

В. И. ТУРЧИН, Н. М. ЦЕЙТЛИН

К ВОПРОСУ ОБ ИЗМЕРЕНИИ ДИАГРАММ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕНН В ЗОНЕ ФРЕНЕЛЯ

(Представлено академиком А. В. Гапоновым-Греховым 9 XII 1971)

Измерения диаграмм направленности, особенно больших антенн, часто связаны с весьма существенными трудностями из-за необходимости размещения передатчика (или приемника) в дальней зоне антенны, т. е. на больших расстояниях и высотах. При подобных исследованиях используются либо летательные аппараты (¹, ²) и передатчики на вышках, что технически сложно, а в целом ряде случаев и невозможно, либо вносимые источники излучения, возможности которых также ограничены конечными угловыми размерами и малостью сигнала (³). Поэтому представляются актуальными методы измерения диаграмм в зоне Френеля, т. е. на существенно более близких расстояниях, с последующим пересчетом в дальнюю зону. Следует отметить, что при этом основным является определение распределения амплитуды и фазы по раскрытию антенны. Однако методы определения этого распределения и последующей обработки технически существенно различны.

Известный зондовый метод, при котором измеряется амплитуда и относительная фаза распределения по раскрытию, фурье-сопряженные с диаграммой в дальней зоне, громоздок и сложен. Поэтому более перспективными, на наш взгляд, являются обычные амплитудные измерения диаграмм, в которых фазовые искажения, обусловленные близким расстоянием, либо компенсируются, либо учитываются. К таким методам относятся метод фокусировки антенны (⁴⁻⁶) и предложенный в (⁷) и проверенный экспериментально в (⁷, ⁸) голографический метод с оптической обработкой. Недостатками метода (⁷) являются трудность переноса голограммы на пленку, недостаточный динамический диапазон пленки, влияние постоянной составляющей и многого изображения, абберации линз, шумы фотопленки, и т. д. Более существенно и принципиально, однако, то, что при оптической обработке весьма затруднительно получение фазовой диаграммы (или распределения фазы по раскрытию); несмотря на то, что при оптической обработке в принципе возможна регистрация распределения фазы по изображению, технически это осуществить намного труднее, чем регистрацию амплитуды изображения. Поэтому метод (⁷) не дает, например, фазовую диаграмму антенны и не позволяет судить о распределении фазы по раскрытию*.

В связи со сказанным, более целесообразным представляется метод измерения либо голограммы поля антенны в ближней зоне (как в (⁷)), либо

* Сведения о распределении поля по раскрытию полезны также при разработке антенн и введении необходимых коррекций.

непосредственно самого поля (т. е. амплитуды и фазы) * с последующей обработкой, но не оптической, а на ЭВМ. Обработка при этом осуществляется по формулам, опирающимся на принцип Гюйгенса в приближении, используемом в голографии. При этом из измеренного с.в.ч.-поля или его голограммы могут быть извлечены интересующие нас распределение амплитуды и фазы по раскрыву и амплитудная и фазовая диаграммы направленности (на ЭВМ амплитуда и фаза получаются с одинаковой легкостью).

Динамический диапазон ЭВМ практически неограничен, при обработке непосредственно измеренного поля вообще исключаются мнимое изображение и постоянная составляющая (при обработке голограммы поля их можно подавить так, как это делается при оптической обработке), нет необходимости переноса голограммы на фотопленку, исключаются шумы фотопленки, абберации линз и т. д. Что касается больших по сравнению с ЭВМ возможностей оптических машин при обработке больших массивов информации, то при измерении диаграмм, как будет показано ниже, большого числа точек и не требуется.

Если $f_R(\xi, \eta)$, ξ, η — проекции единичного вектора, смотрящего в точку наблюдения, в прямоугольной системе координат, — поле, создаваемое антенной в ближней зоне, например, на сфере радиуса R , то диаграмма направленности $f(\xi, \eta)$ связана с полем $f_R(\xi, \eta)$ двумерным преобразованием Френеля (λ -длина волны)

$$f(\xi, \eta) = \iint f_R(\xi', \eta') \exp\left(i\pi \frac{R}{\lambda}\right) [(\xi - \xi')^2 + (\eta - \eta')^2] d\xi' d\eta'. \quad (1)$$

Поскольку реально (поле или голограмма) измеряются в отдельных точках (например, эквидистантно с шагом $\Delta\xi_n, \Delta\eta_n$), интегрирование в (1) мы должны заменить суммированием в конечных пределах. Это накладывает ограничения на величину шага $\Delta\xi_n, \Delta\eta_n$ и на интервал углов $[-\xi_{n/2}, \xi_{n/2}; -\eta_{n/2}, \eta_{n/2}]$, в котором измеряется поле (голограмма).

Во-первых, при замене интегрирования суммированием получается последовательность диаграмм направленности, образующих сетку с шагом по ξ и η $/(R\Delta\xi_n), \lambda / (R\Delta\eta_n)$; для точного восстановления диаграммы необходимо, чтобы величина шага превышала характерный масштаб спада диаграммы направленности λ/D , D — размер раскрыва, в M_1 раз, $M_1 \gg 1$. Во-вторых, как нетрудно показать, мы можем восстановить диаграмму направленности лишь в конечном интервале углов $|\xi| \leq \xi_{n/2}$, $|\eta| \leq \eta_{n/2}$, где $\xi_n \ll \xi_n - D/R$, $\eta_n \ll \eta_n - D/R$. Считая $\xi_n = \eta_n$, $\Delta\xi_n = \Delta\eta_n$ и вводя параметр $M_2 = \xi_n D / \lambda$, характеризующий примерное число восстанавливаемых боковых лепестков, получаем количество точек N , необходимых для восстановления диаграммы направленности на ЭВМ **:.

$$N = 2(\xi_n / \Delta\xi_n)^2 = 2(M_1 + 2M_1 M_2 / m)^2. \quad (2)$$

Здесь $m = 2D^2 / (R\lambda)$ характеризует уменьшение R по сравнению с дальней зоной.

Из (2) следует, что при разумных значениях M_1 и M_2 (например, $M_1 \approx 15$, $M_2 \approx 5$, $m > 10$) число точек невелико и обработку можно провести на ЭВМ. Отметим также, что, поскольку преобразование Френеля (1) легко представить в виде преобразования Фурье, при обработке мож-

* В с.в.ч.-диапазоне это легко осуществить, несколько изменив методику измерений, рассмотренную в (8), а именно, снимая одновременно четыре голограммы с постоянным сдвигом фазы между опорным сигналом и сигналом от антенны $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ и 270° . Комбинация их дает действительную и мнимую часть поля.

** Множитель 2 возникает из-за того, что значение поля в каждой точке характеризуется двумя числами — амплитудой и фазой.

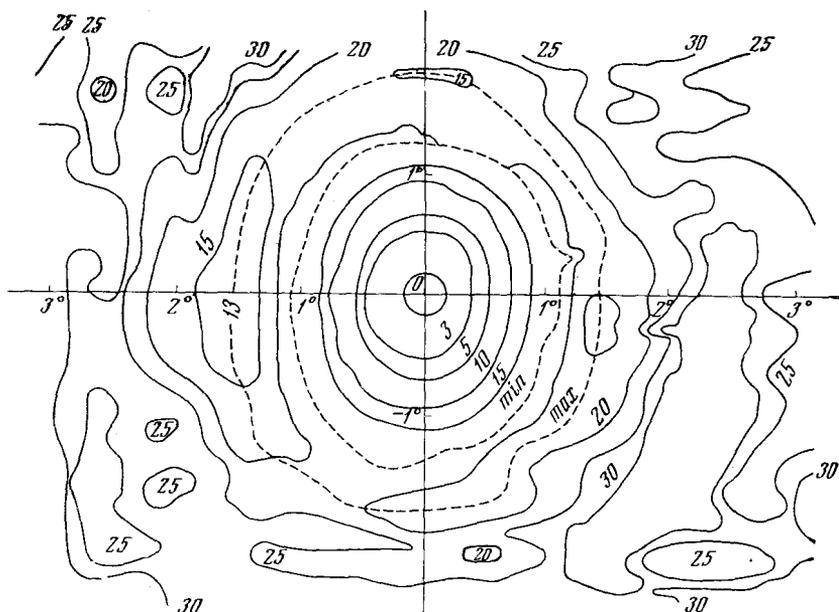


Рис. 1. Рельефная диаграмма направленности 7-метровой антенны ($\lambda = 10$ см), восстановленная на ЭВМ. Цифры у кривых — значения уровней мощности в децибеллах

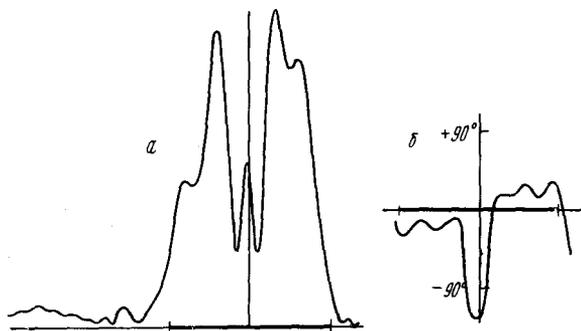


Рис. 2. Сечение распределения поля по раскрытию, полученное на ЭВМ: *a* — амплитуда поля, *б* — фаза. Жирной линией отмечен размер раскрытия антенны (7 м)

но воспользоваться алгоритмом быстрого преобразования Фурье⁽⁹⁾, требующим малых затрат машинного времени.

Очевидно, что на ЭВМ можно обработать не только непосредственную запись поля, но и голограмму этого поля (при этом в зависимости от характеристик голограммы можно либо непосредственно воспользоваться формулой (1), либо представить ее в виде двух последовательных преобразований Фурье, отфильтровывая при этом мнимое изображение и постоянную составляющую так, как это осуществляется при оптической обработке).

С целью иллюстрации вышеизложенного на ЭВМ была обработана голограмма, полученная⁽⁸⁾ при исследовании 7-метровой кассегренновской антенны ($\lambda = 10$ см, $m \approx 10$). На рис. 1 представлена рельефная диаграм-

ма направленности. Диаграмма на рис. 1 аналогична приведенной в (8), полученной путем оптической обработки. На рис. 2 представлено одно сечение амплитудного и фазового распределения поля по раскрытию, полученного на ЭВМ из той же голограммы.

Научно-исследовательский радиофизический
институт
Горький

Поступило
6 XII 1971

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Е. Р. Мплютин, Р. А. Перцовский, С. С. Роговенко, Вестник связи, № 5, 9 (1962). ² Г. В. Шуваев, Измерение пространственных диаграмм направленности УКВ и КВ антенн при помощи шара-зонда, М., 1970. ³ Н. М. Цейтлин, Применение методов радиоастрономии в антенной технике, М., 1966. ⁴ D. Cheng, Wireless Engr., 33, 10, 234 (1956). ⁵ Н. А. Есепкина, ДАН, 113, № 1 (1957). ⁶ Д. А. Дмитренко, А. А. Романычев, Н. М. Цейтлин, Радиотехника и электроника, 14, 12, 2408 (1969). ⁷ Л. Д. Бахрах, А. П. Курочкин, ДАН, 171, № 6 (1966). ⁸ Л. Д. Бахрах, А. П. Курочкин и др., ДАН, 201, № 3 (1971). ⁹ E. O. Brigham, R. E. Moggio, IEEE Spectrum, 4, 12, 63 (1967).