

УДК 621.317.743.7

ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ И ФАЗОВЫХ ДИАГРАММ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕНН И АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОРРЕЛЯЦИОННЫМ МЕТОДОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВНЕЗЕМНЫХ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ

Н. В. Векслер, А. В. Калинин, В. С. Коротков, В. И. Турчин

Рассматриваются вопросы измерения амплитудных, фазовых и поляризационных диаграмм направленности антенн корреляционным методом по внеземным источникам радиоизлучения. Получено выражение для корреляционной матрицы с учетом поляризационных свойств антенны и излучения радиоисточника. Приводится точное соотношение для цифровой фильтрации результатов измерения диаграммы направленности антенны. С использованием различных способов изображения информации приведены экспериментальные данные измерений диаграммы направленности антенны и восстановления амплитудно-фазового распределения поля в раскрыве антенны.

При измерении параметров антенн с высоким коэффициентом усиления весьма эффективен корреляционный метод определения характеристик антенн по внеземным источникам радиоизлучения [1-6]. В отличие от традиционного способа измерения диаграмм направленности (ДН) антенн по дискретным источникам радиоизлучения с использованием радиометрических приемников, в корреляционном методе используется корреляционная обработка сигналов исследуемой и вспомогательной антенн, что увеличивает чувствительность системы при измерении низких уровней ДН антенны и позволяет измерять фазовую и поляризационную ДН. В работах [1-6] рассматриваются вопросы выбора источников радиоизлучения, обработки экспериментальных результатов, приводятся состав аппаратуры и экспериментальные данные измерения амплитудных ДН с помощью корреляционного метода. В предлагаемой работе исследуются вопросы цифровой фильтрации результатов измерений ДН корреляционным методом и способ измерения поляризационных характеристик антенн по хаотически поляризованному излучению дискретных радиоисточников; приведены экспериментальные данные исследования фазовых и кросс-поляризационных ДН, измерение которых, как указано в [2,5], представляет определенные трудности. Совокупность измеренных амплитудных и фазовых ДН (комплексная ДН) использовалась для восстановления амплитудно-фазового распределения (АФР) поля в раскрыве антенны.

1. Основные теоретические соотношения. Для определения поляризационных ДН необходимо знать связь между сигналом на выходе корреляционного приемника, поляризационными характеристиками антенн и поляризацией излучения радиоисточника, в общем случае отличающейся от хаотической. Для этого представим связь между x -, y -компонентами плоских волн, падающих на антенны 1, 2 ($E_x^{(0)}, E_y^{(0)}$), и x -, y -компонентами поля в фокальной плоскости антенны (E_x, E_y) в виде [7]

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_x & f_y \\ f_{yx} & f_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x^{(0)} \\ E_y^{(0)} \end{pmatrix} \quad (1)$$

и найдем корреляционную матрицу $\hat{K} = \|K_{ij}\|$, где $K_{ij} = \overline{E_{ii}(\mathbf{r}_1, t) E_{2j}(\mathbf{r}_2, t)}$ — корреляционные функции i -й и j -й составляющих поля в точках \mathbf{r}_1 и \mathbf{r}_2 фокальных плоскостей первой и второй антенн в момент времени t . Считая источник радиоизлучения «точечным», а его временной спектр равномерным в пределах П-образной частотной характеристики приемника, получаем корреляционную матрицу в виде

$$\begin{aligned} \hat{K} = & \sqrt{G_1 G_2} \begin{pmatrix} f_x & f_{yx} \\ f_{xy} & f_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} J_{xx} & J_{xy} \\ J_{yx} & J_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} g_x^* & g_{yx}^* \\ g_{xy} & g_y^* \end{pmatrix} \times \\ & \times 2B_i \frac{\sin B_i \tau}{B_i \tau} \exp \left\{ j \left[\omega_0 \tau - 2\pi \left(\frac{n\rho}{\lambda} \right) \right] \right\}, \end{aligned} \quad (2)$$

где G_1, G_2 — коэффициенты усиления измеряемой и вспомогательной антенн, ω_0 — частота принимаемого сигнала, τ — временная задержка в приемных трактах антенн, ρ — вектор, направленный из точки \mathbf{r}_1 к \mathbf{r}_2 ,

$J_{xx}, J_{xy}, J_{yx}, J_{yy}$ — элементы матрицы когерентности \hat{J} , определенной в работе [8]*, $g_x, g_{xy}, g_{yx}, g_y, f_x, f_y, f_{yx}, f_{xy}$ — комплексные диаграммы направленности на основной и ортогональной поляризациях соответственно опорной и испытываемой антенн, $2B_i$ — полоса пропускания приемника.

Как показано в работе [8], любую матрицу когерентности можно представить в виде суммы матриц когерентности, соответствующих хаотически поляризованной и полностью поляризованной волнам.

Выражение (2) для корреляционной матрицы удобно для анализа влияния на выход мультипликативного интерферометра, состоящего из исследуемой и вспомогательной антенн, а также свойств излучения источника и параметров указанных антенн, поскольку матрицы, определяющие параметры антенн, и матрица когерентности, определяющая параметры излучения радиоисточника, входят в выражения в виде произведения. В частности, при наличии в излучении радиоисточника линейно-поляризованной составляющей матрицу когерентности можно представить в виде

$$\hat{J} = \begin{pmatrix} J & 0 \\ 0 & J \end{pmatrix} + P_\Sigma \begin{pmatrix} \cos^2 \chi & \cos \chi \sin \chi \\ \cos \chi \sin \chi & \sin^2 \chi \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где P_Σ — степень поляризации интегрального радиоизлучения источника, J соответствует величине хаотически поляризованной составляющей радиоизлучения источника, χ — угол между плоскостями поляризации источника и антенны.

Для горизонтальной системы координат χ находится из соотношения

$$\chi = \chi_0 - \operatorname{arctg} \left(\frac{\cos \varphi \sin t}{\sin \varphi \cos \delta - \sin \delta \cos \varphi \cos t} \right), \quad (5)$$

где χ_0 — позиционный угол плоскости поляризации излучения источника, φ — широта места наблюдения, δ, t — склонение и часовой угол источника соответственно.

* Элементы матрицы когерентности связаны с параметрами Стокса следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} I &= J_{xx} + J_{yy}, & U &= J_{xy} + J_{yx}, \\ Q &= J_{xx} - J_{yy}, & V &= i(J_{yx} - J_{xy}). \end{aligned} \quad (3)$$

При известных поляризационных характеристиках опорной антенны приведенное выше выражение для \hat{J} может быть использовано для коррекции измеренных данных либо для оценки «допустимой» поляризации излучения радиисточника* (данные о поляризационных характеристиках радиисточников см. в [10,11]).

В работе [2] предложено использовать сглаживание результатов измерения ДН антенн с целью повышения отношения сигнал/шум и приведения данных обработанной ДН к равномерной сетке углов. Однако вид сглаживающей функции взят произвольно и представляется функцией, описывающей коническую поверхность. Выражение для сглаживающей функции можно получить, используя информацию о размерах области, внутри которой располагаются сторонние токи, формирующие ДН антенны. В качестве указанной области можно выбрать, например, объем, ограниченный цилиндром, диаметром $2D$ и высотой $2z_0$ (рис. 1).

Записывая выражение для ДН по распределению излучающих токов, нетрудно получить соотношение для сглаженной ДН в следующем виде:

$$f(x) = \left[\frac{\sin(k\zeta z_0)}{k\zeta z_0} \frac{J_1(kD \sin \theta)}{kD \sin \theta} \right] f''(x), \quad (6)$$

$J_1(kD \sin \theta)$ — функция Бесселя первого рода первого порядка, $x = \xi e_x + \eta e_y + \zeta e_z$, $\xi = \sin \theta \cos \varphi$, $\eta = \sin \theta \sin \varphi$, $\zeta = \cos \theta$, $f''(x)$ — измеренная ДН антенны.

2. Краткое описание измерительной установки. В качестве исследуемой антенны использовалась одна из антенн, входящих в двухэлементный мультипликативный интерферометр, состоящий из 7-метровых однозеркальных параболических антенн, работающих на частоте 540 МГц [9]. Вторая антенна интерферометра служила в качестве вспомогательной. Проекция базы интерферометра ориентирована вдоль линии восток—запад и составляет 417 метров; чувствительность приемника—1,6 К при постоянной времени 0,4 с. Облучателями у антенн были два скрещенных коммутируемых полуволновых диполя, расположенных в ортогональных плоскостях в фокусе зеркала. Обработка выходных сигналов коррелятора и управление режимом работы интерферометра осуществляется цифровой аппаратурой на базе ЭВМ «Электроника ДЗ-28» [9].

Для фазовой калибровки интерферометра используется схема, позволяющая передавать калибровочный шумовой сигнал одновременно на две антенны с помощью специального кабеля, проложенного между антеннами. Схема обеспечивает фазовую калибровку трактов интерферометра с погрешностью менее 3°. Стабилизация по частоте сигнала гетеродина, передаваемого на обе антенны, осуществлялась по кварцевому генератору через систему ФАПЧ [9]. С целью уменьшения резких фазовых флуктуаций в кабельных трассах интерферометра, возникающих при изменении атмосферных условий, применена термоизоляция кабелей.

* Например, для радиисточника Лебедь-А, по которому производились измерения, на волне 55 см $P_z = 10^{-3}$ Дж, что составляет пренебрежимо малую величину.

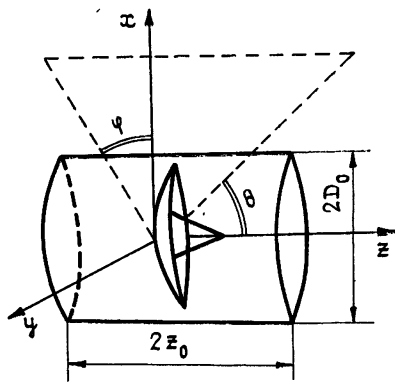


Рис. 1.

Результирующая погрешность измерения фазы в интерферометре находится в пределах 5° . Величина амплитудной погрешности каналов интерферометра определяется, в основном, погрешностью компенсации ослабления для разных комбинаций секций линии задержки, составляющей 3%, и медленным дрейфом коэффициентов усиления каналов $\pm 4\%$ за 6 часов.

3. Методика эксперимента и полученные результаты. Измерение ДН антенны корреляционным методом осуществлялось по радиоисточнику Лебедь-А либо за счет суточного движения внеземного радиоисточника при неподвижной измеряемой антенне, либо путем сканирования исследуемой антенны относительно источника. При измерениях ДН антенны необходимо фиксировать для каждого замера пространственные координаты источника или осуществлять управление движением антенны в соответствии с дискретом и измеряемым сечением ДН исследуемой антенны. Каждый единственный замер ДН антенны представляет собой амплитуду и фазу сигнала, усредненные по числу считываний \cos - и \sin -выходов вольтметров амплифазометра. При этом каждые считанные с периодом 0,2 с с вольтметров значения подвергаются предварительной обработке в реальном масштабе времени с целью синхронного детектирования интерференционных лепестков при известной базе интерферометра. Суммирование считанных значений происходит за период, кратный периоду интерференционной картинке. Максимальный период накопления для получения одного замера составляет 100 с.

Методика обработки сигналов с \cos - и \sin -выходов корреляционного приемника с использованием синхронного детектирования интерференционных лепестков позволяет значительно уменьшить влияние дрейфа нуля выходных каналов амплифазометра, который ограничивает время накопления сигнала, т. е. уменьшает реальную чувствительность системы, а следовательно, и предельный динамический диапазон измеряемых уровней ДН. Уменьшение влияния дрейфа нуля при синхронном детектировании интерференционных лепестков можно представить как модуляцию медленно меняющегося сигнала быстропеременным напряжением и последующим интегрированием. В случае, если характерное время дрейфа нуля значительно больше периода интерференционных лепестков, влиянием дрейфа на результаты измерения ДН при указанной обработке можно пренебречь.

Данные измерений ДН антенны печатались на ЭПМ «Консул-260», записывались на кассетный накопитель на магнитной ленте и выводились на перфоленту с помощью перфоратора ПЛ-150. Все операции, связанные с обработкой сигнала, управлением работой и калибровкой интерферометра, расчетом координат источника, выводом данных, осуществлялись с помощью ЭВМ «Электроника ДЗ-28». При измерениях ДН использовалась калибровка корреляционного приемника, калибровка трактов интерферометра по генератору шума и «общая» калибровка по внеземному радиоисточнику, когда обе антенны интерферометра сопровождают выбранный радиоисточник. Данные калибровок использовались для корректировки считанных показаний в \sin - и \cos -каналах при обработке измеренных сечений ДН антенн; по этим показаниям и рассчитывались амплитудные и фазовые сечения ДН. Сечения кросс-поляризационной ДН антенны измерены с использованием переключения основной поляризации облучателя вспомогательной антенны на ортогональную.

Для последующей цифровой фильтрации данных измерений в соответствии с формулой (5) и вывода обработанных значений ДН антенны на графопостроитель информация о ДН антенны, нанесенная на перфоленту, вводилась в ЭВМ БЭСМ-6.

На рис. 2 представлены сечения амплитудной ДН антенны. График, нанесенный сплошной линией, соответствует сечению по углу места ДН антенны, измеренному корреляционным методом за счет суточного движения источника. Дисперсия значений на уровне -20 дБ составляет менее $0,5$ дБ, а на уровне $-35 \div 40$ дБ — около 2 дБ. Сечение ДН антенны, полученное корреляционным методом с использованием вращения антенны, отмечено штриховой линией. Отличие двух изображенных ДН антенны находится в пределах $0,5$ дБ на уровне -20 дБ. На рис. 2 нанесены сечения ДН антенны, измеренные по Солнцу с помощью радиометра (штрихпунктирная кривая), методом фокусировки на источник, расположенный в зоне Френеля (треугольники).

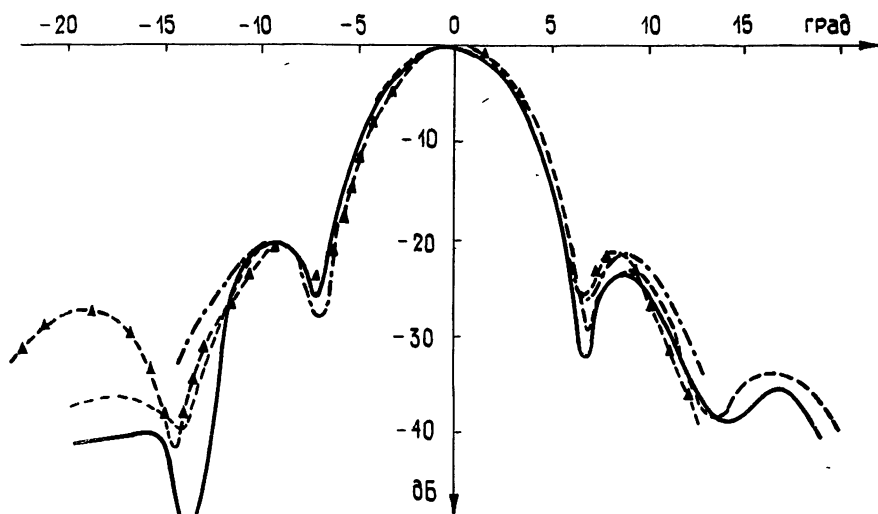


Рис. 2.

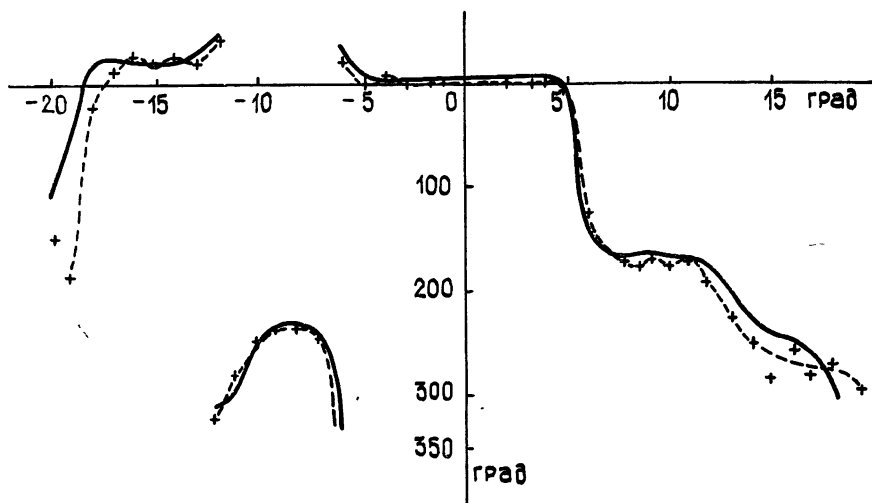


Рис. 3.

Как следует из рис. 2, минимальный уровень ДН антенны, измеренной по Солнцу, приблизительно равен -30 дБ, что на 15 дБ выше, чем минимальный уровень ДН антенны, измеренной корреляционным методом по значительно более слабому радиоисточнику Лебедь-А. Измеренная методом фокусировки ДН антенны не ограничена малостью сигнала

от генератора, расположенного в зоне Френеля антенны. Однако, как известно [3], методические погрешности метода фокусировки позволяют измерять лишь главный и первый боковой лепесток ДН антенны и приводят к большим отклонениям в дальних боковых лепестках, что и иллюстрируется рис. 2. Рис. 2 свидетельствует, таким образом, о существенном преимуществе корреляционного метода перед другими методами с точки зрения измерения малых уровней ДН. Из сравнения сечений, полученных описанными методами, видно, что реализации отличаются между собой не более чем на 2 дБ до уровней -20 дБ. На рис. 3 представлены две реализации фазовой ДН антенны, найденные корреляционным методом. В точках, соответствующих амплитудной ДН

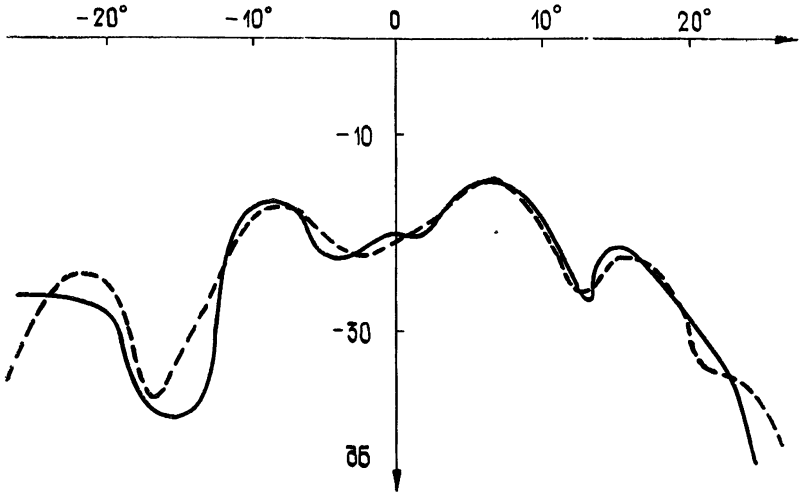


Рис. 4.

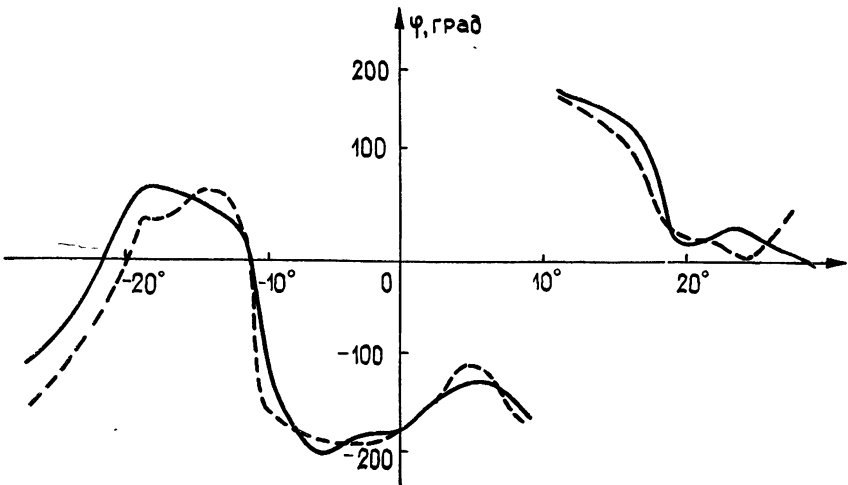


Рис. 5.

антенны на уровне -20 дБ, дисперсия фазовой ДН антенны составляет менее 5° . На рис. 4 и рис. 5 изображены два сечения кросс-поляризационной амплитудной и фазовой ДН антенны. Амплитудная ДН нормирована на значение сигнала в максимуме ДН антенны на основной поляризации. Сечения кросс-поляризационной ДН сняты под углом 45° к плоскости основной поляризации антенны.

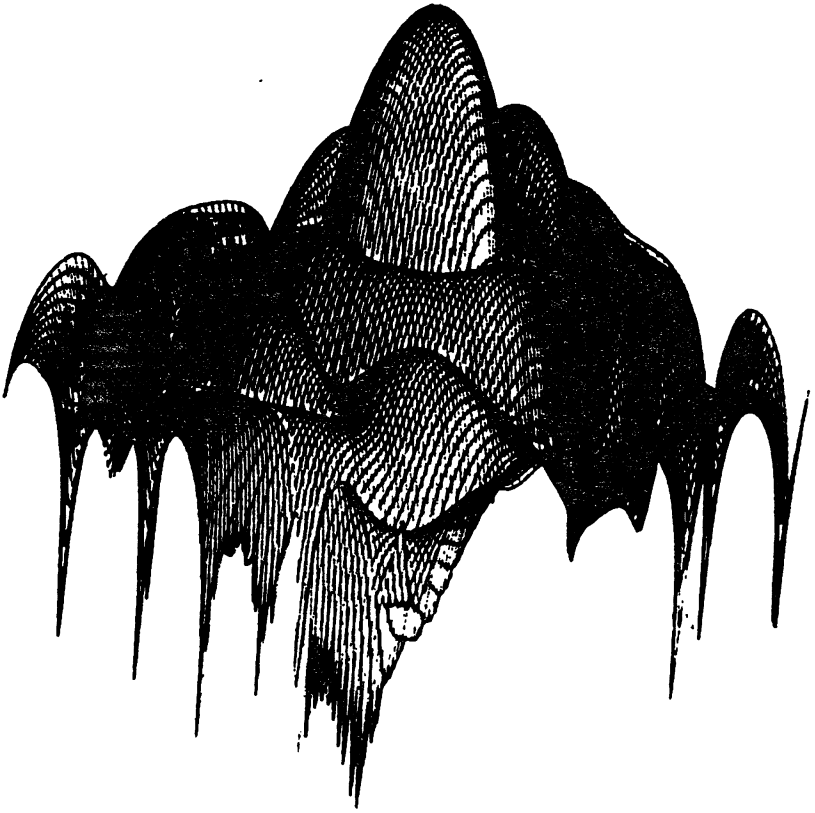


Рис. 6.

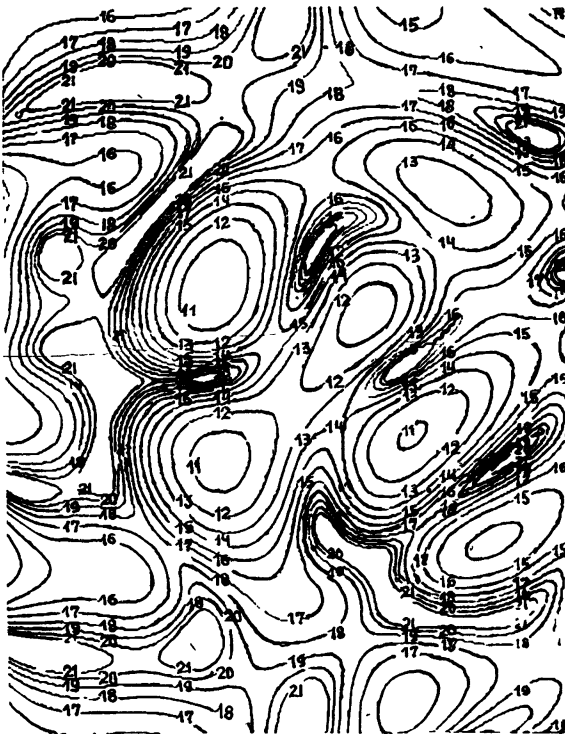


Рис. 7.

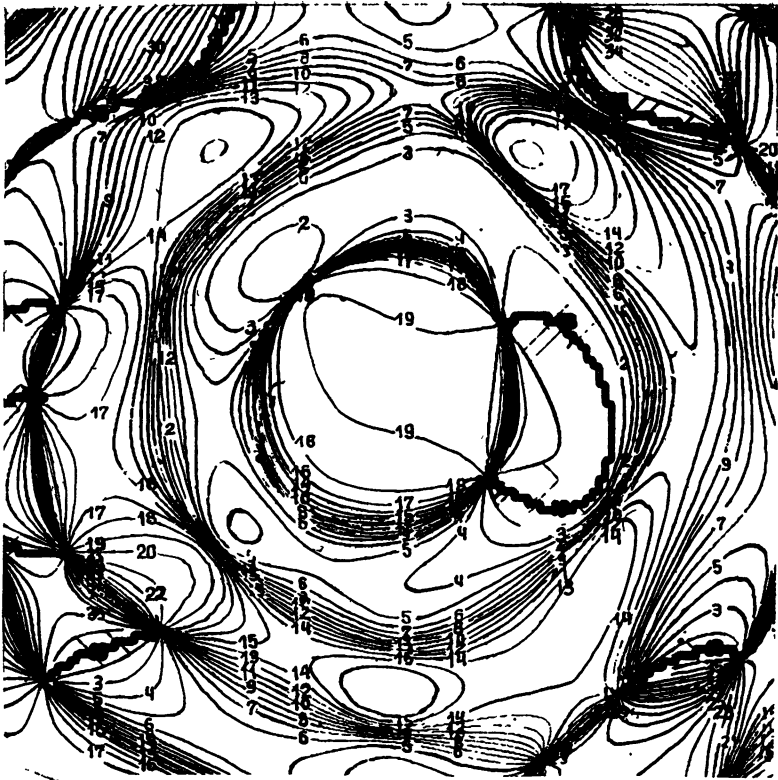


Рис. 8

На рис. 6 представлена в изометрической проекции «сглаженная» двумерная амплитудная ДН антенны (измеренная в секторе углов $40^\circ \times 40^\circ$ с дискретом в 1°).

На рис. 7 в виде линий равного уровня построена амплитудная кросс-поляризационная ДН антенны (в угловом секторе $40^\circ \times 30^\circ$ с шагом 2 дБ по амплитуде). На рис. 8 нанесена в виде линий равного уровня с шагом 10° фазовая ДН антенны на основной поляризации. Экспериментальные данные амплитудной и фазовой ДН антенны позволяют восстановить АФР поля в раскрыве антенны путем выполнения быстрого преобразования Фурье (БПФ) комплексной ДН антенны. Сечение амплитудного распределения поля, проходящее через центр антенны, представлено на рис. 9.

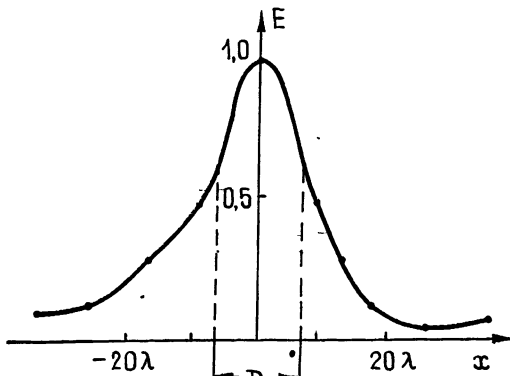


Рис. 9.

В заключение перечислим основные преимущества корреляционного метода с точки зрения измерения малых уровней ДН антенны.

1) Как уже отмечалось ранее, корреляционный метод увеличивает динамический диапазон измеряемых уровней ДН до двух раз «по децибелам» по сравнению с методами, основанными на измерении мощности выходного сигнала.

2) Корреляционный метод позволяет измерять поляризационную ДН по неполяризованному излучению и фазовую ДН. Знание последней, в свою очередь, позволяет более эффективно выполнять цифровую фильтрацию (6) и находить такую важную характеристику антенны, как амплитудно-фазовое распределение поля на раскрыве.

3) За счет развертывания во времени интерференционных лепестков может быть увеличено время накопления, что эквивалентно повышению чувствительности приемника.

4) Корреляционный метод нечувствителен к распределенному фоновому излучению (земли, атмосферы и пр.), вносящему существенный вклад в погрешность измерений ДН, выполняемых обычным радиоастрономическим методом.

Результаты проведенных авторами измерений показывают действительность перечисленных выше преимуществ корреляционного метода.

Авторы выражают благодарность А. А. Романычеву и В. С. Беагону за предоставленную ими возможность использования корреляционной аппаратуры радиointерферометра на волну 55 см и Н. М. Цейтлину за постоянное внимание к работе и ряд полезных советов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Smith P.—IEEE Trans. Ant. Propag., 1966, AP-14, № 1, p. 6; AP-14, № 5, p. 660.
2. Hartsuijker A. P. et. al.—IEEE Trans. Ant. Propag., 1972, AP-20, № 2, p. 229.
3. Цейтлин Н. М. Антенная техника и радиоастрономия. — М.: Сов. радио, 1976.
4. Болотов Г. П., Кияшко Б. В. — Изв. вузов — Радиофизика, 1977, 20, № 11, с. 1721.
5. Mc Clintock W. J. — Marconi Review, 1981, 44, № 223, p. 244.
6. Коротков В. С. и др. Препринт НИРФИ № 150, 151. — Горький, 1982.
7. Есепкина Н. А., Корольков Д. В., Парийский Ю. Н. Радиотелескопы и радиометры. — М.: Наука, 1973.
8. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. — М.: Наука, 1970.
9. Беагон В. С. и др. Препринт НИРФИ № 143. — Горький, 1980.
10. Табага Н, Iпouл M. — Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 1980, 39, p. 379.
11. Абрамов В. И., Белов И. Ф., Виняйкин Е. Н., Разин В. А. — Препринт НИРФИ № 158. — Горький, 1983.

Научно-исследовательский
радиофизический институт

Поступила в редакцию
11 апреля 1983 г.

MEASUREMENT OF POLARIZATION AND PHASE PATTERNS OF ANTENNAS AND AMPLITUDE-PHASE DISTRIBUTION BY CORRELATION METHOD, USING COSMIC RADIO SOURCES

N. V. Veksler, A. V. Kalinin, V. S. Korotkov, V. I. Turchin

Measurements of amplitude, phase and polarization antenna patterns by correlation method, using cosmic radio sources are discussed. The expression for correlation matrix taking into consideration polarization characteristics of antennas and radiation is obtained. The exact expression for digital filtration of experimental pattern dates are given. The experimental pattern dates and the results of reconstruction of amplitude-phase distribution, using various methods of information representation, are given.