

КАПЛУН И. В., канд. техн. наук, МАТЫЦЫН Э. Н., канд. техн. наук,
УСИН В. А., канд. техн. наук, ХОЛЩЕВНИКОВ М. Ю.

ДИНАМИЧЕСКИЙ МЕТОД ЮСТИРОВКИ ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

Возрастающие требования к современным радиотехническим системам (РТС) выдвигают в ряд важнейших задачу обеспечения высокой точности юстировки антенных систем. Особую сложность эта задача приобретает при использовании в РТС крупноапертурных фазированных антенных решеток (ФАР), формирующих лучи с угловой шириной доли градуса.

Традиционные методы измерения характеристик наземных стационарных ФАР (радиоастрономический и облетный [1; 2]) связаны с большими затратами времени и средств, что затрудняет их практическое применение для оперативного контроля точностных характеристик ФАР в процессе эксплуатации. При радиоастрономическом методе это обусловлено жесткой привязкой времени измерений к моменту прохождения радиосточника в требуемом секторе углов, при облетном — длительностью подготовки летательных средств и зависимостью проведения измерений от погодных условий.

Указанные обстоятельства свидетельствуют о целесообразности применения оперативных методов измерения характеристик ФАР, к числу которых относится и динамический [3].

Проанализируем динамический метод юстировки фазированных антенных решеток, заключающийся в измерении и последующей обработке сигнала на выходе ФАР, облучаемой полем вспомогательной антенны, которая неподвижно установлена относительно стационарной ФАР, при изменении угла фазирования антенной решетки. Цель обработки — определение направления фазирования, соответствующего максимуму выходного сигнала.

Исследуем методику юстировки плоских ФАР в динамическом режиме и оценим ее точность. Ограничимся изучением линейной ФАР. Известно, что диаграмма направленности (ДН) ФАР без учета краевых эффектов (которыми можно пренебречь в многоэлементной антенне) записывается в виде

$$F_0(u, p) = f(u) \sum_n A_n e^{-i2\pi(u-p)x_n}, \quad (1)$$

где $f(u)$ — ДН излучателей; A_n — комплексные амплитуды возбуждения излучателей; $u = \sin \alpha$, α — угол наблюдения, отсчитываемый от нормали к ФАР; $p = \sin \beta$, β — угол фазирования (отсчитывается аналогично); x_n — координаты элементов ФАР. Здесь и далее все линейные размеры антенны отнесены к длине волны.

Юстировка ФАР заключается в измерении отклонения направления максимума ДН от направления фазирования решетки. Отклонения обусловлены прежде всего ошибками возбуждения излучателей*. Соответствующие выражения для положения направления главного максимума (НГМ) в случае малых фазовых ошибок возбуждения излучателей приведены в работе [4].

Если погрешности возбуждения не зависят от угла фазирования β , то, как видно из (1), ошибка установки луча, выраженная в обобщенной угловой координате, постоянна во всем секторе сканирования. Для определения этой ошибки и, следовательно, для юстировки антенны, измеряют сигнал на выходе ФАР одним из двух способов: при перемещении относительно нее вспомогательного источника — изменении параметра u в (1), что реализуется в радиоастрономическом и облетном методах; при облучении ее полем неподвижного источника ($u = u_0$) и изменении угла фазирования ФАР, т. е. изменении параметра v в (1). Ввиду того что параметры u, p одинаковым образом (с точностью до знака) входят в выражение (1), результаты юстировки идентичны. Различия, связанные с влиянием ДН излучателей $f(u)$ на результаты юстировки, весьма малы, так как положение максимума ДН ФАР определяется множителем решетки. Поэтому далее множитель $f(u)$ не учитываем. Режим измерений при фиксированном направлении фазирования ФАР и изменении углового положения внешнего источника назовем статическим, а режим, соответствующий изменению фазового распределения в раскрыве ФАР в случае постоянного положения внешнего источника, — динамическим.

Соотношение (1), из которого следует совпадение направления максимума ДН, найденного при измерениях в статическом и динамическом режимах, справедливо при использовании в составе решетки плавных фазовращателей, не имеющих ошибок (идеальное фазирование).

На практике чаще применяют дискретные фазовращатели. Рассмотрим особенности нахождения направления главного максимума (НГМ) при дискретном фазировании. Можно показать, что в этом случае ДН $F(u, p)$ записывается в виде

$$F(u, p) = \frac{\sin \Delta}{\Delta} F_0(u, p) + \sin \Delta \sum_{\substack{l=-\infty \\ l \neq 0}}^{\infty} \frac{e^{i\pi l}}{\Delta + \pi l} \times \\ \times \sum_n A_n e^{-i2\pi(u-p)x_n} e^{\frac{i\pi \xi(x_n)}{\Delta}} e^{\frac{i12\pi^2 x_n p}{\Delta}}, \quad (2)$$

где $2\Delta = \frac{2\pi}{t}$ — дискрет переключения фазы в фазовращателях (t — разрядность фазовращателей); $\xi(x_n)$ — начальное фазовое

* Отклонения максимума ДН могут обуславливаться также смещением элементов ФАР от заданных положений, однако данный фактор авторами не рассматривался.

распределение в раскрыве АР* (фаза возбуждения излучателей при одинаковом состоянии всех фазовращателей).

Начальное фазовое распределение $\xi(x_n)$ определено с точностью до фазовой постоянной φ_0 , $\xi(x_n) = \xi_0(x_n) + \varphi_0$, где φ_0 может быть произвольной величиной. Изменение φ_0 приводит, как следует из (2) (к флюктуациям ДН и к флюктуациям направления максимума ДН. Поэтому положение НГМ целесообразно находить по ДН, полученной усреднением по всем начальным фазовым распределениям φ_0 , равномерно размещенным в интервале $0 \dots 2\pi$.

Усредняя (2) по φ_0 , имеем

$$\overline{F(u, p)} = \frac{\sin \Delta}{\Delta} F_0(u, p), \quad (3)$$

т. е. ДН, полученные усреднением реализаций по фазовой постоянной φ_0 в статическом и в динамическом режимах одинаковы

и совпадают с точностью до постоянной $\frac{\sin \Delta}{\Delta}$ с ДН $F_0(u, p)$,

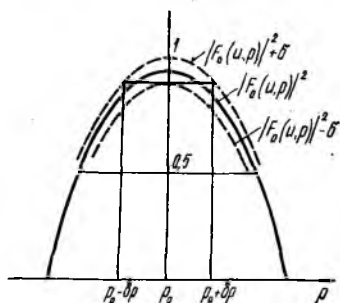
соответствующей применению плавных фазовращателей. Совпадают и направления главного максимума, полученных усреднением ДН по фазовой константе в статическом и динамическом режимах.

В области главного максимума дисперсия $\sigma^2(u, p)$ динамической ДН ($u = u_0 = \text{const}$) по мощности является практически постоянной $\sigma^2(u, p) = \sigma^2(u_0, p_0) = \sigma_0^2$, и НГМ, найденное по усредненной динамической ДН $|F(u, p)|^2$, совпадает с соответствующим значением, определенном в статическом режиме. Это справедливо и при юстировке, выполняемой по амплитудной ДН.

Таким образом, методика определения НГМ заключается в измерении ДН в динамическом режиме, усреднении результатов измерений по значениям φ_0 и нахождении направления максимума усредненной динамической ДН.

Однако на практике НГМ определяют либо по однократно измеренной динамической ДН, либо на основании измерений, усредненных по ограниченному числу N различных значений фазовой постоянной φ_0 . При конечном числе реализаций φ_0 НГМ получают с погрешностью. Оценим вначале погрешность юстировки при однократном измерении динамической ДН.

Как уже отмечалось, в области главного максимума можно считать дисперсию динамической ДН постоянной, т. е. полагать, что «коридор» между кривыми $|F_0(u, p)|^2 \pm \sigma(u, p)$ имеет постоянную ширину (рисунок). Аппроксимируем усредненную норми-



* Начальное фазовое распределение применяют, как правило, для «разрушения» коммутационных лепестков в ДН ФАР.

рованную динамическую ДН в области главного максимума параболой

$$|\overline{F(u, p)}|^2 = -\frac{2}{\mu^2}(p - p_0)^2 + 1. \quad (4)$$

Здесь p_0 — направление фазирования, соответствующее максимуму средней ДН; μ — ширина ДН по уровню половинной мощности.

Как видно из рисунка, дисперсия Ω^2 направления главного максимума, найденного по максимуму измерений динамической ДН, удовлетворяет условию $\Omega^2 \leq \delta p^2$, где δp находится как решение уравнения

$$|F_0(u, p_0 + \delta p)|^2 + \sigma_0 = 1 - \sigma_0. \quad (5)$$

Из (4), (5) окончательно имеем соотношение для определения дисперсии Ω^2 НГМ $\Omega^2 \leq \mu^2 \sigma_0$ (6). Входящая в него величина σ_0 рассчитывается непосредственно из (2) с учетом известного распределения комплексных амплитуд возбуждения ФАР A_n , начального фазового распределения $\xi(x_n)$ и дискрета 2Δ переключения фазы фазовращателями. Заметим, что если НГМ определяется усреднением N ДН, измеренных в динамическом режиме при различных фазовых константах φ_0 , то величина σ_0 в оценке (6) заменяется на σ_0/\sqrt{N} .

Рассмотренная методика юстировки, учитывающая только одно измеренное (максимальное) значение динамической ДН, не использует всей информации, получаемой при измерениях. Существенного увеличения точности юстировки, а также сокращения необходимого для достижения заданной точности числа измерений реализаций ДН можно достичь, если НГМ находить не по одному максимальному значению динамической ДН, а по максимуму некоторой функции, аппроксимирующей динамическую ДН.

Для аппроксимации динамической ДН в области максимума возьмем полином второй степени $y = \sum_{j=1}^3 a_j q_j$ (7), где $q_1 = q_2^2$, $q_2 = p$, $q_3 = 1$; a_j — коэффициенты полинома.

Коэффициенты a_j находят по M известным значениям полинома y_1, \dots, y_M ($M \geq 3$) решением линейных уравнений $Y = Q \cdot A$ (8), где $Y = \|y_m\|$ — матрица-столбец из M значений полинома; $Q = \|q_{m,j}\|$, $m = 1, \dots, M$, $j = 1, \dots, 3$ — матрица значения q_j ;

$A = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix}$ — матрица-столбец коэффициентов полинома.

При подстановке в (8) значений y_m , полученных при измерении реализации динамической ДН, система уравнений оказывается несовместной, поскольку, как правило, $M \gg 3$.

В этом случае коэффициенты аппроксимирующего полинома целесообразно рассчитывать методом наименьших квадратов, согласно которому они находятся из условия минимума суммы

$$R = \sum_{m=1}^M s_m \left(y_m - \sum_{j=1}^3 a_j q_{m,j} \right)^2. \quad (9)$$

Здесь

$$s_m = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma(p_m)}, \quad \sigma_{\max} = \max_m [\sigma(p_m)].$$

Минимум суммы (9) достигается при определении коэффициентов a_j по формуле $A = D^{-1} \cdot Q^T \cdot S \cdot Y$ (10), где $D = Q^T S \cdot Q$, S — диагональная квадратная матрица размера $M \times M$ с элементами s_m .

После вычисления коэффициентов полинома a_j значение направления фазирования p_{\max} , соответствующего максимуму средней динамической ДН, определяется, как следует из (7), по формуле

$$p_{\max} = -\frac{a_2}{2a_1}. \quad (11)$$

При получении соотношений (8)...(10) для коэффициентов a_j предполагалось, что флюктуации отсчетов y_m в реализации динамической ДН некоррелированы. Можно показать, что количество таких отсчетов в пределах ширины главного максимума по уровню половинной мощности составляет примерно $\pi/2\Delta$. Это

и обуславливает наиболее целесообразный шаг $\Delta p = \frac{\mu\Delta}{\pi}$ изменения углов фазирования при измерении ДН в динамическом режиме для получения коэффициентов a_j аппроксимирующего полинома. Статистические характеристики направления главного максимума p_{\max} , найденного по аппроксимирующему полиному, определяются статистическими характеристиками коэффициентов данного полинома. Оцениваем дисперсию σ_p^2 величин p_{\max} , полагая, что дисперсия σ^2 динамической ДН постоянна в области главного максимума и мала $\sigma^2 \ll 1$. Тогда $\left| \frac{\Delta a_j}{a_j} \right| \ll 1$, где $\Delta a_j = a_j - \bar{a}_j$, $j=1, 2$.

Из формулы (11) с точностью до членов второго порядка малости относительно $\frac{\Delta a_j}{a_j}$ имеем

$$p_{\max} = -\frac{\bar{a}_2}{2\bar{a}_1} + \frac{\Delta a_2}{2\bar{a}_1} - \frac{\bar{a}_2 \Delta a_1}{2\bar{a}_1^2}. \quad (12)$$

Выберем начало отсчета углов фазирования p таким образом, чтобы $\bar{a}_2 = 0$. Тогда $p_{\max} = 0$.

Из выражения (12) получим

$$p_{\max} = \frac{\Delta a_2}{2\bar{a}_1}; \quad \sigma_p = \frac{\sigma_{a_2}}{2\bar{a}_1}, \quad (13)$$

где $\sigma_{a_2}^2$ — дисперсия коэффициента a_2 ,

$$\sigma_{a_2}^2 = \frac{\sigma^2}{\frac{1}{15} M_1 (M_1 + 1) (2M_1 + 1) \Delta\rho} \quad (14)$$

Здесь $2M_1 + 1 = M$ — число измерений; $\Delta\rho = \frac{\mu}{M}$ — шаг изменения углов фазирования при измерении динамической ДН в интервале углов, соответствующих ширине главного лепестка исследуемой ДН. Подставляя (14) в (13), записываем

$$\sigma_p = \frac{2\sigma}{\sqrt{M}} \cdot \mu. \quad (15)$$

Итак, среднее значение НГМ, найденное по аппроксимирующей кривой, совпадает с направлением максимума средней динамической ДН, а его дисперсия пропорциональна дисперсии динамической ДН в области максимума и обратно пропорциональна числу M независимых отсчетов динамической ДН.

Точность юстировки можно повысить, определив направление главного максимума по аппроксимирующему полиному при одновременном усреднении по результатам измерений с различной фазовой постоянной φ_0 . Тогда значение M в формуле (15) заменяется на произведение $M \cdot N$, где N — число измерений динамической ДН с различными постоянными φ_0 .

Предложенную методику юстировки ФАР можно обобщить для случая измерения характеристик двумерных ФАР.

Рассматривалась методика юстировки антенны в дальней зоне. Юстировка крупноапертурных ФАР, дальняя зона которых значительно удалена от антенны, проводится аналогично и на более близких расстояниях при сочетании динамического метода юстировки с методом фокусирования.

Список литературы: 1. Цейтлин Н. М. Антенная техника и радиоастрономия. М., 1976. 352 с. 2. Фрадин А. З., Рыжков Е. В. Измерение параметров антенно-фидерных устройств. М., 1972. 352 с. 3. Курочкин А. П. Состояние и перспективы развития методов измерений внешних параметров антенн//Антенны. М., 1982. С. 46—65. 4. Шифрин Я. С. Вопросы статистической теории антенн. М., 1970. 384 с.

Поступила в редколлегию 29.03.86