

Р.М. МАРТИРОСЯН, В.А. САНАМЯН, А.Г. ГУЛЯН,
Х.А. МАНАСЕЛЯН, Г.А. ПИРУМЯН

О КОМПЬЮТЕРНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА ФАЗОВОГО ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ В РАДИОАСТРОНОМИИ

Предлагается метод обнаружения слабого дискретного радиоисточника на фоне сильного галактического излучения путем компьютерного анализа выходного сигнала радиометра полной мощности. В отличие от принятых в радиоастрономии традиционных методов наблюдений (фазовое переключение, диаграммная модуляция, корреляционный прием) предложенный метод позволяет избежать потерь чувствительности, частичного ухудшения разрешающей способности радиотелескопа и усложнения входных устройств радиометров.

Ключевые слова: радиоинтерферометр, радиоисточник, фаза, модуляция.

Введение. Одной из основных задач прикладной радиоастрономии (и не только ее) является выделение слабого излучения дискретных космических радиоисточников из интенсивного общего фона галактического радиоизлучения. Эта проблема возникает особенно остро в случаях, когда наблюдения ведутся на метровых длинах волн, на которых уровень фонового излучения наиболее высокий, а его распределение по небу крайне неоднородно. Кроме того, разрешающая способность радиотелескопов на этих длинах волн, как правило, бывает ограниченной из-за технических и экономических причин.

Применение обычных радиоинтерферометров и радиотелескопов с антеннами, имеющими хорошую разрешающую способность (по крайней мере, в плоскости прямого восхождения источника), позволяет частично решить вышеуказанную проблему. Однако на выходе радиометров таких систем фоновое излучение обычно сохраняется, поэтому становится трудным включение чувствительных приборов для обнаружения слабого сигнала от дискретного источника. Эта трудность особенно сказывается при проведении обзорных наблюдений.

Для исключения фонового галактического излучения в радиоастрономии нашли широкое применение методы фазового переключения (ФП) Райла [1], диаграммной модуляции, корреляционный метод приема (КП) [2-4]. В первые десятилетия развития радиоастрономии эти методы помогли осуществлять наблюдение многочисленных слабых космических источников с помощью радиотелескопов, имеющих умеренную разрешающую способность. Однако все эти методы требуют значительного усложнения схем радиометров, а их чувствительность соответственно в 2 и $\sqrt{2}$ раза хуже, чем у идеального радиометра полной мощности [4].

В настоящее время, когда радиотелескопы снабжены быстродействующими компьютерами, задачу обнаружения дискретного радиоисточника можно решить

значительно проще – без усложнения схемы радиометра и без потери его чувствительности. Достаточно разработать специальную программу анализа суммарного сигнала от дискретного источника и фона на выходе радиометра полной мощности.

Цифровая обработка сигналов в выходных блоках радиометров стала применяться в начале 80-х годов с целью увеличения их быстродействия [5, 6]. Однако возможности повышения чувствительности радиометра при этом ограничены. Действительно, единственным параметром, связанным с выходной частью радиометра и фигурирующим в формуле чувствительности, является постоянная времени τ выходного интегратора, которая в зависимости от конкретной задачи имеет свое оптимальное значение, так что дальнейшее увеличение τ обычно бывает нежелательным.

Параллельно с компьютеризацией радиометров наметилась также тенденция переноса входного амплитудного или фазового модулятора в сторону выходных частей радиометра – во избежание потерь сигнала во входной части схемы. При низких уровнях внутренних шумов их увеличение из-за этих потерь становится значительным, что неизбежно ухудшает чувствительность приемников [7, 8].

В радиоинтерферометрах со сверхдлинными базами (РСДБ) анализ информации осуществляется после видеоусилителя (без детектирования в радиометре). При этом, разумеется, нужны специальные алгоритмы и программы обнаружения и анализа информации [3, 9, 11].

В настоящей статье предлагается метод компьютерной обработки выходного сигнала, который позволяет, помимо эффективного выделения сигнала дискретного радиоисточника на галактическом фоне, максимально приблизиться к предельной чувствительности радиометра.

Компьютерный метод фазового переключения. Рассмотрим применение метода для приемной системы в виде двухантенного радиоинтерферометра, широко применяемого в радиоастрономии.

Пусть область неба, на которую проектируется дискретный космический радиоисточник S , проходит в процессе суточного вращения Земли через диаграммы антенн радиоинтерферометра с базой (или проекцией физической базы) D , ориентированной по линии восток – запад (рис. 1а). Тогда разность фаз φ сигналов от дискретного источника, поступающих от антенн на вход приемника, будет

$$\varphi = k\Delta l = \frac{\Delta l}{c} \omega = kD \sin \theta,$$

где $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число; c – скорость света; ω – угловая частота принимаемого излучения; Δl – разность хода лучей, поступающих на входы антенн A_1 и A_2 радиоинтерферометра; θ – угловое расстояние источника от плоскости местного меридиана (часовой угол), в котором, как правило, находится максимум диаграммы направленности антенн интерферометра.

В результате изменения пространственного положения источника относительно базы интерферометра фаза φ изменяется в пределах $0 \leq \varphi \leq 2\pi$, и на выходе квадратичного детектора радиометра выделяется интерференционный сигнал (пространственная гармоника) дискретного источника P_s (рис. 1б) на фоне сигнала галактического излучения P_g (запись на рис. 1б получена Саравандским двухантенным радиоинтерферометром ИРФЭ с базой 15λ [10]).

Выходной суммарный сигнал в единицах мощности выражается формулами

$$P(\theta) = P_F(\theta) + P_S(\theta),$$

$$P_S(\theta) = P_{0S}(1 + m \cos \varphi), \quad (1)$$

где коэффициент m характеризует амплитуду пространственной гармоники и зависит от отношения эффективных площадей антенн интерферометра, полосы принимаемых частот и угловых размеров дискретного источника. Для простоты примем $m = 1$.

При $D/\lambda \gg 1$ $\varphi = kD \sin \theta \approx kD\theta$. В единицах времени – $\theta = \frac{2\pi}{T_3} t$, ($\theta'' = 15t^s$), где T_3 – период вращения Земли.

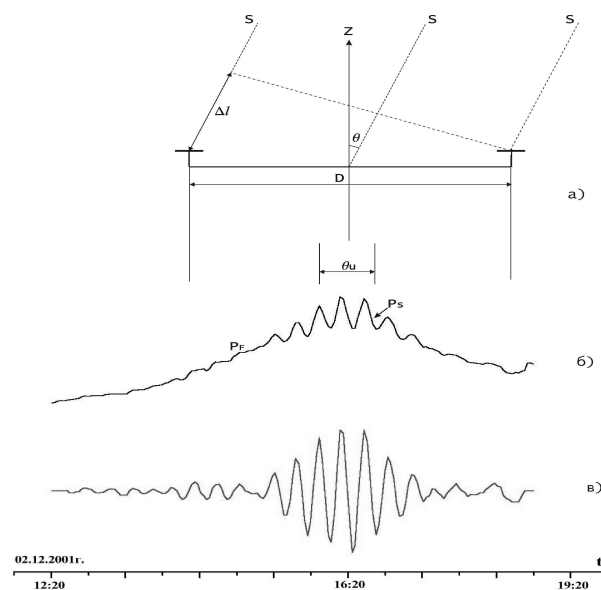


Рис. 1. Радиоинтерферометр (а), пространственная гармоника дискретного источника (б) и интерференционная кривая после компьютерного анализа (в)

Углы (времена), соответствующие экстремальным значениям пространственной гармоника, определяются следующим образом:

$$\theta_{\max} = \frac{\lambda}{D} n, \quad \theta_{\min} = \frac{\lambda}{D} (2n + 1),$$

где n - целое число ($n \leq \frac{D}{\lambda}$).

Поскольку угловая скорость прохождения источника через диаграммы антенн (базы) интерферометра зависит от его часового угла θ и склонения δ , ширина лепестков пространственной гармоника, равная разности двух соседних максимумов или минимумов, будет изменяться (расширяться) при удалении источника от меридиана. Для источника, находящегося в плоскостях меридиана и экватора ($\delta = 0$ и $\theta = 0$), ширина лепестка $\Delta\theta_0 = \frac{\lambda}{D}$ (радиан), в общем случае

$$\Delta\theta(\delta, \theta) = \frac{\lambda}{D \cos \delta \cos \theta} = \frac{\Delta\theta_0}{\cos \delta \cos \theta}. \quad (2)$$

Прежде чем приступить к основной задаче, кратко напомним, в чем состоит сущность ФП. На входе радиометра в одном из плеч интерферометра фаза поступающего от антенны сигнала периодически (с частотой модуляции) и скачкообразно изменяется на 180° , так что на выходе синхронного детектора создается разность сигналов, соответствующих двум положениям модулятора:

$$\Delta P = P(\varphi) - P(\varphi + \pi).$$

Считая, что в пределах ширины одного лепестка пространственной гармоника галактический фон однороден, из (1) имеем

$$\Delta P(\varphi) = 2P_{0S} \cos \varphi. \quad (3)$$

Предположим теперь, что суммарный сигнал (источника и фона) на выходе детектора (без модуляции) записывается в память компьютера в реальном времени в виде цифровой последовательности (или в графической форме, например, с помощью технологии «LabVIEW» фирмы «National Instruments», США). Сместим эту последовательность по времени на полпериода (или полуширину центрального лепестка) пространственной гармоника влево и полпериода вправо и составим две новые последовательности:

$$\begin{aligned} P_1(\theta) &= P(\theta) - P\left(\varphi - \frac{\theta_{\text{и}}}{2}\right), \\ P_2(\theta) &= P(\theta) - P\left(\varphi + \frac{\theta_{\text{и}}}{2}\right). \end{aligned} \quad (4)$$

Двойное смещение делается с целью сохранения симметрии пространственной гармоника относительно центрального лепестка.

Если по-прежнему считать фон Галактики однородным в пределах ширины лепестка, то функция

$$P_{\text{и}}(\theta) = P_1(\theta) + P_2(\theta) = 4P_{0S} \cos \varphi \quad (5)$$

будет отличаться от (3) только постоянным коэффициентом. Результаты анализа представлены на рис. 1в. График и формула (5) убедительно показывают, что компьютерный метод реализации ФП полностью заменяет описанный в [2] метод ФП с перечисленными выше принципиальными преимуществами. Кроме того, в компьютерном варианте ФП упрощается вопрос калибровки принимаемого сигнала с помощью эталонного шумового генератора, улучшается симметрия пространственной гармоник относительно нулевой линии и т. д.

Описанный выше компьютерный метод выделения дискретного источника из галактического фона может успешно применяться и в случае одноантенного радиотелескопа. Ранее для этой цели на входе радиометра использовались ФП или КП системы, включенные между двумя половинами антенны.

В компьютерном варианте достаточно подать сигнал антенны (без какого-либо расчленения и переключения) на вход радиометра полной мощности, ввести суммарный выходной сигнал источника и фона в память компьютера, а затем сместить влево и вправо записанную цифровую информацию на интервал, соответствующий полуширине диаграммы антенны, и провести описанный выше анализ данных. В этом случае, разумеется, фоновое излучение должно быть однородным в пределах ширины диаграммы направленности антенны. Поэтому применение этого метода более эффективно, если антенна радиотелескопа имеет хорошую направленность в плоскости прямых восхождений.

Такие радиотелескопы (например, расположенные вдоль линии восток-запад синфазные решетки) часто используются для обзорных радиоастрономических наблюдений, поэтому предлагаемый метод анализа их данных может оказаться весьма эффективным.

Применение компьютерного метода сдвига фазы наиболее целесообразно у одноантенного телескопа.

Действительно, при применении обычных методов ФП или КП между двумя половинами одноантенного телескопа ухудшается чувствительность радиометра, поскольку сигнал дискретного источника формируется в пределах половины ширины диаграммы направленности. Во-вторых, фоновое излучение должно быть однородным в пределах ширины диаграммы пол-антенны (т.е. в более протяженной области неба), что является более жестким требованием, чем при наблюдениях с помощью полной антенны.

При компьютерном анализе перечисленные недостатки автоматически устраняются, т.к. цифровой анализ сигнала каждого источника осуществляется независимо, с сохранением предельной чувствительности радиотелескопа.

Описанный выше метод ныне успешно применяется при наблюдениях точечных источников на Саравандском полигоне ИРФЭ (Бюракан) на длине волны $\lambda = 4,2$ м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ryle M. Roy. Soc. Proc. A211. 1952. - P. 351.
2. Стейнберг Ж., Леку Ж. Радиоастрономия. - М.: Изд. иностранной литературы, 1963. - 312с.
3. Есепкина Н. А., Корольков Д. В., Парийский Ю. Н. Радиотелескопы и радиометры. - М.: Наука, 1973. - 416с.
4. Краус Дж. Д. Радиоастрономия. - М.: Сов. радио, 1973. - 430с.
5. Айвазян Г. Г., Гулян А. Г. А.с. СССР №1626871, 1988.
6. Айвазян Г. Г., Гулян А. Г., Мусатов В. В. и др. АЦП для обработки сигналов модуляционного радиометра: Тез.докл. XVII Всес.конф. по радиоастрономической аппаратуре. - Ереван, 1985. - С. 6-7.
7. Гулян А. Г., Карапетян В. Р., Нагдалян Э. А. и др. Изв.вузов. Радиофизика, 29. - 1986. - С. 919-922.
8. Гулян А. Г., Саакян Ю. А. и др. Модуляционный радиометр с балансным входом // Радиоастрономическая аппаратура, антенны и методы: Тез.докл. XIV Всес.конф. - Ереван, 1982. - С. 49-50.
9. Bare C., Clark B. G., Kellermann K. J., Cohen M. N., Jancey D. L. Science, 157. - 1967. - С.189.
10. Мартиросян Р. М., Гулян А. Г., Санамян В. А., Манаселян Х. А. Изменение плотности потока радиоисточника Кассиопея-А Астрофизика, 45, №3. - 2002. - С. 443-449.
11. Верхоунов О. В. Интерактивная первичная графическая обработка одномерных векторов данных в оболочке X Window под ОС UNIX на РАТАН-600. Программа fgr – версия 2.1. Препринт CAO РАН №106, Нижний Архыз, 1995. - С.1-57.

Ин-т радиофизики и электроники НАН РА. Материал поступил в редакцию 25.02.2002.

**Ռ.Մ. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ, Վ.Ա. ՍԱՆԱՄՅԱՆ, Ա.Գ. ԴՈՒԼՅԱՆ,
Խ.Հ. ՄԱՆԱՍԵԼՅԱՆ, Հ.Ա. ՓԻՐՈՒՄՅԱՆ
ՓՈԽԼԱՅԻՆ ՓՈԽԱՆՋԱՏՄԱՆ ԵՂԱՆԱԿԻ ՀԱՄԱԿԱՐԳՉԱՑԻՆ
ԻՐԱԳՈՐԾՈՒՄԸ ՌԱԴԻՈԱՍՏՐՈՖԻՏՈՒԹՅԱՆ ԲՆԱԳԱՎԱՌՈՒՄ**

Առաջարկվում է բարձր զալակտիկական ֆոնային ճառագայթման պայմաններում թույլ, կետային ռադիոաղբյուրի ճառագայթման գնահատման եղանակ՝ հիմնված կոմպենսացիոն ռադիոմետրի ելքային ազդանշանի համակարգչային վերլուծության վրա: Ի տարբերություն ռադիոաստղագիտության մեջ ընդունված ավանդական մեթոդների (փուլային փոխանջատում, դիագրամի մոդուլում, կորելյացիոն ընդունում), ռադիոազդանշանի մշակման առաջարկվող եղանակը թույլ է տալիս խուսափել մուտքային ազդանշանի մոդուլումներով պայմանավորված զգայնության կորստից, լուծող ուժի մասնակի փոքրացումից և ռադիոմետրական համակարգի բարդացումներից:

**R.M. MARTIROSYAN, V.A. SANAMYAN, A.G. GHULYAN, KH.H. MANASELYAN, H.A. PIRUMYAN
COMPUTER PROCESSING METHOD OF
PHASE SHIFTING IN RADIOASTRONOMY**

Detection of a weak discrete space radio source emission is considered in the background of intensive Galactic radiation. The method is based on computer processing of total-power radiometer output. Unlike the traditional accepted methods in radio astronomy (phase switching, beam shifting, correlation method), the proposed approach allows to avoid losses of sensitivity, partial worsening of radio telescope resolution and complication of radiometer input devices.