

Министерство высшего и среднего специального образования
РСФСР

Ордена Трудового Красного Знамени
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ РАДИОФИЗИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ

Препринт № 20

В.И.Турчин, Н.М.Цейтлин



ИРФИ

К ВОПРОСУ
ОБ ИЗМЕРЕНИИ ДИАГРАММ НАПРАВЛЕННОСТИ
АНТЕНН В ЗОНЕ ФРЕНЕЛЯ

г.Горький,
1971 г.

Измерения диаграмм направленности, особенно больших антенн, представляют часто весьма существенные трудности, связанные с необходимостью размещения передатчика (или приемника) в дальней зоне антенны, т.е. на больших расстояниях и высотах. При подобных исследованиях используются либо летательные аппараты (например, вертолеты [1] или воздушные шары [2]) и передатчики на вышках, что технически сложно, а в целом ряде случаев и невозможно, либо внеземные источники излучения, возможности которых также ограничены их конечными угловыми размерами и малостью сигнала (см. [3]).

Поэтому представляются актуальными методы измерения диаграмм в зоне Френеля, т.е. на существенно более близких расстояниях, с последующим пересчетом в дальнюю зону. При этом очевидно, что, если измерить распределение амплитуды и фазы по раскрытию антенны, то Фурье-преобразование от этого распределения непосредственно дает диаграмму в дальней зоне. На этом основан так называемый зондовый метод, при котором измеряется амплитуда и относительная фаза распределения по раскрытию. Метод этот, однако, достаточно громоздок и сложен. Поэтому более заманчивыми и перспективными представляются обычные амплитудные измерения диаграмм,

в которых фазовые искажения, обусловленные близким расстоянием, либо компенсируются, либо каким-то образом учитываются. К таким методам относятся метод фокусировки антенны (например, с помощью выноса облучателя из фокуса [4, 5, 6]) и предложенный в [7] и проверенный экспериментально в [7, 8] голографический метод (с оптической обработкой СВЧ голограммы).

Сущность метода [7] состоит в записи СВЧ голограммы поля от источника, осуществляемой посредством приема сигнала при измерении диаграммы не только на исследуемую антенну, но и на вспомогательный рупор (опорный сигнал); и последующего суммирования и квадрирования сигналов с антенны и рупора. С помощью чисто амплитудных измерений, аналогичных обычным измерениям диаграмм, мы получаем таким образом, голограмму, содержащую информацию об амплитуде и фазе поля. Раздельно, в явном виде, данные об амплитуде и фазе не извлекаются; голограмма переносится на пленку и подвергается оптической обработке в когерентном свете с помощью линз, корректирующих конечное расстояние до источника и осуществляющих преобразование Фурье, в результате чего получается изображение диаграммы в дальней зоне. Обладая тем преимуществом перед методом фокусировки, что не требуется внедрения в антенну (например, перемещения облучателя), голографический метод имеет в то же время ряд недостатков, существенными из которых являются: трудность переноса голограммы на пленку, недостаточный динамический диапазон пленки, влияние

постоянной составляющей, — фоновой засветки, — и мнимого изображения, абберации линз, шумы фотопленки и т.д. Эти недостатки имеют технический характер.

Более существенно и принципиально, однако, то, что при оптической обработке весьма затруднительным является получение фазовой диаграммы (или распределения фазы по раскрыву); несмотря на то, что в принципе при оптической обработке 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 раскрыву⁺).

От указанных выше недостатков свободен предлагаемый метод измерения либо голограммы поля в ближней зоне, либо непосредственно самого поля (т.е. амплитуды и фазы)⁺⁺ с последующей обработкой, но не оптической, а на ЭВМ.

⁺) Сведения о распределении поля по раскрыву полезны также при разработке антенн и введении необходимых коррекций.

⁺⁺) В СВЧ-диапазоне это легко осуществить, несколько изменив методику измерений, рассмотренную в [8], а именно измерив одновременно четыре голограммы с постоянным сдвигом фазы между опорным сигналом и сигналом от антенны 0; 90; 180; и 270°. Комбинация их дает действительную и мнимую часть поля.

Обработка при этом осуществляется по формулам, опирающимся на принцип Гюйгенса в приближении, используемом в голографии.

При этом из измеренного СВЧ-поля или его голограммы могут быть извлечены интересующие нас распределения 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 фотошленку, исключаются шумы фотошленки, абберация 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.

Пусть $f_R(\xi, \eta)$ (ξ, η - проекции единичного вектора, смотрящего в точку наблюдения, в прямоугольной системе координат) - поле, создаваемое антенной в ближней зоне, например, на сфере радиуса R . Нетрудно показать, что диаграмма направленности $f(\xi, \eta)$ связана с полем $f_R(\xi, \eta)$ двумерным преобразованием Фурье.

$$f(\xi, \eta) = \iint f_R(\xi', \eta') e^{-ix \frac{1}{\lambda} [(\xi - \xi')^2 + (\eta - \eta')^2]} d\xi' d\eta' \quad (1)$$

Здесь λ - длина волны.

Поскольку реально поле (или голограмма) измеряются в отдельных точках (например, эквидистантно с шагом $\Delta\xi_n, \Delta\eta_n$), мы должны заменить в (1) интегрирование суммированием в конечных пределах. Это налагает 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 мы получим не одну диаграмму направленности, а бесконечную последовательность диаграмм направленности, образующих как бы прямоугольную сетку с шагом по ξ и η $\frac{\lambda}{R\Delta\xi_n}, \frac{\lambda}{R\Delta\eta_n}$. Для точного восстановления диаграммы направленности очевидно необходимо, чтобы величина шага превышала характерный масштаб спада диаграммы направленности $\frac{1}{D}$ (D - размер раскрыва) в M_1 раз причем $M_1 \gg 1$. Во-вторых, как нетрудно показать, из-за конечного углового размера снимаемого поля мы можем восстановить диаграмму направленности лишь в конечном интервале углов $[-\xi_d/2, \xi_d/2; -\eta_d/2, \eta_d/2]$ определяемом следующим образом

$$\xi_d \leq \xi_n - D/R, \quad \eta_d \leq \eta_n - D/R$$

Будем считать, что $\xi_n = \eta_n, \Delta\xi_n = \Delta\eta_n$. Тогда, если ввести параметр M_2

$$M_2 = \frac{\epsilon_d D}{\lambda}$$

характеризующий примерно, сколько боковых лепестков нам нужно восстановить, мы получим количество точек N , которые необходимо ввести в ЭВМ для восстановления диаграммы направленности

$$N = 2 \left(\frac{\epsilon_n}{\Delta \epsilon_n} \right)^2 = 2 \left(M_1 + 2 \frac{M_1 M_2}{m} \right)^2 \quad +) \quad (2)$$

Здесь $m = \frac{2D^2}{R\lambda}$ - число показывающее, во сколько раз расстояние R , на котором мы снимаем поле, меньше условий границы дальней зоны.

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 может быть без труда обработано на ЭВМ. Отметим также, что, поскольку преобразование Френеля (1) легко представить в виде преобразования Фурье, при обработке можно воспользоваться алгоритмом быстрого преобразования Фурье [8], требующим малых затрат машинного времени.

Совершенно 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).

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

С целью иллюстрации вышеизложенного на ЭВМ была обработана голограмма, полученная [8] при исследовании 7-ми метровой антенны ($\lambda = 10$ см, $m \approx 10$). На рис. 1 представлена полученная при этом рельефная диаграмма направленности (время обработки на машине БЭСМ-4 составило 35 мин. при числе вводимых точек $N \approx 1,3 \cdot 10^3$). Диаграмма на рис. 1 аналогичная приведенной в [8], полученной путем оптической обработки. На рис. 2 представлено одно сечение амплитудного и фазового распределения поля по раскрыву, полученного на ЭВМ из той же голограммы.

Естественно, предложенный метод требует дальнейшей тщательной разработки, особенно с точки зрения исследования динамического диапазона и погрешностей измерения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е.Р.Милютин, 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, Изд-во "Связь", М., (1970).
3. Н.М.Цейтлин, Применение методов радиоастрономии в антенной технике, Изд-во "Сов.радио", М., (1966).
4. D.Cheng Wireless Engr. 33, 10, 234 (1956)
5. Н.А.Есепкина, ДАН СССР, 113, 1(1957).
6. Д.А.Дмитренко, А.А.Романычев, Н.М.Цейтлин, Радиотехника и электроника, 14, 12, 2108 (1969).
7. Л.Д.Бахрах, А.П.Курочкин, ДАН СССР, 171, 6(1968).
8. Л.Д.Бахрах, Д.А.Дмитренко, А.П.Курочкин, Н.М.Цейтлин, Д.А.Арутюнян, ДАН СССР, ноябрь (1971).
9. E.O.Brigham, R.E.Morrow IEEE Spectrum 4, 12, 63 (1967).

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Рельефная диаграмма направленности 7-метровой антенны ($\lambda = 10$ см), восстановленная на ЭВМ.

Рис. 2. Сечение распределения поля по раскрыву (а) – амплитуда поля, б) – фаза), полученное на ЭВМ. Жирной линией под рисунками отмечен размер раскрыва антенны (7 м).



