

Э. Г. Мирзабекян

## Сравнение методов исследования поляризации радиоизлучения космических источников

Разработка методов исследования степени поляризации радиоизлучения космических источников является актуальной задачей, так как результаты поляризационных измерений могут дать ответ на многие вопросы, стоящие перед радиоастрономией. В частности, данные о степени поляризации радиоизлучения позволяют судить о магнитных полях излучающих объектов и магнитных полях в среде, через которую распространяется это излучение. В литературе совершенно нет данных о степени и характере поляризации радиоизлучения космических источников в 3-сантиметровом диапазоне длин волн. Между тем наряду с изучением поляризации в диапазоне более длинных волн исследование степени поляризации радиоизлучения в 3-сантиметровом диапазоне волны может дать ценные результаты. В самом деле, рассмотрение влияния постоянного магнитного поля на распространение радиоволн показывает [1], что это влияние характеризуется отношением

$$U = \left( \frac{\omega_H}{\omega} \right)^2 = \frac{e^2 H_0^2}{m^2 c^3 \omega^2},$$

где  $\omega_H$  — гироскопическая частота,  
 $\omega$  — радиочастота,  
 $H_0$  — постоянное внешнее магнитное поле.

В солнечных пятнах, где  $H_0$  порядка нескольких тысяч эрстед, гироскопическая частота  $\omega_H \approx 10^{10}$ , т. е. лежит в сантиметровом диапазоне длин волн. Таким образом, влияние магнитного поля пятен может быть существенно для 3-сантиметрового диапазона радиоволн. Исследование поляризации радиоизлучения в трехсантиметровом диапазоне представляет интерес и для других объектов, у которых поля значительно слабее, но где при наблюдении с помощью установок, имеющих достаточно высокую чувствительность, можно обнаружить слабые степени поляризации.

Разработанный нами поляризационный прибор [2, 3] является, по-видимому, первой поляризационной установкой для измерения степени поляризации радиоизлучения на волне 3,2 см, поскольку до сих пор подобные установки в литературе описаны не были. В нашей статье [3] подробно был описан разработанный метод исследования по-

ляризации радиоизлучения и были указаны возможности поляризационного радиометра.

Из данных измерений поляризации радиоизлучения космических источников, проведенных с помощью поляризационного радиометра, можно получить ряд сведений, к числу которых относятся сведения:

1. О координатах источников поляризованного излучения.

2. О магнитных полях солнечных пятен и общем магнитном поле Солнца.

3. О зависимости степени и характера поляризации радиоизлучения от развития солнечных пятен.

4. О направленности поляризованного излучения солнечных пятен. Наблюдая изменение характера поляризации радиоизлучения при движении пятна по солнечному диску, можно определить направленность поляризованного излучения. Данные о направленности поляризованного радиоизлучения на волне 3,2 см позволяют судить об условиях распространения радиоволн данного диапазона в солнечной атмосфере. Эти данные могут быть полезными при оценках тех или иных параметров солнечной атмосферы.

5. О градиентах и конфигурациях магнитных полей. Как известно, радиоизлучение Солнца в 3-сантиметровом диапазоне волн идет из слоев более глубоких, чем излучение метрового и дециметрового диапазонов. Поэтому результаты поляризационных измерений сантиметрового диапазона дают сведения о магнитных полях более глубоких слоев солнечной атмосферы.

Таким образом, из сравнения результатов поляризационных измерений на волнах различной длины можно получить сведения о конфигурациях и градиентах магнитных полей солнечных пятен.

6. О механизме «всплесков» радиоизлучения Солнца. Данные измерений степени и характера поляризации «всплесков» радиоизлучения Солнца будут способствовать выяснению вопроса о происхождении таких всплесков.

7. О магнитных полях дискретных источников радиоизлучения. Как известно, радиоизлучение туманностей заставило высказать предположение [4—6] о наличии в них релятивистских электронов, движущихся в магнитных полях. Для выяснения роли излучения релятивистских электронов в туманностях большое значение имеет изучение поляризации радиоизлучения. В работе Гарибяна и Гольдмана [7] показано, что степень поляризации излучения слабо зависит от вида спектра. Если в радиоизлучении некоторых туманностей основной вклад вносят релятивистские электроны, движущиеся в магнитных полях, то следует ожидать, что степень поляризации радиоизлучения будет такого же порядка как и излучения в оптической области.

Данные о поляризации радиоизлучения дискретных источников дадут сведения о магнитных полях в областях, из которых исходит излучение. Эти сведения могут оказаться важными и с точки зрения проблемы происхождения космических лучей, так как многие гипотезы

зы о происхождении космических лучей связываются с наличием магнитных полей, необходимых для ускорения частиц космического излучения.

В литературе имеется ряд работ по измерению степени поляризации радионизлучения космических источников. Подавляющее большинство этих работ относится к метровому диапазону волн. Авторы их [8—11] пользуются интерференционным методом измерений. Как известно, интерференционная методика наблюдений радионизлучения космических источников нашла широкое применение в метровом диапазоне, где этот метод позволяет получать с антеннами сравнительно малых размеров достаточно узкие лепестки диаграммы направленности. При измерениях степени поляризации принимаемого радионизлучения две поляризованные антенны интерферометра располагаются таким образом, чтобы они принимали волны взаимно перпендикулярной поляризации. При этом, если принимаемое излучение неполяризовано, то интерференционная картина не будет наблюдаться. Если же в принимаемом излучении есть поляризованная компонента, то при прохождении источника через диаграмму интерферометра будет наблюдаться интерференционная картина. В самом деле, неполяризованное излучение возбуждает в антеннах две некогерентные составляющие, и поэтому при прохождении источника через диаграмму направленности интерферометра, когда периодически меняется разность хода в двух антеннах, интерференция не наблюдается. С другой стороны, поляризованное излучение возбуждает в антеннах когерентные колебания, и поэтому при изменении разности хода наблюдается периодическое изменение интерференционной картины. Изменяя ориентировку антенн, по наблюдению глубины модуляции интерференционной картины, можно в некоторых частных случаях исследовать характер поляризации. Такой же метод исследования поляризации применяется в более совершенном интерферометре, осуществленном Райлем [12]. В этом интерферометре периодическим введением в одно из плеч интерферометра отрезка фидера длиной  $\frac{\lambda}{2}$  осуществляется „качание“ диаграммы. При этом диаграмма в пространстве смещается так, что максимумы и минимумы периодически меняются местами, и на выходе появляется периодический сигнал, пропорциональный (при соответствующих соотношениях угловых размеров лепестков и источника) разности мощностей фона и источника.

Единственной описанной в литературе установкой, предназначенной для измерения степени поляризации радионизлучения Солнца в сантиметровом диапазоне волн, является установка Ковингтона [13] на длине волны 10,7 см. Установка эта представляет собой обычный модуляционный радиометр с параболическим зеркалом (диаметр  $\Phi = 122$  см), впереди которого расположена сетка из металлических пластин. Расстояния между пластинками этой сетки подобраны так, чтобы между двумя взаимно-перпендикулярными компонентами пло-

ской волны, прошедшей через такую сетку, создавался сдвиг фаз, равный  $90^\circ$ . Иначе говоря, эта сетка была аналогом „пластинки  $\frac{\lambda}{4}$ “. Циркулярно-поляризованная компонента принимаемого излучения, пройдя через такую „пластинку  $\frac{\lambda}{4}$ “, оказывается линейно-поляризованной под углом  $+45^\circ$  или  $-45^\circ$  к осям пластинки, в зависимости от знака вращения. Помещенный в фокусе зеркала в качестве облучателя диполь перекидывался через каждые 30 сек на  $90^\circ$  и ориентировался вдоль этих двух взаимно перпендикулярных направлений. Таким образом, в одном положении диполя принималось неполяризованное излучение и компонента, поляризованная по левому кругу, в другом — неполяризованное излучение и компонента, поляризованная по правому кругу. Разность показаний выходного прибора при двух положениях диполя была пропорциональна разности интенсивностей двух компонент циркулярно-поляризованного излучения.

Проведем сравнение вышеописанных методов с новым методом [2, 3] исследования поляризации радиоизлучения при помощи поляризационного радиометра на длине волны  $\lambda = 3,2$  см.

I. При поляризационных измерениях степени поляризации радиоизлучения Солнца методом Ковингтона происходит модуляция всего принимаемого радиоизлучения, т. е. вместе с модуляцией, подлежащей измерению слабой поляризованной компоненты, модулируется и сильный неполяризованный фон. Ясно, что ошибка измерений поляризованной компоненты при таком методе — порядка флуктуаций фона. Как показывают многочисленные измерения эти флуктуации — порядка 2% (а в случае активного Солнца, значительно больше).

Наличие большого сигнала от всего Солнца не дает возможности Ковингтону работать при высокой чувствительности аппаратуры.

Поляризационный радиометр, не давая модуляции неполяризованного фона, свободен от этих недостатков.

II. Как указывает Ковингтон [14], вследствие несовершенства аппаратуры и методики, в приемник его установки просачивалось 2% мощности излучения с поляризацией обратного направления. Это просачивание обусловлено использованием диполя и металлической сетки.

В поляризационном радиометре ошибка такого рода вообще исключена.

Таким образом, даже без учета паразитных эффектов иного характера — интерференционного эффекта, флуктуаций коэффициента усиления и т. д. — чувствительность установки Ковингтона к поляризованному излучению Солнца, т. е. минимально различимая интенсивность поляризованного радиоизлучения Солнца на фоне неполяризованного его излучения, составляет 2% от общей интенсивности.

Экспериментально определенная, с помощью „креста поглощающих“, чувствительность нашей установки к поляризованному излучению по температуре антенны равна

$$\delta T_a = 1^\circ K.$$

При поляризационных измерениях по Солнцу эта чувствительность несколько ухудшается, ввиду увеличения шумфактора и появления некоторых паразитных эффектов.

Фактически она в худших случаях оказалась равной на фоне Солнца

$$\delta T_a' = 2^\circ K.$$

Это составляет примерно 0,03% от температуры антенны при приеме общего радиоизлучения Солнца (температура антенны при приеме общего радиоизлучения Солнца  $\approx 6000^\circ K$ ). Итак, чувствительность нашего поляризационного радиометра к поляризованной компоненте радиоизлучения Солнца выше чувствительности единственной известной из литературы поляризационной установки на волне 10,7 см примерно в 50 раз.

III. Как указывает Ковингтон [14], его метод не позволяет произвести полный анализ поляризации принимаемого радиоизлучения. В частности, он не позволяет отличить линейную поляризацию от эллиптической. При наличии эллиптической поляризации интенсивность и эллиптичность этой поляризованной компоненты не могут быть определены. Фактически его метод пригоден только для измерения излучения с круговой поляризацией.

Как указывалось в статье [3], поляризационный радиометр позволяет производить полный анализ поляризации принимаемого радиоизлучения.

IV. Ковингтоном совершенно не рассматривается паразитный эффект, могущий быть вызванным поворотом диаграммы направленности антенны в пространстве при перекидке диполя. В самом деле, диаграммы направленности диполя, применяемого Ковингтоном в качестве облучателя, в направлениях вдоль диполя и поперек его различны. Вследствие этого диаграмма направленности самой антенны в  $E$ - и  $H$ -плоскостях не одинаковы. При перекидке диполя на  $90^\circ$  вся диаграмма направленности вместе с ним поворачивается на  $90^\circ$ , что может привести к изменению интенсивности принимаемого излучения.

V. Разработанный нами метод поляризационной модуляции должен дать по сравнению с обычными радиометрами (в том числе и радиометром Ковингтона) особые преимущества при измерении поляризованных сигналов малой интенсивности.

В случае сигналов малой интенсивности в обычном радиометре сравнивается низкая температура антенны с гораздо более высокой температурой эквивалента, и вследствие большой разности температур существенные ошибки вносит непостоянство коэффициента усиления.

В самом деле, выходной уровень обычного радиометра пропорционален величине:

$$\Delta Tn = (T_s - T_c) \cdot n,$$

где  $T_s$  — температура эквивалента,  $T_c$  — температура сигнала, а  $n$  — коэффициент усиления аппаратуры. При изменении коэффициента усиления на  $dn$  выходной уровень изменяется на  $(T_s - T_c)dn$ , что может быть принято, ошибочно, за изменение сигнала на  $dT_c$ , т. е.

$$(T_s - T_c) dn = n \cdot dT_c.$$

Отсюда относительная ошибка в определении температуры сигнала равна

$$\frac{dT_c}{T_c} = \left( \frac{T_s}{T_c} - 1 \right) \frac{dn}{n}.$$

При измерениях сигналов малой интенсивности фактор  $\frac{T_s}{T_c} - 1 \gg 1$ , и поэтому незначительные изменения коэффициента усиления могут вызвать большую относительную ошибку в измерении температуры сигнала.

При  $T_s \approx T_c$ , т. е. при малых значениях  $\Delta T$ , можно достигнуть значительного уменьшения влияния непостоянства коэффициента усиления.

В поляризационном радиометре

$$\Delta T = [(T_\phi + T_c) - T_\phi] = T_c,$$

где  $T_\phi$  — температура неполяризованного фона;  $T_c$  — температура поляризованного сигнала.

Таким образом, в поляризационном радиометре, чем меньше интенсивность измеряемого поляризованного излучения, тем слабее влияние флуктуаций коэффициента усиления.

VI. В амплитудном радиометре ФИАН'а [15] применялся камертонный модулятор, который имеет некоторые преимущества по сравнению с ранее применявшимися модуляторами. Но этот способ модуляции в том виде, в каком он применялся в указанном радиометре, имеет ряд недостатков, к которым относятся следующие:

а) Глубина модуляции сигнала зависит от амплитуды колебания ножек камертона, к которым прикреплены находящиеся в волноводе поглощающие пластинки. Эта амплитуда зависит от режима работы камертонного генератора и меняется при изменении этого режима. Изменение же глубины модуляции сигнала, конечно, вызывает паразитное изменение показаний на выходе радиометра.

б) Заметная зависимость формы кривой модуляции сигнала от амплитуды колебания поглощающих пластинок. При большой глубине модуляции форма кривой модуляции сильно искажена. Это ведет к необходимости компромиссного решения, при котором чувствительность радиометра несколько понижается. Кроме того, изменения формы кривой модуляции в ходе измерений вследствие изменений амплитуды колебания камертона также приводят к паразитным изменениям показаний на выходе.

в) Коэффициенты поглощения и отражения поглощающих пластинок модулятора сильно зависят от температуры пластинок, т. е. температуры окружающего воздуха. Еще резче эти величины зависят от влажности. При изменении же этих величин меняется глубина модуляции сигнала и величина интерференционной ошибки измерений. Так как камертонный модулятор находится на антенне на открытом воздухе, где температура и влажность могут меняться в значительных пределах, то ошибки измерений, вызванные этими паразитными эффектами, могут быть относительно большими.

г) Выходной уровень амплитудного радиометра, как указывалось выше, пропорционален разности

$$\Delta T = T_c - T_s,$$

где  $T_c$  — температура сигнала, а  $T_s$  — температура эквивалента, т. е. температура поглощающих пластинок модулятора.

При изменении температуры окружающего воздуха меняется и температура поглощающих пластинок —  $T_s$ , что вызывает паразитное изменение разности  $\Delta T$ . Таким образом, ошибка в измерении температуры сигнала, вызванная только этим эффектом, порядка изменения температуры окружающего воздуха. Наша же установка, в которой применен новый модулятор — „поляризационный модулятор“, при поляризационных измерениях лишена недостатков, перечисленных в пунктах а) — г), ограничивающих чувствительность установки и вносящих ошибки в измерения.

В самом деле, как указывалось выше, при поляризационной модуляции:

- а) глубина модуляции равна единице;
- б) кривая модуляции, если мотор модулятора работает синхронно, всегда синусоидальна;
- в) так как поглощающих пластинок при поляризационных измерениях в высокочастотном тракте нет, наша установка лишена недостатков отмеченных в пунктах в) и г).

Более того, поляризационный модулятор можно рекомендовать и для применения в обычных амплитудных радиометрах с поляризованными облучателями, запитываемыми прямоугольным волноводом. При этом в таких радиометрах волноводный тракт с обеих сторон от модулятора должен иметь плавные переходы: до модулятора — с прямоугольного на цилиндрический волновод, после — с цилиндрического на прямоугольный. В цилиндрической части таких плавных переходов должны быть помещены поглощающие пластинки вдоль по диаметру, параллельному широкой стенке прямоугольного волновода. Такой способ модуляции, исключая некоторые недостатки, отмеченные выше, делает целесообразным применение нового поляризационного модулятора и в обычных амплитудных радиометрах.

VII. Другим возможным вариантом решения поставленной задачи, — измерения поляризации радиоизлучения в трехсантиметровом

диапазоне волн,—является использование интерференционного метода. Практически, обычные поляризационные интерференционные установки позволяют обнаруживать поляризованную компоненту только в тех случаях, когда интенсивность ее превышает 2—3% от общей интенсивности неполяризованного фона.

Описанный в литературе [12] новый радиointерферометр с качающейся диаграммой, предназначенный для измерений в метровом диапазоне волн, может быть также использован для измерения степени поляризации радиоизлучения. Имея ряд преимуществ по сравнению с обычной интерференционной методикой, эта методика при измерениях степени поляризации радиоизлучения имеет ряд недостатков, к числу которых относятся:

1) паразитная модуляция сигнала за счет изменения импедансов антенн при переключениях;

2) необходимость каждый раз учитывать соотношения угловых размеров источника и лепестков;

3) паразитная модуляция за счет краев излучающего объекта;

4) одновременная модуляция от каждой области, в общем случае, с произвольной фазой, при наличии более одной области поляризованного излучения, вследствие чего происходит резкое замазывание интерференционной картины;

5) необходимость частой тщательной фазовой калибровки плеч интерферометра;

6) измерения степени поляризации при помощи этой методики фактически пригодны только для циркулярно-поляризованной компоненты; эти измерения не позволяют произвести полный анализ поляризации принимаемого радиоизлучения: различить линейную от эллиптической поляризации, при наличии эллиптической поляризации—определить эксцентриситет эллипса поляризации;

7) взаимное просачивание в приемник циркулярно-поляризованной компоненты противоположного знака вращения;

8) паразитная модуляция относительно сильного неполяризованного фона: в два взаимно-перпендикулярных диполя просачиваются когерентные компоненты неполяризованного фона, которые могут дать, в случае сильного фона, заметную интерференцию.

Кроме перечисленных недостатков, связанных с методикой измерений, использование интерференционного метода с качающейся диаграммой в 3-сантиметровом диапазоне волн натолкнулось бы на ряд серьезных технических трудностей. Требования к точности сохранения параллельности электрических осей каждой антенны интерферометра настолько жестки, что практически возможно сделать только неподвижные антенны, не позволяющие вести наблюдения с сопровождением или наблюдения не в меридиане. Весьма жестки требования, обеспечивающие постоянство разности фаз между плечами интерферометра. Так, изменения вследствие температурного расширения

длины волноводов, соединяющих две интерференционные антенны, могут внести ощутимую фазовую расстройку.

Вообще, если применение интерференционной методики, позволяющей с антеннами сравнительно малых размеров решать ряд радиоастрономических задач по изучению радиоизлучения в метровом диапазоне волн, для решения которых методом „карандашного пучка“ (одна антенна с отражателем в виде параболоида вращения) необходимы были бы антенны громоздких размеров, вполне оправдано, то в сантиметровом диапазоне этого сказать нельзя, так как значительное уменьшение длины волны принимаемого излучения делает более целесообразным применение метода „карандашного пучка“.

Особые преимущества имеет метод „карандашного пучка“ при определении координат излучающих объектов.

В случае создания поляризационных интерференционных установок на волне 3,2 см с качающейся диаграммой эти установки, вследствие ряда вышеуказанных недостатков, по нашему мнению, не смогут пока заменить поляризационных радиометров и в лучшем случае будут служить необходимым дополнением к ним.

Бюраканская астрофизическая обсерватория  
АН Армянской ССР

Поступило 20 XI 1956

## Է. Լ. Միրզաբեկյան

### ՌԱԴԻՈՃԱՌԱԳԱՅԹՄԱՆ ԲԵՎԵՌԱՑՄԱՆ ՇԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅԱՆ ՄԵԹՈԴՆԵՐԻ ՇԱՄԵՍԱՏՈՒԹՅՈՒՆԸ

#### Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Հոդվածում բերված է կոսմոսիկան աղբյուրների ապիրոնաոպայթման բևեոացման հեաադատության՝ հեղինակի կողմից մշակված մեթոդի համեմատությունը նախկինում հայտնի մեթոդների հետ: Յուրջ է արված, որ նոր մեթոդն ունի մի շարք էական առավելություններ, որոնց թվին են պատկանում՝ ապիրոնաոպայթման չրևեոացված ֆունի շեղոքացումը, ապիրոնաոպայթման բևեոացման բնույթի լրիվ վերլուծության հնարավորությունը, փոքր ինտենսիվության բևեոացված ճառագայթման ժամանակ ընդունիչի ուժեղացման գործակիցի ֆլուկտուացիաների ազդեցության զգալի փոքրացումը, նոր մոդուլատորի կիրառման շնորհիվ միավոր խորություն և սինտոստիզիա ձև ունեցող մոդուլացիայի իրականացումը, ապիրոնաոպայթման համեմատորար ճշգրիտ րացարձակ կալիբրովկան:

Նոր մեթոդի այդ բոլոր առավելությունները թույլ են տվել ստեղծել նոր սարքավորում՝ բևեոացման ապիրոնաոպ, որը, նախկին սարքավորումների համեմատությամբ, ունի զգալիորեն ավելի մեծ զգայնություն:

Մասնավորապես, բևեոացման ապիրոնաոպի զգայնությունը Արեգակի ապիրոնաոպայթման բևեոացված բաղադրիչի նկատմամբ մոտ հիստն անգամ բարձր է գրականության մեջ հայտնի միակ 10.7 սմ ալիքի երկարության համար կառուցված բևեոացման սարքավորման զգայնությունից: Բևեոացման

ապիտեարի միջոցով հնարավոր է հայտնաբերել և չափել Արեգակի ապիտեառազայլման բևեռացված բաղադրիչը, եթե նրա ինտենսիվությունը կողմում է քնդանուր ինտենսիվության ավելի քան  $0.03\%$ -ը:

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Альперт Я. Л., Гинзбург В. Л., Феймберг Е. Л. Распространение радиоволн.
2. Кайдановский Н. Л., Мирзабекян Э. Г., Хайкин С. Э. Труды V совещания по вопросам космогонии. Изд. АН СССР, (1956).
3. Мирзабекян Э. Г. Сообщения Бюраканской обсерватории. XIX (1956).
4. Гинзбург В. Л. ДАН СССР, **76**, 376 (1951).
5. Гетманцев Г. Г. ДАН СССР, **83**, 557 (1952).
6. Шкловский И. С. Астрономич. журнал, **30**, 1 (1953).
7. Гарибян Г. М., Гольдман. Известия АН АрмССР, VII, 2, (1954).
8. Ryle M. Vonberg D. Proc. Roy. Soc. 193, 1032 (1948).
9. Payne-Scott R., Little A. Austr. Journ. Sci. Res. **4A**, 489—507 (1951).
10. Payne-Scott R., Little A. Austr. Journ. Sci. Res. **4A**, 508—525 (1952).
11. Payne-Scott R., Little A. Austr. Journ. Sci. Res. **5A**, 32—46 (1952).
12. Ryle M. Proc. Roy. Soc. **211A**, 351—375 (1952).
13. Covington A. Proc. Inst. Radio Eng., **37**, 4 (1949).
14. Covington A. Journ. Roy. Astron. Soc. Canada, **45**, 157—161 (1951).
15. Кайдановский Н. Л., Турусбеков М. Т., Хайкин С. Э. Труды V совещания по вопросам космогонии. Изд. АН СССР, (1956).