карты, а также характер зависимости разрешающей способности от параметров ИБО сохраняются.

Авторы выражают благодарность В. И. Малютину за помощь в проведении расчетов на ЭВМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дубинский Б. А. — Радиотехника и электроника, 1976, 21, № 4, с. 888.
2. Фалькович С. Е. Оценка параметров сигнала. — М.: Сов. радио, 1970.

Институт радиотехники и электроники
АН СССР

THE ANALYSIS OF A SIDE-LOOKING INTERFEROMETER CHARACTERISTICS

B. A. Doubinskij, S. O. Kuz'min

A method which realizes the particular case of the aperture synthesis with the airborne interferometer is considered. An expressions for the synthesized diagram (inderfinite function), resolution and sensitivity have been obtained and calculated.

УДК 522.62 : 681.31

ПРОГРАММНО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА КРЫМ — ПУЩИНО

Л. Р. Коган, Л. С. Чесалин

Описывается программно-математический комплекс интерферометра Крым — Пущино, позволяющий обрабатывать результаты наблюдений на нем как компактных источников, излучающих в сплошном спектре, так и мазерных источников, излучающих спектральные линии. Предусмотрено шесть режимов обработки информации, позволяющих обеспечить оценку размеров компактных компонент, картографирование мазерных источников, определение максимального времени когерентного накопления, использование опорной детали и т. д. Достигнуто приемлемое время счета. Время обработки одной пары магнитных лент (время регистрации 6 *мин*) на ЕС 1040 при 50 задержках составляет ~ 1 *ч*.

Предложенный советскими учеными в 1965 г. [1] метод сверхдальней интерферометрии является основным методом исследования источников космического радиоизлучения, обеспечивающим недостижимое другими методами угловое разрешение. Интерферометр со сверхдлинной базой (ИСДБ) позволяет измерить амплитуду, фазу и частоту интерференционного сигнала. Программные средства вычисления этих величин по первичным сигналам представляют собой одну из основных частей аппаратурно-математического ИСДБ комплекса. Их состав определяется используемой системой регистрации и обработки данных. Промежуточным носителем данных может выступить магнитная лента для обычных вычислительных машин. Эти системы называют обычно системами Марк I [2]. С целью расширения полосы записи исследуемого сигнала для регистрации данных можно использовать видеомагнитофоны разных типов (Марк II [3]). Для обработки видеозаписи в этом случае необходимо использовать специализированный быстродействующий процессор. В настоящее время в мире создано несколько экземпляров спецпроцессора Марк II и его следующей модификации с записью на специализированный магнитофон с еще большей полосой (Марк III), и другие системы практически не используются.

Однако возможно применение менее широкополсной и более медленной по скорости обработки данных, но зато относительно дешевой системы, базирующейся на использовании стандартной вычислительной машины. Нам кажется, что система Марк I не исчерпала своих возможностей и кроме очевидного преимущества в возможности использования универсальных ЭВМ она позволяет программным образом (т. е. довольно просто) реализовать те или иные параметры обработки. Например, в системе Марк II частотное разрешение обеспечивается аппаратурным образом и поэтому не очень высоко и фиксировано. Кроме того, для источников, излучающих спектральные

линии, широкополосность системы Марк II не является решающим преимуществом перед системой Марк I.

Учитывая приведенные выше соображения, в Институте космических исследований АН СССР была создана система регистрации типа Марк I, основанная на наносителях на магнитной ленте внешней памяти ЭВМ Единой Серии (ЕС) [4, 5]. Система регистрации имеет следующие параметры: полоса регистрации — 250 *кГц*, частота квантования входного сигнала — 500 *кГц*, длина зоны — 16384 *байт* = 0,262144 *с*, длина промежутка между зонами — 0,016384 *с*, время записи одной ленты T — 6 *мин*.

Для выделения интерференционных лепестков сигналы, считанные с первичных магнитных лент, перемножаются побитно с разными задержками и усредняются в течение времени δt, соответствующем 224 *бит* (448 *мкс*). Первичное усреднение без фурье-анализа позволяет существенно сократить общее время счета, так как дальнейшая обработка ведется на меньших массивах, но, с другой стороны, оно ограничивает максимально возможную частоту интерференции:

$$\delta t \; f_{\text{инт max}} \leqslant 1.$$

Частота интерференции легко снижается до необходимой величины с помощью соответствующей расстройки частот гетеродинов на пунктах приема во время наблюдений. Для каждой зоны m проводится фурье-анализ на фиксированной частоте $f_{\text{инт}}(m)$. Легко показать, что даже для такой короткой волны, как $\lambda = 1$ *см*, и предельных для Земли баз можно считать частоту интерференции постоянной в течение зоны $\Delta t \simeq 0{,}25$ *с*. Задержка и частота интерференции неизвестны до эксперимента с необходимой точностью вследствие неточности знания координат телескопов и источника, неточности синхронизации часов, неточности знания номиналов частот гетеродинов и т. д. Выбор длины зоны однозначно определяет диапазон, в который должна попасть частота интерференции от наблюдаемого источника (в нашем случае это 4 *Гц*). С другой стороны, усреднение на фиксированной частоте интерференции в течение времени Δt селектирует для нас только те компоненты источника, частота интерференции которых отличается от $f_{\text{инт}}(m)$ не более чем на $1/2\Delta t$. Таким образом, изменяя $f_{\text{инт}}(m)$ и Δt, мы можем изменять окно обзора данного источника.

Вычисленные коэффициенты корреляции (их число $N = 2\tau_{\max} F_0$ определяется максимальной задержкой $\tau_{\max}$) для каждой зоны записываются на ленту-каталог. Перебор N задержек должен перекрыть интервал неопределенности задержки и в случае исследования источников, излучающих в сплошном спектре, число переборов по задержке N стремятся уменьшить, насколько это возможно. В случае же исследования спектральных источников число N, напротив, увеличивается для улучшения частотного разрешения, равного $\delta f = 2\Delta f/N$.

Первичная программа вычисления коэффициентов корреляции для каждой зоны одинакова для источников, излучающих в сплошном спектре, и для спектральных исследований.

Вторичная программа обработки ленты-каталога имеет шесть режимов.

1. Режим, предназначенный для обработки результатов наблюдений источников, излучающих в сплошном спектре (квазаров, ядер галактики). В этом режиме выполняется фурье-анализ коэффициентов кросс-корреляции по каждой зоне в течение времени $T = M\Delta t$ с шагом по частоте интерференции $1/2T = 1/2M\Delta t$, где M — число усредняемых зон.

Результатом счета являются две таблицы: амплитуд и фаз коэффициентов кросс-корреляции, усредненных по времени T, в зависимости от частоты интерференции и задержки.

2. В другом режиме строятся графики зависимости максимального значения коэффициента кросс-корреляции по всем перебираемым задержкам и частотам интерференции от времени накопления. Этот режим используется для определения максимально возможного времени накопления, определяемого нестабильностью гетеродинов, неточностью знания координат базы, нестабильностью среды распространения радиоволн от источника и т. д.

3. Режим, при котором в каждой зоне выполняется преобразование Фурье от коэффициентов кросс-корреляции; тем самым вычисляется спектр с амплитудой, равной коррелированной составляющей потока излучения на данной частоте.

Затем уже эти спектры усредняются по времени накопления T. Из спектров, соответствующих разным частотам интерференции, выбирается тот, у которого максимальное значение максимально. Для того чтобы избежать искажения в спектре (завала его верхних частот), имеющего место вследствие дискретности вводимой задержки [6], вводится специальный множитель до выполнения фурье-анализа по времени. Для возможности исключения искажений, вносимых в спектре неравномерностью частотных характеристик приемников, на магнитную ленту записывались сигналы в положении антенны на источнике (ON) и вне его (OFF). Спектр в антенных температурах $T_a(f)$, полученный исходя из автокорреляционной функции сигнала, принятого каждой антенной, вычисляется по следующей формуле:

$$T_a(f) = \overline{T}_a + (\overline{T}_a + T_ш)\frac{SON(f) - SOFF(f)}{SOFF(f)}, \quad (1)$$

где $\overline{T}_a$ — средняя антенная температура по всей полосе регистрации, измеряемая в процессе наблюдений, $T_ш$ — шумовая температура радиотелескопа, $SON(f)$ и $SOFF(f)$ — автокорреляционные спектры в положении антенны ON и OFF соответственно.

Функция видности для каждой спектральной детали определяется следующим выражением:

$$\gamma(f) = \frac{\sqrt{(\overline{T}_{a_1} + T_{ш1})(\overline{T}_{a_2} + T_{ш2})}}{\sqrt{T_{a_1}(f)\,T_{a_2}(f)}} \; \frac{S_{12}(f)}{\sqrt{SOFF_1(f)\,SOFF_2(f)}}, \quad (2)$$

где $S_{12}(f)$ — спектр, полученный преобразованием Фурье кросс-корреляционной функции записанных сигналов.

Результатом счета этого режима являются шесть зависимостей от частоты: $T_{a_1}(f)$, $T_{a_2}(f)$, $T_{a\,г}(f) = \sqrt{T_{a_1}(f)\,T_{a_2}(f)}$, $T_{a\,к}(f)$, $\varphi_к(f)$, $\gamma(f)$, где $T_{a.к}(f)$ и $\varphi_к(f)$ — модуль и фаза соответственно кросс-корреляционных спектров.

4. Режим картографирования мазерных источников. В этом режиме строится карта зависимости амплитуды кросс-корреляционного спектра от частоты в спектре источника Ω и от частоты интерференции $f_{инт}$. Измерение значения $f_{инт}$ для разных компонент дает нам информацию о пространственном разносе компонент, излучающих на разных частотах (или, что то же самое, движущихся с разными скоростями по отношению к наблюдателю). Если θ_x, θ_y — угловые расстояния исследуемой компоненты от опорной компоненты, то тогда при условии $\theta_x, \theta_y \ll 1$ разностная частота интерференции может быть представлена в виде

$$\Delta f_{инт} = (\partial u/\partial t)\,\theta_x + (\partial V/\partial t)\,\theta_y, \quad (3)$$

где U, V — проекции вектора базы на ортогональные оси в картинной плоскости;

$$\partial u/\partial t = (B_x \cos H + B_y \sin H)(2\pi/T_З),$$
$$\partial V/\partial t = (B_x \sin H - B_y \cos H)\sin\delta\,(2\pi/T_З), \quad (4)$$

где $T_З$ — период вращения Земли вокруг своей оси, B_x, B_y — проекции вектора базы на оси в плоскости экватора, H — часовой угол источника в Гринвиче, δ — склонение источника. Из (3) видно, что измерения разностной частоты интерференции при фиксированном часовом угле дает нам информацию о том, что исследуемая компонента находится в некоторой точке, лежащей на прямой линии в картинной плоскости. Измерив частоту интерференции при другом часовом угле, можно получить вторую прямую, и пересечение этих двух прямых дает нам координаты исследуемой компоненты относительно опорной. При большем числе измерений, используя метод наименьших квадратов, можно увеличить точность определения координат θ_x, θ_y.

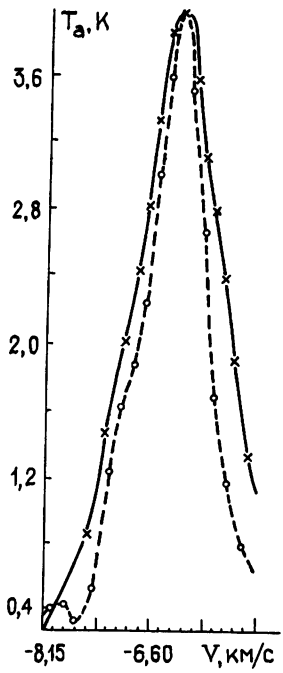

Рис. 1. Пример обработки одного из сканов радиоисточника СЕРН-А; сплошная кривая — среднегеометрическое спектров, полученных в Крыму и Пущино, штриховая — кросс-корреляционный спектр.

Таким образом, получаемую в режиме 4 карту частота интерференции — скорость компоненты можно пересчитать в пространственную карту компонент источника, движущихся с разными скоростями к наблюдателю. Так как разрешение по частоте интерференции обратно пропорционально времени когерентного накопления $\delta f_{инт} = 1/T_{нак}$, то из (3) можно заключить, что угловое разрешение карты, получаемой из измерений $f_{инт}$, примерно во столько раз хуже разрешения интерферометра, во сколько раз период вращения Земли вокруг своей оси больше когерентного времени накопления.

На самом деле при хорошем отношении сигнал/шум разрешение по частоте интерференции может быть улучшено, например, для интерферометра Крым—Пущино [7]. При $T_{нак} = 300$ *с* (такое время накопления реализуется даже на такой короткой длине волны, как $\lambda = 1{,}35$ *см*, за счет применения водородных стандартов частоты)

угловое разрешение интерферометра по измерениям частоты интерференции на длине волны $\lambda = 1{,}35$ *см* составляет

$$\Delta\theta_{инт} \simeq 30\lambda/D \simeq 80 \text{ мс дуги.}$$

5, 6. Режимы **5, 6** эквивалентны режимам **3, 4** соответственно, за исключением того, что перед усреднением спектров по зонам выполняется умножение на комплексную амплитуду опорной детали. Тем самым исключается влияние нестабильности гетеродинов, существенно ослабляется неточность знания базы, и определяемая частота интерференции автоматически является разностной по отношению к опорной детали.

Описанное математическое обеспечение ориентировано на ЭВМ серии ЕС. Нам удалось достичь приемлемого времени счета. Одна пара лент ($T=6$ *мин*) при пятидесяти задержках обрабатывается первичной программой около часа на ЭВМ ЕС 1040. Максимальное частотное разрешение составляет ~ 2 *кГц* (30 *м/с* для мазерных источников, излучающих в линиях паров воды) при памяти машины не более 256 К.

Первичная программа опирается на подпрограмму вычисления коэффициента корреляции, написанную на языке Ассемблера. Остальные программы написаны на Фортране. Использование для фурье-анализа процедур быстрого преобразования Фурье и ряд других приемов позволили довести время счета вторичных программ до 10 минут на ЕС 1040.

Разработанное математическое обеспечение успешно использовалось в нескольких экспериментах, выполненных на интерферометрах Крым — Пущино в 1979—1982 гг.

На рис. 1 приведен пример обработки результатов наблюдения источника СЕРН-А на интерферометре Крым—Пущино в июне 1982 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Матвеенко Л. И., Кардашев Н. С., Шоломицкий Г. Б. — Изв. вузов—Радиофизика, 1965, **8**, с. 651.
2. Bare C., Clark B. G., Kellermann K. I., Cohen M. N., Jauncey D. L. — Science, 1967, **157**, p. 189.
3. Clark B. G.— Proc. IEEE, 1973, **61**, p. 1242.
4. Коган Л. Р., Матвеенко Л. И. Препринт ИКИ АН СССР № 208. — М., 1974.
5. Коган Л. Р., Матвеенко Л. И., Чесалин Л. С. — Автометрия, 1976, **1**, с. 51.
6. Moran J.— Proc. IEEE, 1973, **61**, p. 9.
7. Матвеенко Л. И., Коган Л. Р., Чесалин Л. С., Костенко В. И., Папаценко А. Х., Копелянский Г. Д., Моисеев И. Г., Ефанов В. А., Сороченко Р. Л. — Письма в Астрон. журн., 1980, **6**, с. 662.

Институт космических исследований
АН СССР

SOFTWARE FOR INTERFEROMETER CRIMEA-PUSCHINO

L. R. Kogan, L. S. Chesalin

The software for VLBI Crimea-Puschino is described. This software is possible to use for studying the compact radiosources radiating both continuum and spectral lines. There are six regimes, allowing to fulfill very different research — the measurement of the compact sources dimension, the masers sources mapping, their spectral analysis with high frequency resolution with and without reference feature. A suitable computer time is received at Soviet computer ES 1040—1 hour for reduction one pair of magnetic tapes (T = 6 min) for 50 delay steps.