

УДК 621.317.762

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ИНТЕРФЕРОМЕТРА БОКОВОГО ОБЗОРА

Б. А. Дубинский, С. О. Кузьмин

Рассматривается способ, реализующий частный случай синтеза апертуры при поступательном относительно объекта движении интерферометра с базой фиксированной длины. Получено и рассчитано выражение для синтезируемой диаграммы (функции неопределенности), разрешающей способности и чувствительности.

Радиоастрономический способ разрешения источников интерферометром с базой фиксированной длины может быть применен для исследования радиоконтрастных образований на поверхности Земли и планет. Для этого корреляционный интерферометр должен быть установлен на борту летательного аппарата (самолета, спутника или другого движущегося носителя) так, чтобы его база приблизительно совпадала с вектором апертурной скорости. Этот способ, который можно рассматривать как вариант апертурного синтеза, т. е. метод разрешения внутри главной диаграммы направленности интерферометра, был впервые предложен в [1], а реализующий его инструмент назван интерферометром бокового обзора (ИБО).

Диаграмма направленности такого интерферометра скользит своим многолепестковым пятном по поверхности (рис. 1). При этом отклик точечного источника имеет квазигармоническую структуру с частотой осцилляции, обратно пропорциональной дальности до источника, и с коэффициентом пропорциональности, равным путевой скорости.

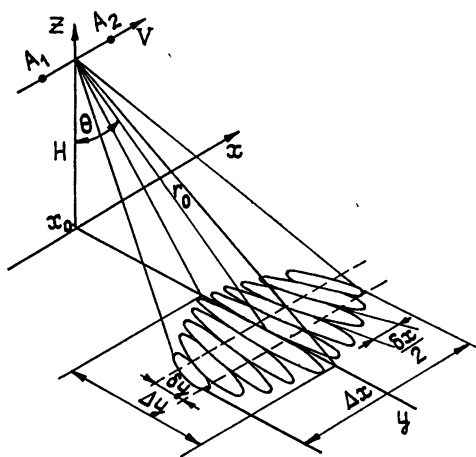


Рис. 1.

Рис. 1. Основные геометрические соотношения для интерферометра бокового обзора.

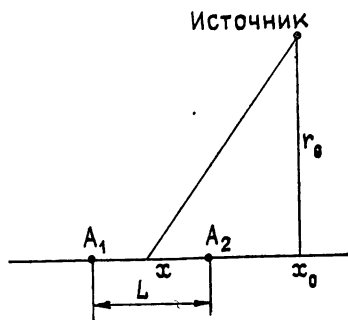


Рис. 2.

Рис. 2. Цилиндрические координаты точечного источника.

Таким образом, анализ спектра (в общем случае — согласованная фильтрация) отклика позволяет осуществить внутридиаграммное разрешение по дальности и картирование исследуемой поверхности.

В [1] были определены соотношения, позволяющие оценить основные параметры ИБО для апертурных антенн при направлении их электрических осей перпендикулярно путевой скорости:

относительную ошибку измерения дальности —

$$\Delta r_0/r_0 = l/L, \quad (1)$$

где r_0 — дальность до источника, l — апертура антенны по координате x , L — длина базы;

относительную ошибку линейной координаты, направленной вдоль вектора путевой скорости —

$$\Delta x_0/r_0 = \lambda/l, \quad (2)$$

где λ — длина рабочей волны интерферометра;
разрешение по углу места —

$$\Delta \theta = (\Delta r_0/r_0) \operatorname{ctg} \theta \quad (3)$$

и наибольший размер разрешаемой радиоконтрастной детали —

$$\delta x = r_0 \lambda L^{-1}. \quad (4)$$

В общем виде потенциальные возможности разрешения источников с помощью ИБО могут быть представлены в форме изображения точечного источника, которое получается при согласованной фильтрации отклика. В терминах теории сигналов это изображение можно назвать функцией неопределенности отклика по координатам источника, в терминах теории антенн — синтезируемой диаграммой направленности. Аналитическое выражение последней получается подстановкой функции отклика интерферометра $u(t)$ в известное выражение функции неопределенности как отношение [2]

$$\chi(\Delta r, \Delta x) = \frac{\int u(t/x_0, r_0) u^*[t/(x_0 + \Delta x), (r_0 + \Delta r)] dt}{\left\{ \int u^2(t/x_0, r_0) dt \right\}^{1/2} \left\{ \int u^2[t/(x_0 + \Delta x), (r_0 + \Delta r)] dt \right\}^{1/2}}. \quad (5)$$

Здесь (x_0, r_0) — координаты точечного источника в цилиндрической (неподвижной относительно источника) системе координат (x, r) , ось x которой проходит вдоль линии полета интерферометра (рис. 2), а $(\Delta x, \Delta r)$ — приращения соответствующих координат источника.

Нетрудно убедиться, что если интерферометр имеет два квадратурных выхода, то

$$u(t/x_0, r_0) = A_{\text{г.л.}}[(x - x_0), r_0] \exp \left\{ -j 2\pi \frac{L}{\lambda} \sin \left[\operatorname{arctg} \frac{x - x_0}{r_0} \right] \right\}, \quad (6)$$

где x — координата фазового центра ИБО, $A_{\text{г.л.}}(x, r)$ — главная диаграмма направленности интерферометра, т. е. $A_{\text{г.л.}} = 2\sqrt{A_1 A_2}$, где A_1 и A_2 — диаграммы направленности антенн интерферометра по мощности в цилиндрических координатах (x, r) . Здесь также учитывается, что $x = x(t)$. Так, полагая $x = Vt$, где V — постоянная скорость носителя, вводя обобщенные цилиндрические координаты источника (ξ, ρ) , $\xi = (x - x_0)/r_0$, $\rho = \Delta r/r_0$, и сдвиг $\sigma = \Delta x/r_0$, получим выражение для синтезируемой диаграммы направленности:

$$P(\sigma, \rho/r_0) = \int_{-\infty}^{+\infty} A_{\text{г.л.}}(\xi) A_{\text{г.л.}}\left(\frac{\xi + \sigma}{1 + \rho}\right) \exp \left\{ -j \frac{2\pi L}{\lambda} \left[\sin(\operatorname{arctg} \xi) - \sin \left(\operatorname{arctg} \frac{\xi + \sigma}{1 + \rho} \right) \right] \right\} d\xi \left[\int A_{\text{г.л.}}^2(\xi) d\xi \int A_{\text{г.л.}}^2\left(\frac{\xi + \sigma}{1 + \rho}\right) d\xi \right]^{-1/2}, \quad (7)$$

где $A_{\text{г.л.}}(\xi)$ — результат подстановки обобщенных координат в выражение $A_{\text{г.л.}}(x, r_0)$. На рис. 3 представлены результаты расчета диаграммы по формуле (7) для случая идеализированной главной диаграммы интерферометра, т. е.

$$A_{\text{г.л.}}(x, r_0) = \begin{cases} 1 & \text{при } |x| \leq a \\ 0 & \text{при } |x| > a \end{cases}, \quad (8)$$

где $a \approx (\lambda/2l)r_0$. Приведенные на рисунке графики иллюстрируют, в частности, что равноточность по координатам x и r наступает при $l/L = \lambda/l$.

Используя простые геометрические соотношения и задаваясь минимальной r_{min} и максимальной r_{max} наблюдаемой наклонной дальностью, получим выражение для числа внутрдиаграммных элементов разрешения:

$$n - 1 \approx \ln(r_{\text{max}}/r_{\text{min}}) \ln^{-1}(1 + l/L). \quad (9)$$

Отметим, что n не зависит от высоты полета H .

Разрешение по дальности, которое можно реализовать с помощью ИБО, существенно зависит от чувствительности. Чем лучше разрешение, тем меньше отношение сигнал/шум в одном элементе радиокарты.

Рассмотрим источник, имеющий усредненный радиоконтраст ΔT с размерами, оптимальными для получения наибольшего отношения сигнал/шум на выходе интерферометра. Такой источник имеет вид полосы шириной примерно в половину лепестка диаграммы направленности и длиной, равной разрешаемому элементу поверхности в перпендикулярном направлении. Его угловой размер равен

$$\Omega_{\pi} \approx \Delta\theta \lambda / 2L = \lambda l \operatorname{ctg} \theta / 2L^2. \quad (10)$$

Можно показать, что отношение сигнал/шум на выходе обработки в одном элементе радиокарты при этом будет равно

$$N = \Delta T \eta \Omega_{\pi} \sqrt{t} / 4\delta T \Omega_a, \quad (11)$$

где $\Omega_a = \lambda^2 A^{-1}$, A — максимальная эффективная площадь апертуры одиночной антенны, η — коэффициент использования апертуры, δT — чувствительность радиометра при времени интегрирования 1 с, t — время наблюдения (интегрирования). В (11) учтены потери за счет приема только одной составляющей поляризации и одной квадратурной компоненты отклика интерферометра, а также уменьшение чувствительности ИБО от добавления шумов антенны к шумам приемника (принято удвоение мощности шумов приемника).

Если учесть, что $A \approx l^2 \kappa$, где $\kappa = b/l$, $t = \Delta x_0 / V$, то, подставляя (1), (2), (3) в (10), получим выражение для определения максимально возможного разрешения по дальности в зависимости от остальных параметров ИБО, также влияющих на отношение сигнал/шум:

$$\left(\frac{\Delta r}{r}\right)_{\min} = \left(\frac{64 N^2 m \delta T^2 V \sin^2 \theta}{\lambda^2 \Delta T^2 \eta^2 H \cos \theta}\right)^{1/3}, \quad (12)$$

где $m = \Delta x_0 / \Delta r$.

Инвариантность реализуемой разрешающей способности к длине волны ИБО позволяет варьировать последней для согласования параметров интерферометра с наблюдаемыми источниками.

В качестве примера рассмотрим модель ИБО ($\lambda = 0,02$ м, $l = 0,2$ м, $L = 4$ м, $\delta T = 0,15$ К·с^{-1/2}), установленного под углом 60° на борту самолета, летящего со скоростью $V = 100$ м/с, с задачей обнаружения радиоконтрастного объекта. В этом случае $\Delta r_0 / r_0 = 0,05$, $\Delta x_0 / r_0 = 0,1$, оптимальные (по чувствительности) размеры разрешаемого объекта по оси « x » $\delta x = 0,005$ м, по оси « y » — $\delta y = 0,1$ м, а отношение сигнал/шум

$$N \approx 0,005 \Delta T H^{1/2}.$$

Если наблюдаемый объект имеет размеры меньше ($\delta x \delta y$), то в этом случае уменьшится пропорционально отношению площадей $S_{\text{объекта}} / \delta x \delta y$. Например, при наблюдении радиоконтраста $\Delta T = 200^\circ$ (вода на фоне суши) размером $2,5$ м \times 25 м с высоты 500 м отношение сигнал/шум будет равно 5 , а точность локализации объекта составит по оси « x » — 100 м, по оси « y » — 50 м.

Реально режим движения носителя может и не быть равномерным и прямолинейным. В этом случае метод ИБО сохраняет свою работоспособность за счет учета отклонений от принятого движения в процессе обработки отклика интерферометра. Отклонения в определении реальной скорости и высоты движения приводят к соответствующему сдвигу участка обозреваемой поверхности по оси « y », изменению масштаба и деформации получаемой карты. При этом связанность и однозначность

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 (indefinite 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 — Пушино, 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 широкополосной 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 аппаратным образом и поэтому не очень высоко и фиксировано, Кроме того, для источников, излучающих спектральные