приближения [1, 2], который позволяет создать модель потенциального поля, имея информацию о распределении одной компоненты поля, что эквивалентно задаче Неймана. В действительности из измерений солнечного магнитного поля выделяется продольная составляющая и используется в качестве граничного условия. После того, как потенциальное поле рассчитано, направление его поперечной компоненты сравнивается с таковой у измеренного поля. Там, где разница между азимутами больше $\pi/2$, направление измеренного поля изменяют на обратное. Практика показывает, что во многих случаях реальное солнечное магнитное поле хорошо может быть интерпретировано в рамках потенциальной модели. В то же время, магнитное поле по своей природе не является потенциальным, а значит, на поверхности Солнца должны существовать конфигурации поля, в которых его поперечная компонента может сильно отличаться от потенциальной как по модулю, так и по направлению, и применение в таких случаях данной модели является недопустимым.

Альтернативный метод

Предлагаемый метод основан на том, что магнитные поля, представляющие интерес для исследования, выделяются над общим шумовым фоном и имеют некую упорядоченную структуру. О топологии таких полей можно судить, наблюдая за различными образованиями в солнечной атмосфере, составленными из плазмы, ориентированной вдоль силовых линий [3–5]. Например, в области солнечных пятен магнитное поле имеет значительную напряженность, зона полутени состоит из большого количества волокон, соответствующих распределению поперечного поля. В хромосфере условия вмороженности силовых линий также удовлетворяются, вследствие низкой концентрации вещества доминирующее влияние имеет магнитное поле, поэтому наблюдаемые на фильтраграммах линии H α тонкие хромосферные структуры также дают представление о конфигурации поперечного поля.

Это дает возможность предположить, что в реальной ситуации градиент крупномасштабных магнитных полей не должен быть очень большим и существует возможность проследить плавное изменение вектора поля как по модулю, так и по направлению. Перечисленные условия являются необходимыми – таким образом, в качестве входных данных должны использоваться магнитограммы с высоким разрешением, предоставляющие максимально подробную информацию о поле.

Суть предлагаемого метода заключается в том, что при обработке векторной магнитограммы производится сравнение азимута поперечной компоненты магнитного поля в одной точке с азимутами в окружающих точках. Условие того, что магнитное поле должно непрерывно меняться в пространстве означает, что азимуты в соседних узлах магнитограммы не должны слишком резко различаться между собой. Действительно, маловероятно, если посреди какой-либо области квазиродного поля существовали бы вкрапления с полем того же порядка напряженности, но направленное в противоположную сторону.

На основе данного метода был разработан алгоритм решения проблемы π -неопределенности, который отрабатывался на модели нелинейного бессилового осесимметричного магнитного поля, предложенной в [6]. Бессилое поле описывается уравнениями:

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \alpha \vec{B}, \quad (1)$$

$$\vec{B} \cdot \vec{\nabla} \alpha = 0, \quad (2)$$

где α – параметр бессилового приближения. Поле называется линейным, если $\alpha = \text{const}$ (в частности, если $\alpha = 0$, то из (1) следует, что поле является потенциальным) и нелинейным, если α зависит от координат.

Уравнение модельного поля в сферических координатах:

$$\vec{B} = \frac{1}{r \sin \theta} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial A}{\partial \theta} - \frac{\partial A}{\partial r} \vec{\theta} + Q \vec{\phi} \right), \quad (3)$$

где A и Q – скалярные функции. Из (1) и (2) следует, что они связаны уравнениями:

$$\alpha = \frac{dQ}{dA}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 A}{\partial r^2} + \frac{1-\mu^2}{r^2} \frac{\partial^2 A}{\partial \mu^2} + Q \frac{\partial Q}{\partial A}, \quad (5)$$

где $\mu = \cos \theta$. Решение (5) может быть представлено в виде:

$$A = \frac{P(\mu)}{r^n}, \quad (6)$$

$$Q(A) = aA^{1+1/n}, \quad (7)$$

где a и n – константы и скалярная функция $P(\mu)$ удовлетворяет уравнению:

$$(1-\mu^2) \frac{d^2 P}{d\mu^2} + n(n+1)P + a^2 \frac{1+n}{n} P^{1+2/n} = 0. \quad (8)$$

Граничные условия для этого уравнения:

$$P = 0 \text{ при } \mu = \pm 1. \quad (9)$$

Для решения (8) требуется также знание первой производной $P(\mu)$. Во всех рассматриваемых примерах принято:

$$\frac{dP}{d\mu} = 10 \text{ в точке } \mu = 1, n = 1. \quad (10)$$

Уравнение (8) решается численными методами, в результате получается распределенное в пространстве магнитное поле. Для данной задачи представляет интерес поле, соответствующее какой-либо части сфери-

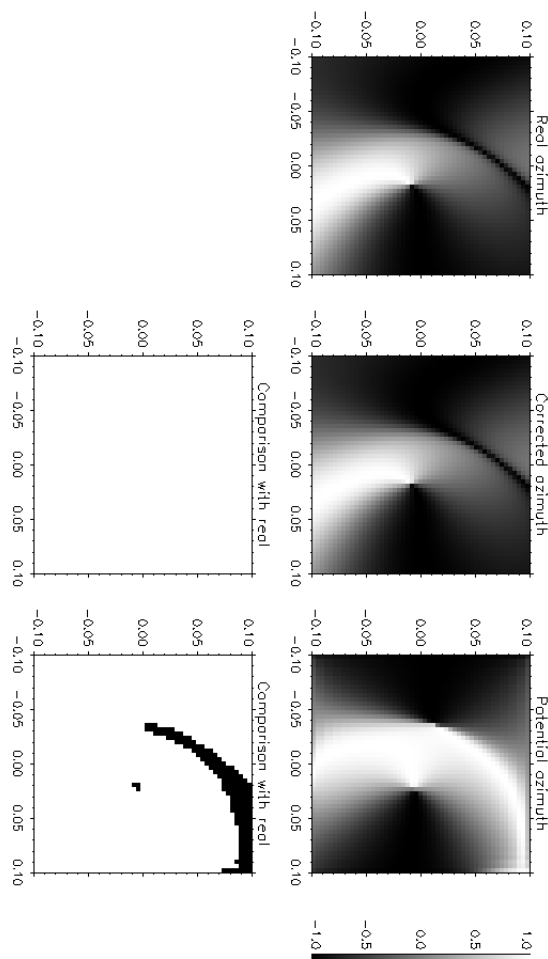


Рис. 1.

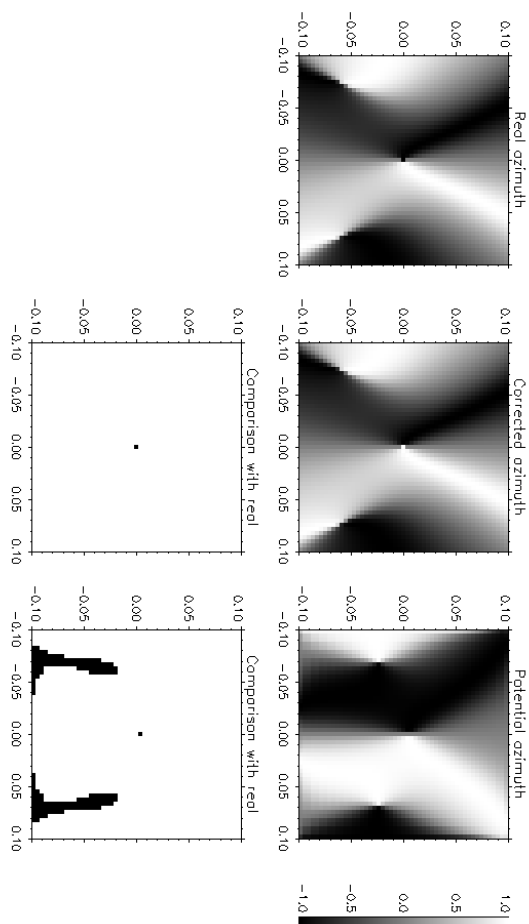


Рис. 2.

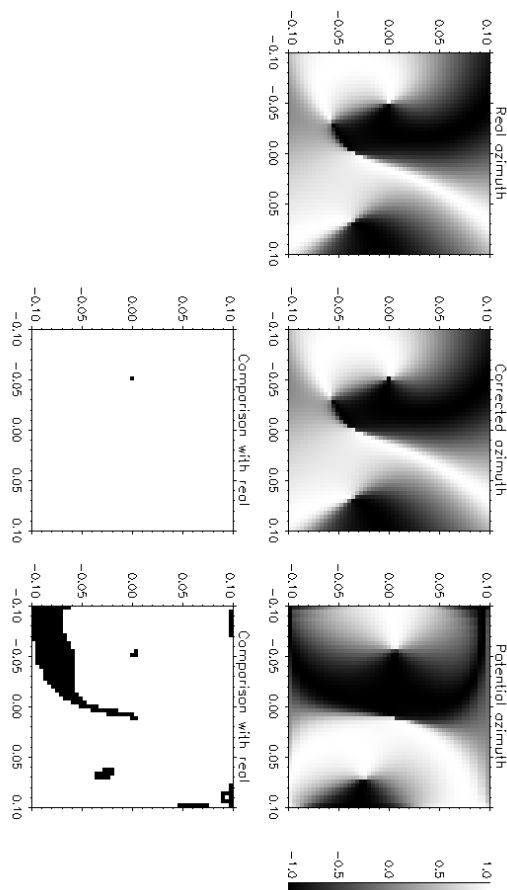


Рис. 3.

ческой поверхности, окружающей источник, которая в картинной плоскости выглядит как прямоугольная область. В этой области выделяются равномерно распределенные узлы, в которых фиксируется магнитное поле. Таким образом, формируется модельная магнитограмма. В алгоритме предусмотрена возможность изменять положение источника в пространстве и поворачивать его в одной плоскости, а также задавать размеры и положение исследуемой области на сферической поверхности, так что можно получать разнообразные примеры исходных данных.

В задаче предполагается, что информация о направлении вектора поперечной компоненты отсутствует (именно это и требуется определить), поэтому перед дальнейшей обработкой производится упорядочение этого направления, так чтобы в каждом узле магнитограммы проекция поля на ось X была положительной. Там, где она оказывается отрицательной, Y-компонента поля также меняет знак. Это делается для того, чтобы определить области магнитограммы, где поперечное поле, возможно, оказывается равным нулю. Такие области имеют важное значение, что будет разъяснено ниже.

После того, как было сделано упорядочение направления поперечного поля, выбирается начальная точка, в которой направление принимается истинным. Эта точка может, например, находиться на линии нулевого уровня продольной компоненты, разделяющей близко расположенные области противоположной магнитной полярности, в том случае, если вектор поперечной компоненты образует достаточно большой угол с касательной к линии нулевого уровня. Правильный выбор направления поперечного поля очевиден: из положительной в отрицательную область. В противном случае начальная точка берется произвольно из числа тех, в которых напряженность поля достаточно велика. При этом, конечно, нет гарантии, что в выбранном узле магнитограммы направление поперечной компоненты поля будет соответствовать действительности. В рамках рассматриваемого метода существует возможность восстановить направление только по отношению к какой-либо точке. Другими словами, результатом работы алгоритма является магнитограмма, либо полностью соответствующая реальному полю, либо полностью инвертированная по направлению поперечной компоненты. Возникающая неоднозначность может быть снята применением метода потенциального приближения.

Исправление магнитограммы происходит следующим образом: вокруг начальной точки выделяется граница, состоящая из ближайших точек, стоящих в той же строке или столбце, и производится последовательное сравнение по азимуту поперечной составляющей поля начальной точки с граничными. Если разница больше $\pi/2$, в соответствующем граничном узле изменяется направление поперечной компоненты. После первого цикла все множество граничных точек присоединяется ко множеству исправленных точек, вокруг которого формируется новая граница. Такие циклы повторяются до тех пор, пока не останется необработанных узлов магнитограммы. Особое внимание обращается на те

области, в которых поперечное поле зануляется, так как при переходе через них вектор поля может в принципе поменять свое направление, т.е. разность между азимутами соседних узлов будет примерно π . В этом случае алгоритм сработает неправильно. Чтобы этого не произошло, такие области изначально должны быть исключены из обычного порядка рассмотрения и обработаны в последнюю очередь, после того как будет исправлено направление поля в значительном количестве узлов, где нет подобной неоднозначности.

Если начальная точка выбиралась произвольно, то после того как входная магнитограмма будет полностью обработана, требуется определить, соответствует ли действительному направлению поля в этой, а, значит, и в любой другой точке. Для ответа на этот вопрос применяется метод потенциального приближения. Как уже упоминалось, в реальности солнечное магнитное поле во многих случаях хорошо совпадает с потенциальной моделью. Таким образом, необходимо найти области, в которых реальное поле будет близко к потенциальному. Для оценки степени потенциальности магнитного поля используется параметр бессилового приближения α . Чем меньше значение модуля этого параметра, тем более потенциально поле. Для расчета параметра α используется формула Стокса:

$$\int (\vec{\nabla} \times \vec{B}) \cdot d\vec{S} = \int \vec{B} \cdot d\vec{l}. \quad (11)$$

откуда с учетом (1) следует:

$$\alpha = \int_L \vec{B} \cdot d\vec{l} / \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}. \quad (12)$$

Обладая полной информацией о векторе магнитного поля, для каждого узла магнитограммы можно рассчитать α (абсолютное значение не зависит от ориентации поперечной компоненты), тем самым определив границы применимости потенциального приближения. Наибольшее совпадение между реальным и потенциальным полями должно быть в области минимальных абсолютных значений бессилового параметра. В пределах этих границ поле в узлах магнитограммы должно быть примерно сонаправлено с восстановленным потенциальным. Если имеет место обратная ситуация, значит, в начальной точке направление вектора было неверным и требуется инвертировать направление поперечной составляющей поля во всех точках магнитограммы.

На рис. 1–3 показаны примеры распределения косинуса угла наклона поперечной компоненты моделируемого поля к оси X и той же компоненты потенциального поля. Для каждого случая обозначается область, в которой направления поля не совпадают с эталонным. Предлагаемый метод во всех случаях дал практически полное совпадение с известным полем, исключение составили лишь некоторые особые точки, вблизи которых поперечная составляющая обращалась в нуль.

Заключение

Сравнительный анализ результатов работы двух путей устранения проблемы неопределенности показал, что предлагаемый метод при соблюдении указанных условий дает лучшие результаты. Был сформулирован критерий применимости потенциального приближения, что позволяет указывать области наиболее эффективного его применения, а также одновременно использовать эти два метода как взаимодополняемые.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sakurai T. // Solar Phys. 1982. V. 76. P. 301.
2. Haguard M.J., Teuber D. // Bulletin of the American Astronom. Society. 1977. V. 9. P. 340.
3. Foukal P. // Solar Phys. 1971. V. 19. P. 59.
4. Zirin H. // Solar Phys. 1972. V. 22. P. 34.
5. Kawakami S., Makita M., Kurokawa H. // Publ. of Astronomical Society of Japan. 1989. V. 41, N 1. P. 175–195.
6. Low B.C., Lou Y.Q. // Astronomical J. 1990. V. 352. P. 343–352.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск