

# ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЯ В РАСКРЫВЕ РЕШЕТКИ МОДУЛЯЦИОННЫМ СПОСОБОМ

*А. А. Деманский, В. С. Рабинович, В. Г. Соколов*

Известно, что измерив поле в конечном числе точек в ближней зоне антенны, можно найти ее диаграмму направленности или амплитудно-фазовое распределение поля в раскрыве [1, 2]. При использовании антенных решеток с управляемыми излучающими элементами появляется возможность определения амплитудно-фазового распределения поля в раскрыве (а следовательно, и диаграммы направленности) по замерам поля при помощи неподвижного зонда. В работе [3] по наличию или отсутствию модуляции в принимаемом всей решеткой сигнале при изменении фазовых состояний отдельных ее элементов судят о работоспособности излучателей антенны. Предлагаемый ниже способ восстановления амплитудно-фазового распределения состоит в следующем. На некотором расстоянии от антенны располагают неподвижный излучающий зонд (зонд может работать и в приемном режиме). В процессе измерений осуществляют изменение фазы на отдельном излучателе решетки в пределах  $360^\circ$  и при этом регистрируют мощность сигнала, принимаемого всей решеткой. Полученную информацию обрабатывают определенным образом, оценивая амплитуду и начальную фазу излучения исследуемых элементов. Приведем соотношения, описывающие процесс измерений и обработки принимаемого сигнала.

Рассмотрим эквидистантную плоскую фазированную решетку, состоящую из  $N$  ( $N \gg 1$ ) излучателей. Совместим координатную плоскость  $xu$  с плоскостью решетки, а начало координат — с ее геометрическим центром. Определим мощность  $P_{\mu s}(t)$  принимаемого решеткой сигнала при непрерывной модуляции фазы во времени  $t$  на элементе с индексами  $\mu$  и  $s$ . При расчете мощности примем, что излучающий зонд

находится в зоне Френеля решетки, мощность принимаемого сигнала отнормируем к ее значению, которое соответствует начальным значениям фазовых сдвигов на элементах решетки. Предположим также, что диаграммы направленности всех элементов идентичны и не зависят от амплитудно-фазового распределения в раскрытии антенны. Эти условия можно считать справедливыми при использовании в решетке большого числа излучателей, каждый из которых согласован с каналом питания системы возбуждения [4]. При сделанных предположениях можно убедиться, что

$$(1) \quad P_{\mu s}(t) = 1 + 2 \left( \frac{A_{\mu s}}{A} \right)^2 - 2 \left( \frac{A_{\mu s}}{A} \right) \cos(\Phi_{\mu s}(0) + q_{\mu s} - \varphi) + \\ + 2 \frac{A_{\mu s}}{A} \cos(\Phi_{\mu s}(t) + q_{\mu s} - \varphi) - 2 \left( \frac{A_{\mu s}}{A} \right)^2 \cos(\Phi_{\mu s}(t) - \Phi_{\mu s}(0)),$$

где  $A_{\mu s}$  — амплитудное распределение в раскрытии;  $A$  и  $\varphi$  — амплитуда и фаза сигнала, принимаемого всей антенной при  $t=0$  (т.е. перед началом изменения фазы на каждом из исследуемых элементов);  $q_{\mu s}$  — фазовое распределение на элементах решетки, обусловленное расположением излучающего зонда в зоне Френеля антенны;  $\Phi_{\mu s}(0)$  — начальное фазовое распределение, создаваемое системой возбуждения элементов решетки и электрически управляемыми фазовращателями при  $t=0$ ;

$$\Phi_{\mu s}(t) = \Phi_{\mu s}(0) + \frac{2\pi}{T} t;$$

$T$  — время изменения фазы на исследуемом элементе решетки на  $360^\circ$  (переменная  $t$  изменяется в интервале  $0 - T$  для определенности непрерывно).

Первые три слагаемых формулы (1) остаются постоянными в процессе изменения фазы на исследуемом элементе, два последних определяют модуляцию величины  $P_{\mu s}(t)$ . При выполнении условия

$$(2) \quad m_{\mu s} = \frac{A_{\mu s}}{A} \ll 1,$$

Модуляция диаграммы (1) определяется членом  $\alpha = 2m_{\mu s} \cos(\Phi_{\mu s}(t) + q_{\mu s} - \varphi)$ , при  $m_{\mu s} \gg 1$  — последним слагаемым. Очевидно, при  $N \gg 1$  практически выполнимо лишь условие (2). Выражение для  $\alpha$  содержит информацию как об амплитуде излучения исследуемых элементов  $A_{\mu s}$ , так и о начальной фазе излучения  $\varphi_{\mu s} = \Phi_{\mu s}(0) + q_{\mu s} - \varphi$  (с точностью до постоянной величины  $\varphi$ , не изменяющейся от элемента к элементу). Значения  $q_{\mu s}$  нетрудно рассчитать, зная геометрию решетки и расстояние между плоскостью решетки и облучающим зондом. Поэтому по величинам  $\varphi_{\mu s}$  нетрудно определить начальное фазовое распределение  $\Phi_{\mu s}(0)$ . Для оценки неизвестных параметров  $m_{\mu s}$  и  $\varphi_{\mu s}$  исследуемого колебания (1) используем корреляционную обработку, т.е. осуществим операцию свертки между принимаемым сигналом и опорным гармоническим колебанием той же частоты. Такая обработка может быть осуществлена либо при помощи специального корреляционного устройства, либо математически с привлечением ЭВМ. В обоих случаях получаемые в процессе измерений отсчеты мощности умножаются на две ортогональные составляющие  $\cos(2\pi/T)t$  и  $\sin(2\pi/T)t$ , а затем производится интегрирование на интервале, соответствующем перефазировке антенны в пределах  $360^\circ$ . В результате интегрирования получаем следующие выражения:

$$(3) \quad P_{1\mu s} = \frac{1}{T} \int_0^T P_{\mu s}(t) \cos \frac{2\pi}{T} t dt,$$

$$(4) \quad P_{2\mu s} = \frac{1}{T} \int_0^T P_{\mu s}(t) \sin \frac{2\pi}{T} t dt.$$

Подставляя в формулы (3) и (4) соотношение (1), имеем

$$(5) \quad P_{1\mu s} = m_{\mu s} \cos \varphi_{\mu s} - m_{\mu s}^2,$$

$$(6) \quad P_{2\mu s} = -m_{\mu s} \sin \varphi_{\mu s}.$$



Из формул (5) и (6) нетрудно найти выражения для оценочных значений  $\tilde{m}_{\mu s}$  и  $\tilde{\varphi}_{\mu s}$ :

$$(7) \quad \tilde{m}_{\mu s} = \sqrt{m_{\mu s}^2 + m_{\mu s}^4 - 2m_{\mu s}^3 \cos \varphi_{\mu s}},$$

$$(8) \quad \tilde{\varphi}_{\mu s} = \arctg \left\{ \frac{\sin \varphi_{\mu s}}{\cos \varphi_{\mu s} - m_{\mu s}} \right\}.$$

При выполнении условия (2) выражения (7) и (8) можно упростить:

$$(9) \quad \tilde{m}_{\mu s} \approx m_{\mu s} (1 + \Delta_{1\mu s}),$$

$$(10) \quad \tilde{\varphi}_{\mu s} \approx \varphi_{\mu s} + \Delta_{2\mu s},$$

где ошибки в восстановлении амплитуды и начальной фазы излучения определяются следующими выражениями:

$$(11) \quad \Delta_{1\mu s} \approx -m_{\mu s} \cos \varphi_{\mu s},$$

$$(12) \quad \Delta_{2\mu s} \approx m_{\mu s} \sin \varphi_{\mu s}.$$

Из формул (11) и (12) следует, что величины амплитудных и фазовых ошибок при восстановлении распределения поля в раскрыве антенны предлагаемым способом пропорциональны глубине модуляции принимаемого сигнала и, кроме того, зависят от фазы излучения исследуемого элемента  $\varphi_{\mu s}$ . Из формул (11) и (12) следует, что качество восстановленного распределения поля наилучшее, когда опорный сигнал  $A$  представляет собой значение максимума диаграммы решетки в зоне Френеля. Однако при этом в случае  $N \gg 1$  малая глубина модуляции принимаемого сигнала может привести к ухудшению точности измерений. Тогда потребуется увеличить отношение  $m_{\mu s}$ , уменьшая величину опорного сигнала  $A$ . Очевидно существует множество возможных алгоритмов для расфазировки луча до заданного уровня. Если для уменьшения величины  $A$  используется линейный алгоритм фазирования, искажения  $\Delta_{1\mu s}$  и  $\Delta_{2\mu s}$  могут содержать периодически изменяющуюся составляющую вдоль раскрыва, что приведет к появлению так называемых паразитных боковых лепестков в вычисленной по этому распределению диаграмме направленности. Исходя из структуры формул (11) и (12), можно заключить, что наиболее предпочтительным способом уменьшения уровня опорного сигнала  $A$  является расфазировка антенной решетки по квазислучайному алгоритму.

В этом случае вычисленная по найденному распределению поля диаграмма направленности содержит дополнительное фоновое излучение. При оценке фона будем полагать, что величины  $\varphi_{\mu s}(0)$  являются случайными и равномерно распределенными в интервале  $0-2\pi$  рад. Обозначая чертой сверху операцию усреднения по ансамблю случайных фазовых распределений, определим статистические характеристики ошибок

$$(13) \quad \overline{\Delta_{1\mu s}} = \overline{\Delta_{2\mu s}} = 0; \quad \overline{\Delta_{1\mu s}^2} = \overline{\Delta_{2\mu s}^2} = \frac{1}{2} m_{\mu s}^2.$$

Используя соотношения (13), нетрудно определить (см., например, [5]) средний уровень фона в восстановленной диаграмме за счет флуктуаций (11) и (12).

$$(14) \quad \delta^2 F \approx m^2 \frac{1}{N}.$$

Формула (14) получена при условии, что амплитудное распределение в раскрыве равномерное. Величина  $m$  может быть определена следующим образом. Пусть суммарная среднеквадратичная ошибка за счет ограниченной разрешающей способности измерительного прибора обратно пропорциональна величине  $m$ , т. е.  $\sigma_1^2 = \sigma^2/m^2$ , где  $\sigma$  определяется качеством измерительной системы. При этом для среднего уровня фона имеем выражение

$$(15) \quad \delta_1^2 F \approx \left( \frac{\sigma^2}{m^2} + m^2 \right) \frac{1}{N}.$$

При условии  $m_{\text{опт}} = \sqrt{\sigma}$  соотношение (15) минимально:

$$(\delta_1^2 F)_{\text{мин}} = \frac{1}{N} 2(m_{\text{опт}})^2.$$

Например, при  $\sigma \approx 0,01$   $m_{\text{опт}} \approx 0,1$ ; при  $\sigma \approx 0,04$   $m_{\text{опт}} \approx 0,2$ .



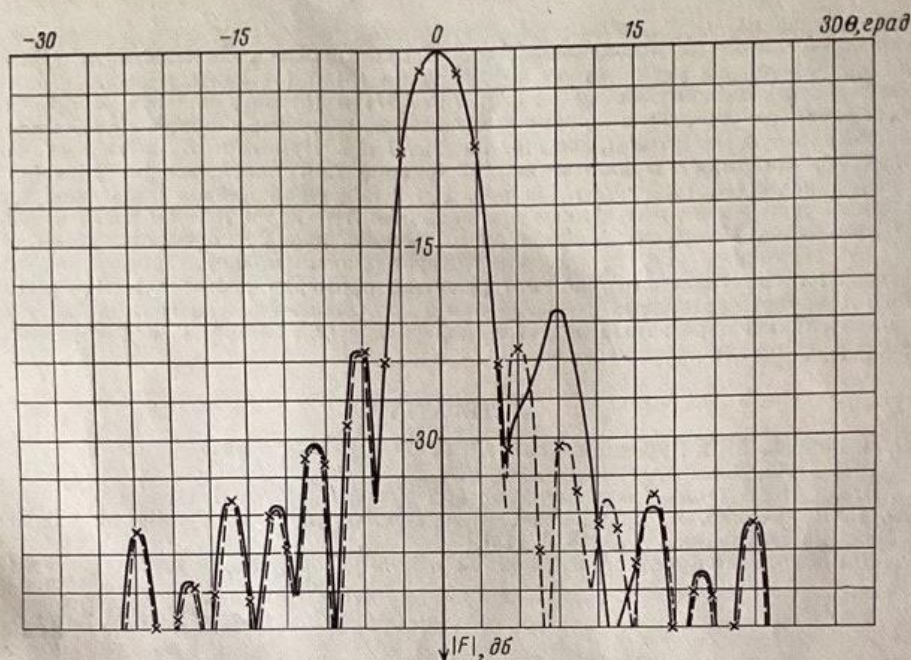


Рис. 1

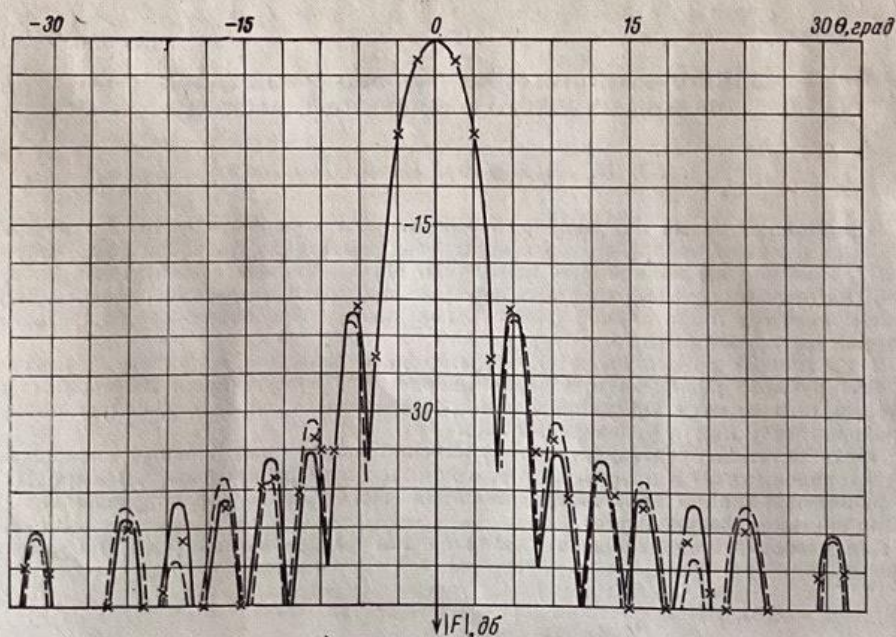


Рис. 2

Для подтверждения расчетных соотношений процесс восстановления распределения поля в раскрыве и диаграммы направленности в дальней зоне плоской круглой антенной решетки, содержащей примерно 500 изотропных излучателей, моделировался при помощи ЭВМ. Излучающий зонд расположен на расстоянии  $z=127\lambda$  от решетки, расстояния между элементами вдоль оси строк и столбцов одинаковы и равны  $0,5\lambda$ . Амплитудное распределение — спадающее с уровнем на краю, равным 0,3 от своего максимума. При моделировании процесса измерений и обработки принима-

емого сигнала на ЭВМ каждый элемент решетки перефазировался в пределах  $360^\circ$  дискретно с шагом  $45^\circ$  и получаемые отсчеты диаграммы направленности по мощности сворачивались в соответствии с формулами (3) и (4) (интегрирование было заменено суммированием). Затем по формулам (7) и (8) определялось распределение поля в раскрыве решетки и по нему вычислялась диаграмма направленности в дальней зоне. Результаты расчетов приведены на рис. 1 и 2. Пунктир относится к эталонной диаграмме, крестики — к диаграмме, полученной при максимальном уровне опорного сигнала  $A((m_{\mu s})_{\max} \approx 0,03)$ . На рис. 1 и 2 сплошной кривой приведены восстановленные диаграммы, полученные при величине  $A \approx -29$  дБ, причем рис. 1 соответствует линейному алгоритму расфазировки антенны, рис. 2 — параболическому. Отметим, что величина  $A \approx -29$  дБ соответствует максимальной глубине модуляции  $(m_{\mu s})_{\max}$  для центрального элемента решетки, примерно равной 0,1. Как видим, в случае линейного алгоритма расфазировки в восстановленной диаграмме присутствует значительный паразитный лепесток, параболический алгоритм расфазировки приводит к разрушению этого лепестка.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Л. Д. Бахрах, А. П. Курочкин, Докл. АН СССР, 1966, 171, 6, 1309.
2. P. L. Ransom, R. Mittra, Proc. I.E.E.E., 1971, 59, 6, 1029.
3. O. Brien, IEEE Trans. Instrumentation and Measurement, 1967, 16, 6, 100.
4. Ю. П. Виниченко, Л. Н. Захарьев, А. А. Леманский, А. Е. Туманская, Радиотехника и электроника, 1973, 18, 6, 1137.
5. Л. С. Шифрин, Вопросы статистической теории антенн, Изд. Советское радио, 1970.

Поступило в редакцию  
31 I 1975