

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ АНТЕНН ПО ОБРАЗЦОВЫМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМ ШУМОВЫМ ИЗЛУЧАТЕЛЯМ С ШИРОКОЙ АПЕРТУРОЙ

Измерение параметров антенно-фидерных устройств (АФУ) проводится с помощью монохроматических источников либо с помощью шумовых излучателей. Для антенн, предназначенных для приема шумоподобных сигналов или работающих в широкой полосе частот, предпочтителен второй метод.

Широкое распространение получили методы измерения АФУ с помощью «черных» дисков [1, 3], где в качестве шумового излучателя используется диск из поглощающего материала, который находится при T_0 . При этом вклад в суммарную антенную температуру за счет приема излучения по боковым и задним лепесткам, фоновой температуры в главном лепестке, а также вследствие дифракционных явлений становится соизмеримым с сигналом от эталонного излучателя. Можно уменьшить влияние перечисленных факторов и тем самым повысить точность измерения параметров АФУ, повысив шумовую температуру эталонного излучателя.

Ниже рассматриваются некоторые вопросы измерения параметров антенн с помощью «горячих» широкоапертурных излучателей (термин «горячий» излучатель применим по аналогии с термином «горячая» нагрузка). С помощью «горячих» излучателей могут быть измерены почти все энергетические характеристики антенн за исключением фазовых.

Измерение параметров антенн в дальней зоне

Нормированная диаграмма направленности (ДН) измеряется по отношению

$$\frac{\Delta T_a}{\Delta T_{a \text{ макс}}} = \frac{F(\varphi - \varphi_0; \theta - \theta_0)}{F(\varphi_0, \theta_0)}, \quad (1)$$

где ΔT_a — приращение температуры антенны при приеме излучения источника относительно направления главного лепестка;

$\Delta T_{a \text{ макс}}$ — максимальное приращение температуры антенны в направлении главного лепестка.

Использование «горячих» широкоапертурных излучателей для измерения ДН антенн весьма перспективно ибо, как отмечено в [1], «использование внеземных источников позволяет достаточно надежно измерить лишь главный и ближайšie к нему боковые лепестки диаграммы, что обусловлено неоднородностью фона и малой величиной сигнала».

Если температура излучателя имеет величину 10^4 — 10^5 К, [4, 5] и выполняется условие $\Omega_{\text{ист}} \ll \Omega_{\text{гл}}$, то при современной радиометрической аппаратуре не составляет особой сложности измерить лепестки с уровнем -40 дБ. Такие измерения сравнительно просто проводить для малоапертурных антенн, у которых зона Фраунгофера расположена достаточно близко. Однако измерения ДН антенн с зонами Фраунгофера в несколько десятков километров должны сопровождаться выносом облучателя из фокуса либо проводиться по внеземным источникам.

Коэффициент усиления (КУ) антенны в направлении главного лепестка выражается известной формулой:

$$G(\varphi_0, \theta_0) = D(\varphi_0, \theta_0) \eta = \frac{4\pi F(\varphi_0, \theta_0)}{\int_{4\pi} F(\varphi, \theta) d\Omega} \eta, \quad (2)$$

где $D(\varphi_0, \theta_0)$ — коэффициент направленного действия (КНД) антенны;

η — к. п. д. антенны.

В [1] показано, что

$$T_a = [T_{\text{гл}}(1 - \beta_{\text{гл}}) + T_6 \beta_6 + T_3 \beta_3] \eta + T_0(1 - \eta),$$

а также $T_{\text{гл}} = \frac{\int T F d\Omega}{\int_{\Omega_{\text{гл}}} F d\Omega}$. Учитывая это, можно записать

$$T_a = \frac{G}{4\pi} \int_{\Omega_{\text{изл}}} T_{\text{изл}} d\Omega + \frac{G}{4\pi F_{\text{макс}} \Omega_{\text{гл}} - \Omega_{\text{изл}}} \int T_{\text{ф.гл}} d\Omega + T_6 \beta_6 \eta + T_0(1 - \eta), \quad (3)$$

где $T_{\text{изл}}$ — шумовая температура излучателя;

$T_{\text{ф.гл}}$ — шумовая температура фона в направлении главного лепестка;

T_6 — шумовая температура в направлении боковых лепестков;

$\beta_{\text{гл}} = \beta_6 + \beta_3$ — коэффициенты рассеяния в боковые и задние лепестки.

Первое слагаемое в (3) представляет собой вклад в суммарную температуру за счет излучения собственно излучателя, второе — вклад фоновой температуры излучения, попадающего в главный лепесток вне телесного угла, занимаемого излучателем; третье — излучение, попадающее в антенну по боковым лепесткам; четвертое — шумы антенны за счет собственных потерь.

При измерении с помощью излучателя с малыми угловыми размерами выражение (3) принимает вид

$$T_a = \frac{G \cdot T_{изл}}{4\pi} \Omega_{изл} + T_{ф. гл} (1 - \beta_{гл}) \eta. \quad (4)$$

Вкладом боковых лепестков пренебрегаем, поскольку он будет в $D_{гл}$ ослаблен по сравнению с фоном, попадающим в главный лепесток. Если используется излучатель, у которого $T_{изл} = 10^4 - 10^5 K$, то можно выполнить условие, что шумовая мощность в главный лепесток от излучателя будет значительно больше, чем вклад фоновой температуры, тогда вторым слагаемым можно пренебречь и

$$G = \frac{4\pi T_a}{\Omega_{изл} T_{изл}}. \quad (5)$$

Измерение коэффициента полезного действия и коэффициента рассеяния антенн

Наибольшую точность измерения к.п.д. АФУ обеспечивает метод «черных» дисков [1, 2]. В [1] показано, что с учетом дифракционных эффектов в результате пересечения Земли совместной ДН системы антенна—диск, приращение температуры антенны

$$\Delta T_a = (T_0 - T_{ср} \Omega_{изл}) (1 - \beta_{изл}) \eta + (T_0 - T_{ср.в}) \alpha \eta, \quad (6)$$

где $T_{ср. \Omega_{изл}}$ — температура фона, экранируемого диском;
 $\beta_{изл}$ — коэффициент рассеяния вне телесного угла, за-
 нимаемого диском;

$T_{ср.в}$ — шумовая температура атмосферы и космоса в верхнем полупространстве дифракционной диаграммы;

α — доля мощности, поглощенная Землей при дифракции на диске.

Из (6) видно, что приращение температуры в антенне при малом α обусловлено разностью шумовой температуры диска и фона.

Чтобы это приращение было существенным, нужно диски делать больших размеров и всячески уменьшать $T_{ср. \Omega_{изл}}$. При дальнейших оценках делается ряд допущений, что $T_{ср. \Omega_{изл}} = T_{ср. в.}$ и $T_{ср. \Omega_{изл}} \ll T_0$, которые не всегда выполняются, особенно в лабораторных условиях. Даже при выполнении всех условий погрешность измерения «эквивалентного» к.п.д. $\eta' = \eta(1 - \beta_{гл})$ и коэффициента рассеяния антенны составляет 10% [1].

Уменьшить указанную погрешность можно применяя «черные» излучатели с высокой эквивалентной шумовой температурой. При этом, если $T_{изл.} \gg T_0$, то из формулы (6) следует

$$(1 - \beta_{изл}) \eta = \frac{T_a}{T_{изл}}. \quad (7)$$

Если излучатель полностью перекрывает главный лепесток ДН антенны, тогда выражение (7) будет иметь вид

$$\eta' = (1 - \beta_{г.л.}) \eta = \frac{T_a}{T_{изл.}} \quad (8)$$

В этом случае разность $T_{изл.} - T_{окр}$ практически равна $T_{изл.}$, поскольку $T_{окр} \ll T_0$. По этой же причине вкладом в боковые и задние лепестки пренебрегаем.

Если измерить η методом зеркального отражения или по собственным шумам, то по известному $\beta_{изл.}$ можно определить коэффициент рассеяния относительно любого телесного угла:

$$1 - \beta_{\Omega} = (1 - \beta_{изл.}) \frac{\int_0^{\theta_0} F \sin \theta d\theta}{\int_0^{\theta_{изл.}} F \sin \theta d\theta} \quad (9)$$

Измерение параметров антенн в зоне Френеля и в зоне индукции

Оценка распределения мощности в зоне Френеля и, в зоне индукции была проведена в работах [1, 3]. В [3] показано, что мощность, излученная антенной в зоне Френеля, распределяется следующим образом:

$$F(U, V) = \int_{-1}^1 A(\eta) A^*(\mu) \exp \left[1(\mu - \eta)U + i \frac{4\pi}{V} (\eta^2 - \mu^2) d\eta d\mu \right] \quad (10)$$

Здесь $A(\eta)$, $A^*(\mu)$ — потенциалы, определяющие поле в раскрыве; параметр U характеризует угловую зависимость функции $F(U, V)$; параметр V — удаление точки наблюдения от раскрыва антенны. Функция (10) не зависит от размеров антенны и носит универсальный характер, как и диаграмма направленности.

Электродинамический анализ, проведенный в [3], позволяет находить поправочный коэффициент при расположении излучателя в зоне Френеля или индукции в зависимости от расстояния до антенны и угловых размеров излучателя.

Если в раскрыве антенны создать квадратичный фазовый набег, т. е. должно получиться распределение вида $A(\eta) \exp - i 4\pi \frac{\eta^2}{4V}$ (см. 10), то можно сфокусировать антенну на конечном расстоянии от раскрыва, причем распределение поля в фокусе будет таким же, как и в дальней зоне, что является важным свойством в зоне Френеля.

При расположении излучателя с размерами $l \geq 2D$ в зоне индукции черный излучатель будет поглощать всю мощность,

поступающую в переднее полупространство антенны. Антенная температура в этом случае

$$T_a = T_{\text{изл}} (1 - \beta_3) \eta. \quad (11)$$

Если принять специальные меры для уменьшения β_3 или пренебречь им, можно найти

$$\eta = \frac{T_a}{T_{\text{изл}}}. \quad (12)$$

Сочетая этот метод с измерениями в дальней зоне, можно раздельно найти β_3 и β_n . Этот способ удобен для исследования небольших антенн.

Применение метода черного излучателя совместно с методом выноса облучателя из фокуса позволяет провести измерения ДН и КУ.

При выносе облучателя на расстояние $\Delta = \frac{f^2}{r_0} \left(1 + \frac{D^2}{16f^2}\right)$ происходит фокусирование поля антенны на расстоянии $r_0 = \frac{D^2}{n\lambda}$, $n = 10 \div 20$, т. е. во Френелевой зоне. Погрешность измерения КУ в этой точке составляет 2% по сравнению с измерениями, проведенными в дальней зоне [6].

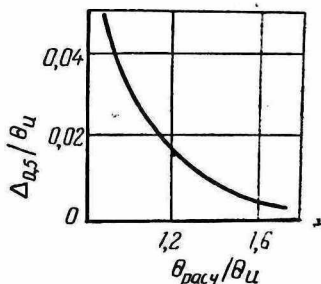
Измеряя параметры сфокусированных антенн, следует учитывать, что за фокусом лучи расходятся и возможно попадание излучения фона в расходящийся пучок. Если же применяются «горячие» излучатели, относительная величина этого вклада невелика.

Погрешности измерений параметров антенн

по высокотемпературным излучателям с широкой апертурой

На погрешность измерения диаграммы направленности влияют ряд факторов.

Во-первых, измеренная ДН может быть искажена при измерениях по излучателю; угловые размеры которого соизмеримы с угловыми размерами главного лепестка. В этом случае должна быть решена задача определения $F(\varphi, \theta)$ по измеренной величине $\int_{\Omega_{\text{ист}}} F(\varphi, \theta) T(\varphi, \theta) d\Omega$. Эта задача аналогична задаче о восстановлении истинного распределения температуры источника по измеренному [7, 8]. Так, на рисунке приведены данные об относительном уширении лепестка в зависимости от относительных угловых размеров источника. Из рисунка видно, что если угловые размеры источника равны угловым размерам ДН, то поправка на



уширение составит 3%. Если угловые размеры источника в два и более раз меньше угловых размеров ДН, систематическая погрешность измеренной ДН составит менее 0,5% и ею можно пренебречь.

Во-вторых, существует предел уровня боковых лепестков, который может быть измерен, определяемый чувствительностью аппаратуры и эквивалентной шумовой температурой излучателя. Считая распределение температуры по источнику равномерным, запишем выражение для максимального приращения температуры антенны:

$$\Delta T_{a \text{ макс}} = \sigma_{\text{эфф}} \eta \frac{T_{\text{ист}}}{\lambda^2}.$$

Если $\Delta T_{a \text{ макс}}$ составляет $1/3 T_{\text{ист}}$, то при $T_{\text{ист}} = 10^5 \text{ K}$ приращение $\Delta T_a = 3 \cdot 10^4 \text{ K}$. При пороговой чувствительности аппаратуры 2К могут быть измерены лепестки с уровнем ниже -40 дБ .

В-третьих, следует отметить возможные искажения дальних лепестков вследствие некогерентности излучения, приходящего к ближнему и дальнему концу раскрыва в случае применения широкополосной аппаратуры [9]. Эти искажения имеют место, если $D \sin(\varphi - \varphi_0) > \frac{c}{\Delta f}$. Наконец, при использовании в качестве источников неполяризованных шумовых излучателей могут быть искажения ДН ввиду кросс-поляризации, приводящие к тому, что первые минимумы боковых лепестков будут несколько сглажены [10]. Эффект кросс-поляризации устраняется применением широкоапертурного излучателя на полупроводниковых генераторах шума [5], дающего поляризованное излучение, или при использовании поляризационных аттенуаторов квазиоптического типа.

Погрешность измерений КУ, «эквивалентного» к. п. д., и коэффициента рассеяния с помощью «горячих» излучателей складываются из таких составляющих: 1) погрешности измерения телесного угла $\delta\Omega$, 2) погрешности измерения антенной температуры δT_a , 3) погрешности воспроизведения шумовой температуры образцовым излучателем $\delta T_{\text{изл}}$, 4) погрешности измерения к. п. д. по собственному излучению $\delta\eta$; 5) погрешности графического интегрирования диаграммы направленности δK , где $K = \frac{\int_0^{\theta_{\text{изл}}} F_{\text{sin}} \theta d\theta}{\int_0^{\theta_{\text{изл}}} F_{\text{sin}} \theta d\theta}$, 6) весьма малой систематической погрешности из-за пренебрежения вкладом боковых лепестков. Максимальные значения составляющих и среднеквадратические погрешности приведены в таблице.

Погрешность измерения КУ в зоне Френеля при выносе облучателя из фокуса ухудшается на 2% по сравнению с измерениями, проведенными в дальней зоне [6].

Погрешность	Формула	Значение
δ_1	$\frac{\Delta Q}{Q}$	0,01
δ_2	$\frac{\Delta T_a}{T_a}$	0,01
δ_3	$\frac{\Delta T_{изл}}{T_{изл}}$	0,04
δ_4	$\frac{\Delta \eta}{\eta}$	0,05
δ_5	$\frac{\Delta K}{K}$	0,05
$\delta_{\Sigma G}$	$(\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2)^{1/2}$	0,05
$\delta_{\Sigma \eta'}$	$(\delta_1^2 + \delta_3^2)^{1/2}$	0,04
$\delta_{\Sigma \beta}$	$(\delta_2^2 + \delta_3^2 + \delta_4^2 + \delta_5^2)^{1/2}$	0,07

Таким образом, применение высокотемпературных образцовых шумовых излучателей с широкой апертурой для измерения основных параметров антенн позволяет существенно повысить точность измерений, снизив при этом требования к чувствительности приемной аппаратуры. Метрологический анализ показал, что погрешность измерения КУ антенн не превышает 5%, «эквивалентного» к.п.д. $\eta' = \eta(1 - \beta)$ — 4%, коэффициента рассеяния антенны относительно какого-либо телесного угла — 7%. Измерение ДН возможно до уровня боковых лепестков — 40 дБ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цейтлин Н. М. Применение методов радиоастрономии в антенной технике. М., «Сов. радио», 1966. 213 с.
2. Иосельсон Г. Л., Кандыба В. В., Ландер В. А. К вопросу о создании СВЧ-эталонов высоких плазменных температур.—«Метрология», 1972, № 8, с. 3—14.
3. Захарьев Л. Н., Леманский А. А. Рассеяние волн черными телами. М., «Сов. радио», 1972. 286 с.
4. Иосельсон Г. Л., Кандыба В. В., Ландер В. А. — В кн. «Тезисы докладов Укр. респ. научн.-техн. конф., посвящ. 50-летию метрологической службы УССР», 1972. 58 с.
5. Ландер В. А. Высокотемпературный излучатель СВЧ.—«Метрология», 1972, № 9, с. 39—44.
6. Есепкина Н. А.—ДАН СССР, 1957, т. 113, № 1, с. 24—41.
7. Bracewell. Radioastronomy Techniques. Handbuch der Physik. LIV, 1962, p. 225.
8. Кузьмин А. Д., Саломонович А. Е. Радиоастрономические методы измерения параметров антенн. М., «Сов. радио», 1964. 195 с.
9. Wheeler M. S. Proc. IRE, 1960, vol. 48, N 6, p. 1170—1176.
10. Кинбер Б. Е. Влияние кросс-поляризации на ДН антенн.—«Радиотехника и электроника», 1969, т. 5, с. 720—728.