

В случае гетеродинирования после корреляции $k_4=1$.

д) Коэффициент k_5 зависит от фазовой стабильности независимых гетеродинов РСДБ, т. е., в основном, от стабильности опорных стандартов частоты. На рис. 7 даны графики зависимости коэффициента k_5 от времени осреднения для трех типов стандартов — рубидиевого, водородного и со сверхпроводящим резонатором для длины волны $\lambda=5$ км. Поскольку k_5 зависит от T_k и Q_{PH} растет, как $\sqrt{T_k}$, то существует оптимальное время осреднения T_k при использовании того или иного стандарта. Так, например, для $\lambda=5$ см $T_{k,опт}^{Rb}=60$ с, $T_{k,опт}^H=5 \cdot 10^3$ с, $T_{k,опт}^{спр}=10^4$ с.

е) Коэффициент k_6 связан с флуктуациями фазы в тропосфере. На рис. 6 представлена зависимость k_6 от времени осреднения. Из этого рисунка видно, что флуктуации фазы в тропосфере не позволяют проводить непрерывное накопление сигнала в течение интервала времени, допускаемого стабильностью водородного и со сверхпроводящим резонатором стандартов (речь идет о сантиметровых волнах, где влиянием ионосферы можно пренебречь). Периодическое использование опорного объекта для фазовой калибровки может увеличить время когерентного накопления до величины $T_k=10^4 \div 10^5$ с.

ЛИТЕРАТУРА

1. Clark B. G. — Proc. IEEE, 1973, 61, № 9, p. 1242.
2. Whitney A. R. et. al. — Radio Sci., 1976, 11, № 5, p. 421.
3. Moran J. M. — In «Methods of Experimental Physics». — N. Y.: Acad. Press, 1976, 12, pt. C, p. 228.
4. Clark B. G. — IEEE Trans. Ant. Prop., 1968, AP-16, № 1, p. 143.
5. Brown Hanbury R., Twiss R. Q. — Phil. Mag., 1954, 45, № 7, p. 663.
6. Гуткин Л. С. Теория оптимальных методов радиоприема при флуктуационных помехах. — М.: Сов. радио, 1972.

Ленинградский филиал Специальной
астрофизической обсерватории
АН СССР

THE PRIMAL DATA PROCESSING IN THE VLBI

P. A. Friedman

The description of the primal data processing algorithm in the VLBI is given. All important parts of this algorithm are described: from reading the clipped noise signals from the magnetic tapes up to forming the interferometric response. The signal-to-noise ratio at the VLBI output is discussed.

УДК 520.274.3

ОБ ИНВАРИАНТНОСТИ СРЕДНЕГО КВАДРАТА ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДИ СИНТЕЗИРОВАННЫХ АПЕРТУР

Б. А. Дубинский

Установлена инвариантность среднего квадрата эффективной площади апертур, синтезированных по функциям когерентности. Показано, что синтезированным апертурам адекватны среднеквадратичные энергетические параметры.

1. **Постановка задачи.** Апертуры, синтезированные по функциям когерентности поля [1-5], относятся к антеннам с корреляционной обработкой поля. Теория таких антенн не завершена. В частности, не определена функциональная зависимость между максимальным значением эффективной площади синтезированной апертуры и ее диаграммой направленности по мощности (ДН). Имеются трудности с определением их энергетических (интегральных) параметров [6]. Эти вопросы связаны с отклонением корреляционных синтезированных апертур (СА) от закона сохранения среднего значения эффективной площади аддитивных антенн:

$$(1/4\pi) \int_{4\pi} \tilde{A}(l, m) d\Omega = (1/4\pi) \eta \lambda^2. \quad (1)$$

Здесь и ниже $\tilde{A}(l, m)$ — эффективная площадь апертуры, l, m — направляющие косинусы вектора единичной длины, определяющего текущее направление, относительно

осей декартовой системы координат, лежащих в плоскости апертуры антенны, λ — длина волны, η — коэффициент полезного действия антенны, $d\Omega = (1-l^2-m^2)^{-1/2} dl dm$ — дифференциал телесного угла.

Инвариантность среднего значения эффективной площади обусловлена тем, что ДН является квадратом модуля диаграммы направленности по полю. В случае СА такое представление ДН не всегда возможно, так как синтез производится непосредственно по энергетическому параметру излучения — функции когерентности. При этом среднее значение эффективной площади определяется одним из произвольно выбираемых элементов синтеза (нулевой компонентой взаимных расстояний) и поэтому может иметь произвольную величину, в частности, нулевую, приводящую к значению когерентности ДН СА.

Данная статья посвящена вопросу установления для СА «закона сохранения» типа (1) и некоторым методологическим следствиям из него.

2. Предварительные замечания. Ограничим рассмотрение основным случаем, когда синтезируется дискретная решетка из интерферометров с различными базами и с комплексно-перемножающимися (корреляционными) приемниками. Обгибающие ДН интерферометров (главные ДН) — одинаковы и равны —

$$\tilde{A}_e(l, m) = A_{em} \tilde{P}_e(l, m), \quad A_{em} = 2(A_{1m} A_{2m})^{1/2}, \quad (2)$$

где A_{em} — максимум эффективной площади интерферометра, A_{1m} , A_{2m} — максимумы эффективной площади антенн интерферометров, $\tilde{P}_e(l, m)$ — нормированная главная ДН. Воспользуемся концепцией взвешенного или видимого источника [1, 3], при которой наблюдаемое распределение яркости взвешивается функцией

$$\tilde{P}_e(l, m) (1-l^2-m^2)^{1/2}. \quad (3)$$

Нетрудно убедиться, что переход к взвешенному источнику эквивалентен положению изотропности главной ДН и переводу области определения ДН СА в плоскость (l, m) . Это приводит к инвариантности ДН СА относительно сдвига в плоскости (l, m) (пространственная инвариантность).

Предположим, что векторы без интерферометров компланарны, а их составляющие, параллельные декартовым осям в плоскости апертуры, кратны некоторым отрезкам Δu и Δv соответственно (как наибольшим общим делителям). Это приводит к квазипериодичности ДН СА в плоскости (l, m) .

Поле зрения СА — \tilde{L} (область в плоскости (l, m) , занимаемая одним периодом ДН) имеет размеры $\Delta l = \lambda \Delta u^{-1}$ и $\Delta m = \lambda \Delta v^{-1}$, его площадь обозначим L . Заметим, что при $\Delta u, \Delta v < \lambda/2$ поле зрения выходит за пределы круга видимости: $l^2 + m^2 = 1$, что является признаком реактивности СА. Последнее понятие, аналогичное реактивности аддитивных антенн [7], пока не используется. Однако реактивные СА могут быть реализованы при последовательном апертурном синтезе.

3. «Закон сохранения» для синтезированных апертур. Выше (п. 1) были отмечены причины несоответствия СА «закону сохранения» (1). С другой стороны, имеется основание полагать, что характеристики направленности СА, так же как и аддитивных антенн, должны иметь инвариант типа (1), поскольку в обоих случаях они определяются одинаковым алгоритмом обработки (преобразованием Фурье) синтезируемых элементов, т. е. измерений, производимых в отдельных «точках» апертуры. Вместе с тем, имеется различие в физической размерности этих элементов, о чем говорилось в п. 1: у аддитивных антенн — измерения поля, у корреляционных — потока коррелированной мощности. Последнее приводит к заключению, что общими свойствами должны обладать диаграммы направленности по полю у аддитивных антенн и по мощности — у корреляционных антенн. На этом основании аналогом «закона сохранения» для СА должно служить выражение (1), в котором ДН аддитивной апертуры, равная квадрату модуля диаграммы направленности по полю, заменяется квадратом ДН СА. С учетом условий квазипериодичности и пространственной инвариантности этот аналог приобретает вид

$$\frac{1}{L} \int_{\tilde{L}} |\tilde{A}(l, m)|^2 dl dm = \Lambda^2, \quad (4)$$

в котором Λ^2 должна быть постоянной положительной величиной, инвариантной ДН СА.

Справедливость (4) доказывается подстановкой в него выражения эффективной площади для ДН СА в общем виде. Последнее представим произведением

$$\tilde{A}(l, m) = A_m \tilde{P}(l, m), \quad (5)$$

где

$$A_m = \eta_t A_{em} \sum_{k=1}^N g_k / \left(\sum_{k=1}^N g_k^2 \right)^{1/2} \quad (6)$$

— максимальное значение эффективной площади СА [1, 2],

$$\tilde{P}(l, m) = \sum_{k=1}^N g_k \exp \left[-j \frac{2\pi}{\lambda} (u_k l + v_k m) \right] / \sum_{k=1}^N g_k \quad (7)$$

— нормированная ДН СА с учетом условия пространственной инвариантности [1], (u_k, v_k) — декартовы координаты вектора базы k -го интерферометра, g_k — вес отклика k -го интерферометра, с которым он участвует в формировании ДН (изображения), N — число различающихся вектором базы интерферометров, реализуемых одновременно (параллельно) или последовательно, η_t — КПД линий передачи системы.

Нетрудно убедиться после подстановки (5) в (4) и интегрирования, что величина Λ действительно не зависит от значений величин N, g_k, u_k, v_k ($k = 1, 2, \dots, N$) и определяется только эффективной площадью отдельного интерферометра системы

$$\Lambda = \eta_t A_{em}. \quad (8)$$

Таким образом, аналогом (1) для СА является равенство (4), которое устанавливает инвариантность среднеквадратичной эффективной площади СА в классе апертур, синтезируемых с помощью интерферометров с идентичными главными ДН.

Из (4) следует определение максимума эффективной площади СА через ее нормированную ДН:

$$A_m^2 = \Lambda^2 \left(\frac{1}{L} \int_L |\tilde{P}(l, m)|^2 dl dm \right)^{-1}. \quad (9)$$

4. Среднеквадратичные энергетические параметры синтезированной апертуры. Среднеквадратичный характер инварианта эффективной площади, вытекающий из установленного выше «закона сохранения», влечет за собой «среднеквадратичность» других энергетических параметров СА. Прежде всего, это относится к телесному углу ДН — Ω_{CA} , среднеквадратичное значение которого следует из (9):

$$\Omega_{CA}^2 = \frac{1}{L} \int_L |\tilde{P}(l, m)|^2 dl dm. \quad (10)$$

Этот параметр имеет тот же физический смысл (объем, занимаемый квадратом ДН), что и традиционный телесный угол — Ω_A [8]:

$$\Omega_A = \int_{4\pi} \tilde{P}(l, m) d\Omega.$$

Однако последний функционал не может характеризовать объема лепестков при знакопеременной ДН СА в связи с его линейностью. Практическое значение параметра Ω_{CA} обусловлено равенством (9), записанным в виде

$$A_m \Omega_{CA} = \Lambda. \quad (11)$$

Выражение (11) позволяет характеризовать эффективную площадь в зависимости от разрешающей способности СА. Благодаря этому параметр Ω_{CA} может служить критерием при оптимизации весовой обработки. Например, можно поставить задачу перераспределения объема боковых лепестков ДН СА [9, 10] при условии ограничения сверху общего объема лепестков, что в связи с (11) соответствует ограничению эффективной площади снизу.

Аналогично видоизменяются определения других параметров решетки, например, коэффициентов концентрации (эффективности луча) η_B и рассеяния β , отнесенных к заданному участку поля зрения D . Их среднеквадратичный вариант для СА имеет вид

$$\eta_{CA}^2 = \int_D |\tilde{P}(l, m)|^2 dl dm / \int_L |\tilde{P}(l, m)|^2 dl dm; \quad (12)$$

$$\beta_{CA}^2 = 1 - \eta_{CA}^2. \quad (13)$$

Практическое применение этих параметров определяется их физическим содержанием. Они оценивают долю полного объема квадрата синтезируемой ДН (в поле зрения), приходящуюся на участок D и рассеиваемую за его пределами соответственно. Использование для этих целей традиционных определений одноименных параметров в случае СА встречает те же трудности, о которых говорилось выше.

При рассмотрении реактивных СА (см. п. 2), очевидно, потребуется ввести также и среднеквадратичный коэффициент реактивности γ_{CA} по аналогии с традиционным γ [7]:

$$\gamma_{CA}^2 = \frac{\int_{\tilde{L}} |\tilde{P}(l, m)|^2 dldm}{\int_{\text{по кругу}} |\tilde{P}(l, m)|^2 dldm} \quad (14)$$

по кругу
видимости

Благодаря математической аналогии в определениях среднеквадратичных квадратов и одноименных с ними средних (традиционных) параметров можно распространить методы теории аддитивных антенн [7, 11] на решение аналогичных задач корреляционных антенн. При этом, однако, роль диаграммы направленности по полю у аддитивных антенн играет синтезированная диаграмма направленности по мощности — корреляционных. В задачах с протяженными источниками указанная аналогия параметров нарушается из-за мультипликативности СА.

В статье получено соотношение, связывающее максимум эффективной площади синтезированной апертуры с ее диаграммой направленности по мощности, которое одновременно устанавливает постоянство среднеквадратичной эффективной площади по полю зрения. Определена величина этой постоянной. Показано, что адекватными энергетическими (интегральными) параметрами являются среднеквадратичные.

Установление постоянной и введение среднеквадратичных параметров позволяет распространить методы теории аддитивных антенн на задачи анализа и синтеза ДН корреляционных антенн.

Автор благодарен организаторам Всесоюзной школы по апертурному синтезу в г. Горьком, участие в которой стимулировало работу над статьей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Христиансен У., Хёгбом И. Радиотелескопы. — М.: Мир, 1972.
2. Фомалонт Э. Б., Райт М. К. Х. — В сб.: Галактическая и внегалактическая радиоастрономия. / Под ред. Г. Л. Верскера и К. И. Келлермана. — М.: Мир, 1976, с. 400.
3. Фомалонт Э. Б. — В сб.: Построение изображений в астрономии по функциям когерентности. — М.: Мир, 1982, с. 9.
4. Цейтлин Н. М. Антенная техника и радиоастрономия. — М.: Сов. радио, 1976.
5. Есепкина Н. А., Корольков Д. В., Парийский Ю. Н. Радиотелескопы и радиометры. — М.: Наука, 1973.
6. Дубинский Б. А. Тезисы докладов XIV Всесоюзной радиоастрономической конференции. — Ереван: АН АрмССР, 1982, с. 242.
7. Минкович Б. М., Яковлев В. П. Теория синтеза антенн. — М.: Сов. радио, 1969.
8. Краус Д. Д. Радиоастрономия. — М.: Сов. радио, 1973.
9. Дубинский Б. А. Тезисы докладов XIV Всесоюзной астрономической конференции. — Ереван: АН АрмССР, 1982, с. 369.
10. Дубинский Б. А. Письма в Астрон. журн., 1979, 5, № 10, с. 557.
11. Бахрах Л. Д., Кременецкий С. Д. Синтез излучающих систем. — М.: Сов. радио, 1974.

Институт радиотехники и электроники
АН СССР

ABOUT INVARIANCE OF MEAN-SQUARE EFFECTIVE AREA OF APERTURE SYNTHESIS ANTENNA

B. A. Doubinskij

Invariance of mean-square effective area of aperture synthesis antenna is determined. Adequacy of mean-square power pattern parameters to aperture synthesis antenna is shown.