

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

В. И. КУЛЕШОВ, Р. Г. АКОПЯН

ОБ ОГРАНИЧЕНИЯХ НА МИНИМАЛЬНО ДОПУСТИМЫЕ
 РАССТОЯНИЯ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ ДИНАМИЧЕСКИХ
 ПАРАМЕТРОВ ФАР В ЗОНЕ РАСКРЫВА

В связи с широким применением крупноапертурных антенных решеток, граница дальней зоны которых находится на весьма большом расстоянии от антенны, повысился интерес к методам определения характеристик антенны по результатам измерений в ближней зоне. Одним из перспективных направлений являются методы измерения характеристик антенны с качанием луча в динамическом режиме [1—4].

В данной работе рассматриваются вопросы, связанные с ограничением минимально допустимых расстояний при измерениях динамических характеристик антенны с качанием луча в зоне раскрыва.

При измерениях, проводимых в зоне раскрыва ФАР, возникают ошибки, которые увеличиваются при уменьшении расстояния от антенны до измерительного зонда. Рассматриваемые в работе ограничения относятся к методам измерения динамической диаграммы направленности с помощью неподвижного зонда, т. е. измерению в фиксированном направлении зависимости поля от времени в режиме электрического сканирования антенны. Эти ошибки обусловлены отличием полей, излучаемых в различных направлениях, определяемым направленными свойствами излучателей ФАР и самого измерительного зонда.

Рассмотрим линейную эквидистантную антенную решетку. Предположим, что A_{i0} , φ_{i0} — соответственно, амплитуда и фаза i -го излучателя при условии полной симметричности поля излучения каждого излучателя, т. е. полагаем, что решетка состоит из идеально направленных, невзаимодействующих излучателей.

При измерении динамической ДН в дальней зоне амплитудно-фазовое распределение реальной антенны можно отождествить с идеальным случаем, а в зоне раскрыва ФАР поля излучения отдельных излучателей уже не являются идеальными сферами. Отметим, что отличие величины поля излучения в данном направлении от этой же величины в идеальном случае связано с изменением амплитудно-фазового распределения.

Запишем амплитуду и фазу реального излучателя в виде $A_i = A_{i0} + \delta A_i$ и $\varphi_i = \varphi_{i0} + \delta \varphi_i$. Тогда сигнал на выходе зонда, непод-

видно установленного в зоне раскрыва ФАР, можно записать в виде [5]:

$$f_p(t) = \sum_{i=1}^{N^2} (A_{i0} + \delta A_i) \frac{e^{-jkr r_i}}{r_i} \cdot e^{j(\omega_0 - \omega)t} \cdot e^{j\varphi_i} \quad (1)$$

где p — поле излучения в зоне раскрыва; N , i — количество и номер излучателя; r_i — расстояние от i -го излучателя до зонда; A_i — комплексная амплитуда поля i -го излучателя; k — волновое число; v , ω_0 — обобщенная угловая скорость сканирования и частота излучения.

Из выражения (1) следует, что сигнал на выходе зонда имеет дискретный спектр:

$$F_p(\omega_i) = (A_{i0} + \delta A_i) e^{j\delta\varphi_i} \frac{e^{-jkr r_i}}{r_i} \quad (2)$$

Для восстановления ДП в дальней зоне на выходе измерительного зонда подключается фильтр с коэффициентом передачи

$$k_p(\omega_i) = \frac{r_i e^{\frac{\omega_i - \omega_0}{v} \sin \Theta_0}}{e^{-jkr r_i}} = \frac{r_i e^{j\varphi_{i0}}}{e^{-jkr r_i}} \quad (3)$$

Тогда спектр сигнала после фильтрации имеет вид:

$$F(\omega_i) = F_p(\omega_i) k_p(\omega_i) = (A_{i0} + \delta A_i) e^{j(\varphi_{i0} + \delta\varphi_i)} \quad (4)$$

Для того, чтобы получить поле излучения антенны в дальней зоне, необходимо совершить преобразование Фурье над спектром сигнала антенны:

$$f_0 = F\{A_{i0} e^{j\varphi_{i0}}\} \quad (5a)$$

для идеального случая;

$$\begin{aligned} f &= F\{(A_{i0} + \delta A_i) e^{j(\varphi_{i0} + \delta\varphi_i)}\} = F\{A_{i0} e^{j(\varphi_{i0} + \delta\varphi_i)}\} + F\{\delta A_i e^{j(\varphi_{i0} + \delta\varphi_i)}\} = \\ &= f_0 \otimes F\{e^{j\delta\varphi_i}\} + F\{\delta A_i e^{j\varphi_{i0}}\} \otimes F\{e^{j\delta\varphi_i}\} \quad (5) \end{aligned}$$

для реального случая.

В общем случае δA_i и $\delta\varphi_i$ являются функциями амплитуды и угла, характеризующего направление на измерительный зонд, а также фазы и угла:

$$\delta A_i = A_{i0} \Psi(\alpha_i); \quad \delta\varphi_i = \varphi_{i0} \xi(\alpha_i) \quad (6)$$

Рассмотрим вид функций $\Psi(\alpha_i)$ и $\xi(\alpha_i)$. Предположим, что элементарными излучателями в решетке являются либо рупоры, либо от-

крытые концы волноводов, либо вибраторы и т. п. Для таких элементов характерным угловым размером, приближенно совпадающим с шириной ДН по уровню половинной мощности, является $\theta_1 = \lambda/D_1 \cos \alpha_1$, где D_1 — поперечный размер излучателя; α_1 — направление.

Диаграмму излучателя в окрестности максимума, обычно соответствующего направлению $\alpha_1 = \pi/2$, можно описать квадратичной зависимостью [6]:

$$F(\alpha_1) \approx 1 - 0,3 \left[\frac{2(\alpha_1 - \pi/2)}{\theta_1} \right]^2. \quad (7)$$

Отклонение от максимума на угол $\alpha_1 - \pi/2 = \theta_1/4$ приводит к уменьшению уровня излучаемого поля на 7,5%.
С другой стороны, угловая зависимость идеального излучателя есть $F_n(\alpha_1) = 1$. Тогда естественно предположить, что

$$\Psi(\alpha_1) = \frac{F_n(\alpha_1) - F(\alpha_1)}{F_n(\alpha_1)} = 0,3 \left[\frac{2(\alpha_1 - \pi/2) D_1 \cos \alpha_1}{\lambda} \right]^2. \quad (8)$$

Если $D_1 = n\lambda$, где $n = 1, 2, \dots$, то получим:

$$\Psi(\alpha_1) = 1,2n^2 (\alpha_1 - \pi/2)^2 \cos^2 \alpha_1. \quad (9)$$

Функцию $\xi(\alpha_1)$ можно либо положить равной с функцией $\Psi(\alpha_1)$ (фазовая и амплитудная диаграммы элементарного излучателя идентичны), либо положить $\xi(\alpha_1) = 0$, т. е. считать, что фазовые диаграммы реального и идеального излучателей совпадают. Для элементарных излучателей с практически пренебрежимо малой погрешностью принято считать фазовую диаграмму излучателя идеальной. В связи с этим рассмотрим второй случай и поле излучения антенны запишем в виде:

$$f = f_0 + f_0 \otimes F |\Psi(\alpha_1)| = f_0 + f_0 \otimes F |1,2(\alpha_1 - \pi/2)^2 \cos^2 \alpha_1| \quad (10)$$

или

$$f = f_0 + \delta f.$$

где $\delta f = f_0 \otimes F |1,2(\alpha_1 - \pi/2)^2 \cos^2 \alpha_1|$.

Если задана точность измерения ДН ϵ , то очевидно:

$$\left| \frac{f - f_0}{f_0} \right| \leq \epsilon \quad \text{или} \quad \left| \frac{\delta f}{f_0} \right| = \left| \frac{f_0 \otimes F |\Psi(\alpha_1)|}{f_0} \right| \leq \epsilon. \quad (11)$$

Для заданной величины ϵ из (11), определяем значение α_{\max} .

Тогда минимально допустимое расстояние до ФАР определится как

$$R_{\min} \geq \frac{D}{2tg \alpha_{\max}}, \quad (12)$$

где D — длина антенной решетки.

Рассмотрим ограничения на R с учетом направленных свойств не только излучателей ФАР, но и самого измерительного зонда. Очевидно, что возникнут амплитудные и фазовые ошибки измеряемой величины поля, связанные с неидеальностью (несферичностью) ДН измерительного зонда. Пусть в качестве зонда используются элементы поперечного типа. Тогда ДН зонда в окрестности максимума с пренебрежимой погрешностью можно описать квадратичной зависимостью типа (7). (ДН идеального зонда есть $F_n(\alpha_1) = 1$). С учетом неидеальности измерительного зонда измеряемая нами ДН может быть представлена в виде:

$$f = f_0 + f \otimes F|\Psi(\alpha_1)|,$$

где $f = f_0 + \delta f$ — поле излучения антенны с учетом неидеальности излучателей.

С другой стороны:

$$\Psi(\alpha_1) = \frac{F_n(\alpha_1) - F(\alpha_1)}{F_n(\alpha_1)}. \quad (13)$$

Если в качестве измерительного зонда использовать элемент с $D_1 \approx \lambda$, где D_1 — поперечный размер зонда, выражение (13) переписывается в виде:

$$\Psi(\alpha_1) = 1,2(\alpha_1 - \pi/2)^2 \cos^2 \alpha_1. \quad (14)$$

С учетом поправок на неидеальность излучателей антенной решетки и измерительного зонда, для заданной точности измерения ДН ϵ можем записать следующее:

$$\left| \frac{f' - f_0}{f_0} \right| \leq \epsilon \quad (15)$$

или

$$\left| \frac{f + f \otimes F|\Psi(\alpha_1)| - f_0}{f_0} \right| = \left| \frac{f_0 + f_0 \otimes F|\Psi(\alpha_1)| + (f_0 + f_0 \otimes F|\Psi(\alpha_1)|) \otimes F|\Psi(\alpha_1)| - f_0}{f_0} \right| \leq \epsilon. \quad (16)$$

После несложных преобразований выражение (16) можно привести к виду:

$$\left| \frac{f_0 \otimes F|2\Psi(\alpha_1) + \Psi^2(\alpha_1)|}{f_0} \right| \leq \epsilon. \quad (17)$$

Аналогично (11) для заданного ϵ из выражения (17) вычисляем α_{\max} и согласно (12) определяем R_{\min} .

Расчет величины погрешности измерения динамической ДН в зависимости от расстояния между зондом и испытуемой антенной получен путем моделирования задачи на ЭВМ. Задавалось минимально допу-

стимое значение величины R и по формуле (12) определялось значение a_{max} , а затем по (14) — функция $\Psi(\alpha_i)$. После этого с помощью алгоритма БПФ вычислялись значения функции $F[2\Psi(\alpha_i) + \Psi^2(\alpha_i)]$. Поле излучения антенны $f_0 = F[\varphi(\alpha_i)]$, где $\varphi(\alpha_i) = \text{const}$, вычислялось аналогично. Далее, по формуле (17) определялись значения погрешностей ϵ_i для каждого направления α_i , где $-N/2 \leq i \leq N/2$, и полученные результаты сравнивались с заданной предельной величиной ϵ . Если выяснялось, что в результате анализа сопротивления погрешностей не достигалась заданная точность измерения динамической ДЧ, то с определенным шагом (10%) увеличивалось исходное значение величины R . Описанным способом на ЭВМ определялись погрешности ϵ для различных значений величины раскрытия антенны D , в частности, от $D = 100\lambda$ до $D = 250\lambda$. Нижнее предельное значение R принималось равным D .

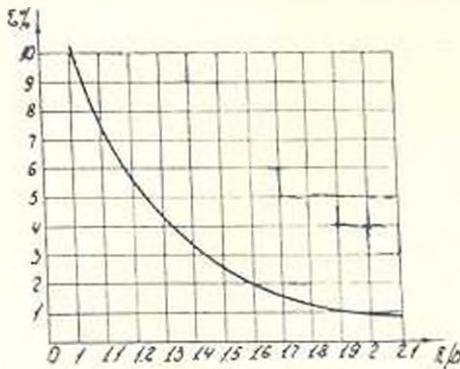


Рис. Зависимость погрешности восстановления динамической ДЧ от величины отношения расстояния между ФАР и измерительным зондом к размеру раскрытия ФАР.

Полученные результаты обобщены и представлены на рисунке. Как видно из графика, с учетом погрешностей дискретизации погрешность восстановления динамической ДЧ, возникающая из-за неидеальности элементарных излучателей антенной решетки и измерительного зонда, не зависит от длины волны λ излучаемого поля, а определяется величиной отношения R/D . Кроме того погрешность практически не зависит от величины динамического диапазона измеряемого поля излучения и, соответственно, динамического диапазона восстановления ДЧ. Исследования проводились до уровней от -20 дБ до -60 дБ через -10 дБ.

Полученные результаты обобщены и представлены на рисунке. Как видно из графика, с учетом погрешностей дискретизации погрешность восстановления динамической ДЧ, возникающая из-за неидеальности элементарных излучателей антенной решетки и измерительного зонда, не зависит от длины волны λ излучаемого поля, а определяется величиной отношения R/D . Кроме того погрешность практически не зависит от величины динамического диапазона измеряемого поля излучения и, соответственно, динамического диапазона восстановления ДЧ. Исследования проводились до уровней от -20 дБ до -60 дБ через -10 дБ.

неидеальности элементарных излучателей антенной решетки и измерительного зонда, не зависит от длины волны λ излучаемого поля, а определяется величиной отношения R/D . Кроме того погрешность практически не зависит от величины динамического диапазона измеряемого поля излучения и, соответственно, динамического диапазона восстановления ДЧ. Исследования проводились до уровней от -20 дБ до -60 дБ через -10 дБ.

Վ. Բ. ԿՈՒՆԵՆՈՎ, Ռ. Գ. ԶԱԿՈՒՅԱՆ

ԲԱՅՎԱՆՔԻ ԳՈՏՈՒՄ ՅԱԶԱՎՈՐՎԱՅ ԱՆՏԵՆԱՅԻՆ ՑԱՆՑԻ ԿՐԱՄԵՐԿԱԿԱՆ ԲԼՈՒԹԱԳՐԵՐԻ ԶԱՓԵՄԱՆ ԵՎԱԶԱԿՐԻՅՆ ՇՅՈՒԿՈՐՈՒԹՅԱՆ ՈՍՂՄԱՆՔԱԿՄԱՆ ԽՍՈՒՆ

Ա մ փ ո ֆ ո լ մ

Դիտարկված են անտեննային ցանցի բաղադրի զուտում չափված վերականգնված ուղղորդված դինամիկական դիսպրսիոն սխալները, որոնք պայմանավորված են ցանցի ճառագայթիչների և չափող զանգի ուղղիչ հատկություն-

ներով: Ստացված է չափող դինամիկական դիագրամի սխալի կախվածությունը անտեննային ցանցի և չափող զոնդի հեռավորությունից: Թվային արդյունքները ստացված են հաշվիչ մեքենայի վրա խնդրի մոդելավորման եղանակով:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. *Помомарев Н. Г.* Диаграммы направленности антенн с качающейся дугой.— *Радиотехника и электроника*, 1962, 7, с. 949—955.
2. *Арари Р. К., Азриэл В. Г.* Переходные процессы при скачкообразном фазировании антенных решеток.— *ТНМЭР*, 1974, 62, № 7, с. 192—193.
3. *Мартirosян С. М., Килешиев В. И.* Дольные токи антенно-решеточном дугой.— *Изв. АН АрмССР, Физика*, 1978, 13, с. 211—216.
4. *Мартirosян С. М., Килешиев В. И.* Промежуточные токи антенно-решеточном дугой.— *Изв. АН АрмССР, Физика*, 1980, 15, с. 168—173.
5. *Мирков Г. Т., Сизонов Л. М.* Антенны.— *М. Энергия*, 1975.— 528 с.
6. *Аддисберг А. Г.* Измерение в зоне Френеля диаграммы направленности антенных решеток методом фокусирования.— *Радиотехника*, 1976, т. 31, № 10, с. 35—40.