

УДК 53.089.6

КАЛИБРОВКА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ АНТЕНН НА БЛИЗКИХ РАССТОЯНИЯХ

С.А. Колотыгин

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.
lab202@vniiftri.ru

Описывается процедура калибровки антенн с минимальной погрешностью измерений. Выводятся соотношения для калибровки (поверки) антенн методом эталонной антенны с учётом их фазовых центров. Указывается на возможность использования нормирования параметров антенн как по коэффициенту усиления, так и по эффективной площади. Приводится схема калибровки антенн.

The procedure for calibrating antennas with a minimum measurement error is described. The relationships for calibration (verification) of antennas by the reference antenna method with regard to their phase centers are derived. The possibility of using the rationing of the antenna parameters both by the gain and the effective area is indicated. An antenna calibration scheme is provided.

Ключевые слова: измерительные антенны, апертура антенн, коэффициент усиления, коэффициент передачи, центр излучения, амплитуда и фаза поля, расстояние между антеннами, методы калибровки.

Key words: measuring antennas, antenna aperture, gain, transmission coefficient, center of radiation, field amplitude and phase, distance between antennas, calibration methods.

Наиболее общее определение назначения антенн приведено в [1]: «Антенны служат для перераспределения в пространстве излученной мощности с целью увеличения её плотности потока в требуемом направлении. Приёмные антенны соответствующим образом перераспределяют чувствительность приёмника относительно направлений, с которых поступают на антенну потоки мощности, излучаемые удалёнными источниками».

Для измерительных антенн нормируют значения коэффициента усиления и КСВН выхода. При этом под коэффициентом усиления, как правило, понимается значение коэффициента усиления в дальней зоне излучения. Существует часть измерительных антенн, предназначенных для проведения измерений в соответствии со стандартами по электромагнитной совместимости, для которых коэффициент усиления нормируется на определённых расстояниях. Как правило, это 1 метр, 3 метра и 10 метров. Эталонные антенны, используемые при калибровке рабочих СИ, должны обеспечивать возможность калибровки по коэффициенту усиления для всех указанных расстояний. Отсутствие информации о поправках на близость или о положении центров излучения антенн приводит к существенному увеличению нормируемых пределов допускаемых погрешностей рабочих измерительных антенн.

Для измерений коэффициента усиления антенн используют формулу Фриса, которая определяет связь коэффициентов усиления антенн с коэффициентом передачи между антеннами.

Для двух антенн, разнесённых на расстояние R , справедлива формула:

$$G_{\text{ИА}} G_{\text{ПА}} = \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2 \frac{P_{\text{ПН}}}{P_{\text{ГН}}} \frac{|1 - \Gamma_{\text{ПА}} \Gamma_{\text{Н}}|^2 |1 - \Gamma_{\text{ИА}} \Gamma_{\text{Г}}|^2}{(1 - |\Gamma_{\text{ПА}}|^2)(1 - |\Gamma_{\text{ИА}}|^2) |1 - \Gamma_{\text{Г}} \Gamma_{\text{Н}}|^2}, \quad (1)$$

где $G_{\text{ИА}}$ — коэффициент усиления излучающей антенны;

$G_{\text{ПА}}$ — коэффициент усиления приёмной антенны;

λ — длина волны;

R — расстояние между апертурами антенн;

$P_{\text{ПН}}$ — мощность выхода приёмной антенны;

$P_{\text{ГН}}$ — мощность на входе излучающей антенны;

$\Gamma_{\text{ПА}}$ — коэффициент отражения приёмной антенны;

$\Gamma_{\text{ИА}}$ — коэффициент излучающей антенны;

$\Gamma_{\text{Г}}$ — коэффициент отражения генератора;

$\Gamma_{\text{Н}}$ — коэффициент отражения измерителя мощности.

Эта формула основана на теореме взаимности для антенн, из которой следует, что излучающие свойства антенны можно определять, используя её в качестве приёмной антенны. Как отмечено в [5], теорема взаимности справедлива для антенн независимо от расстояния между антеннами, т.е. также и для ближнего поля. Большинство антенн СВЧ можно рассматривать как поверхностные излучатели, в которых поле излучения рассчитывается по распределению тока или поля на поверхности, лежащей в ближнем поле антенны. В [2] дано наглядное представление формирования поля излучения антенны как решение о дифракции поля плоской волны на отверстии в бесконечной плоскости. При этом рассматриваются три зоны:

- первая зона ближнего поля, ещё называемая областью прожекторного луча, где распределение поля незначительно зависит от расстояния от апертуры антенны;
- вторая зона — зона Френеля, где структура поля сложная и выражается через интегралы Френеля, амплитуда и фаза поля осциллируют. Здесь происходит взаимодействие рассеивающейся плоской волны с дифрагированными волнами на краях отверстия;
- третья зона — зона Фраунгофера, или дальняя зона, где сформирована сферическая волна, угловое распределение поля на окружности некоторого радиуса не зависит от длины этого радиуса, и напряжённость электромагнитного поля зависит только от расстояния до антенны. В этой зоне произведение коэффициентов усиления в формуле (1) не зависит от расстояния от излучающей антенны.

Калибровка измерительных антенн проводится, как правило, двумя методами: методом трёх антенн или методом эталонной антенны. В том и другом случаях предполагается проведение измерений в дальней зоне. Условие дальней зоны в большинстве документов, разрабатываемых в последнее время, устанавливается следующим соотношением:

$$R \geq \frac{2D^2}{\lambda}, \quad (2)$$

где R — расстояние между антеннами;
 D — максимальный размер апертуры антенн;
 λ — длина волны.

Выражение (2) во всех книгах по антеннам, например [1, 2], рассматривается для поля излучения апертурной антенны с синфазным распределением напряжённости электрического поля на поверхности апертуры антенны. Рассматривается напряжённость электрического поля, формируемая такой антенной поля на расстоянии R от антенны, измеряемой антенной с размерами много меньше излучающей антенны (слабонаправленная антенна). Отмечается, что при отклонении фазы принимаемого сигнала, излучаемого от края антенны от сигнала, излучаемого от центра антенны, не превышающей $22,5^\circ$, ошибка в определении коэффициента усиления не превысит 5 %. Только для такого случая и появилось соотношение (2).

Для антенн с разными размерами апертур этот вопрос подробно рассмотрен в книге [2]. Если вспомогательная антенна имеет линейные размеры, сравнимые с размерами калибруемой антенны, следует отдельно определять суммарную ошибку (зависимость коэффициента усиления от расстояния). Для таких антенн в [2] приведена следующая формула для R_{\min} :

$$R_{\min} = 5 \frac{D_{\text{изл}} D_{\text{иссл}}}{\lambda}, \quad (3)$$

где $D_{\text{изл}}$ — максимальный размер апертуры излучающей антенны;
 $D_{\text{иссл}}$ — максимальный размер апертуры исследуемой (приёмной) антенны.

В методиках поверки измерительных рупорных антенн, разработанных до 1980 г., встречаются условия дальней зоны в следующем виде:

$$R_{\min} = 2 \frac{(D_{\text{изл}} + D_{\text{иссл}})^2}{\lambda}. \quad (4)$$

Если антенны возбуждаются полем в раскрыве, сильно отличающемся от синфазного, то это расстояние может оказаться гораздо больше, чем указано в формулах (2) и (3).

Сферический волновой фронт излучает идеализированный точечный изотропный источник [2]. Для антенн с линейным раскрывом с постоянным амплитудным и линейным фазовым распределением в пределах каждого ле-

пестка амплитудной диаграммы значение фазы также представляет константу, скачком отличающуюся от лепестка к лепестку на π .

С точностью до указанных скачков фазовая характеристика во всём секторе углов постоянна, и фазовый центр у неё совпадает с физическим центром раскрыва.

Реальные антенны, как правило, фазового центра не имеют, но при этом всегда можно [2] определить положение «эффективного» фазового центра для ограниченного участка волнового фронта излучаемого антенной поля. Иногда эффективный фазовый центр называют «центром излучения» антенны.

Если в формуле (1) для расчёта коэффициента усиления вместо расстояния между апертурами антенн R подставлять расстояние между фазовыми центрами $R + 2\text{ФЦ}$, условие дальней зоны можно сократить до значений меньших, чем в формуле (1).

Иллюстрацией к сказанному выше являются результаты измерений среднего значения коэффициента усиления двух антенн $G_{ij} = \sqrt{G_i G_j}$ в зависимости от расстояния между антеннами, представленные на рис. 1 и 2.

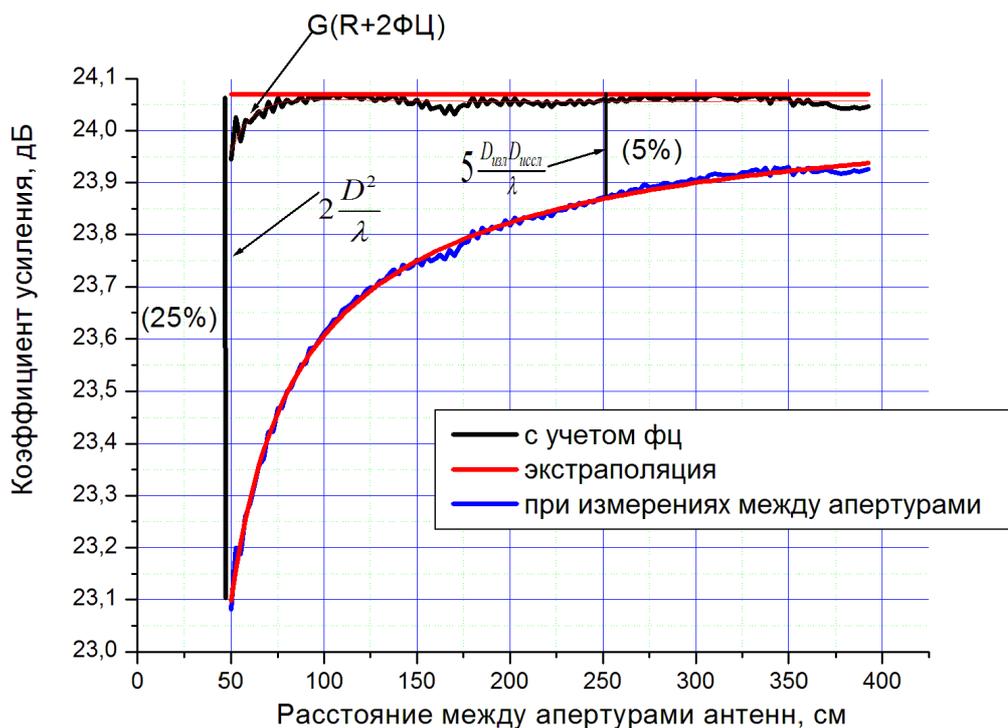


Рис. 1. Коэффициент усиления антенны П6-69/Э

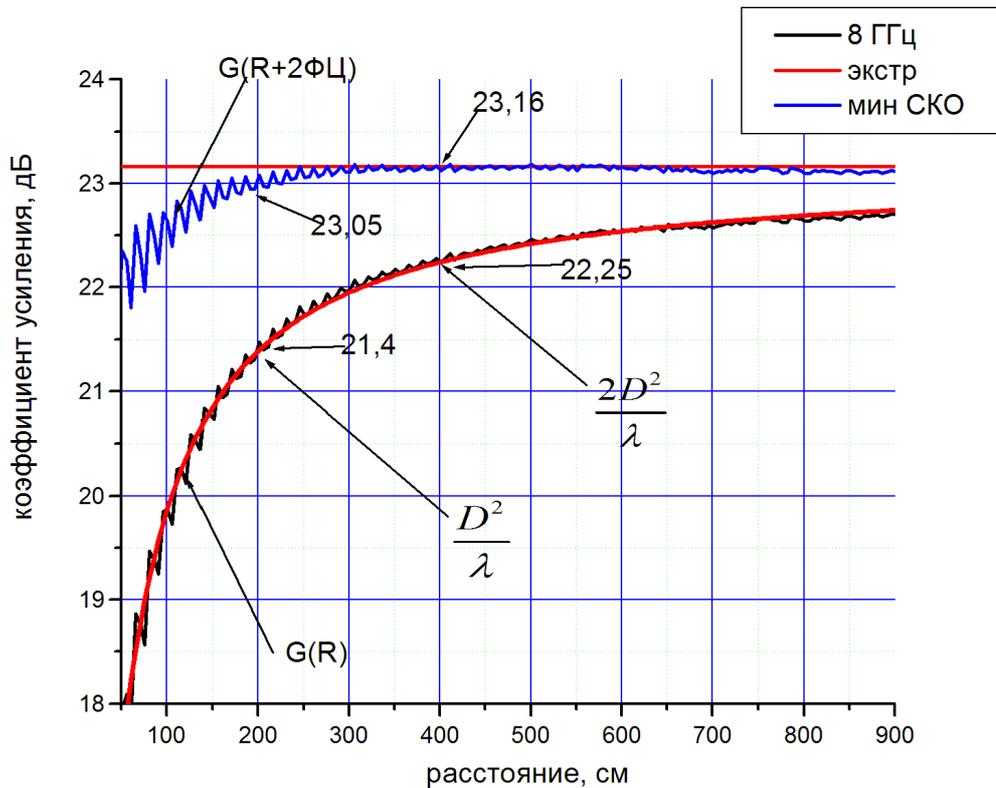


Рис. 2. Коэффициент усиления антенны П6-23М

На этих рисунках представлены результаты измерений коэффициента усиления в зависимости от расстояния между антеннами для антенны П6-69/Э (рис. 1) на частоте 39 ГГц и для антенны П6-23М на частоте 8 ГГц. Антенна П6-69/Э — это стандартный рупор с размерами апертуры 61×34 мм, антенна П6-23М — это двухгребневый рупор с линзой и с размерами апертуры 340×260 мм.

Хотя антенны сильно отличаются как конструкцией, так и линейными размерами, характер кривых на рисунках одинаков. Из анализа этих кривых видно, что при проведении измерений на расстояниях

$$R = \frac{2D^2}{\lambda} \tag{5}$$

поправка на близость превышает значение в 1 дБ (25 %) и снижается до значений 0,2 дБ (5 %) и менее на расстояниях между антеннами, соответствующими формуле (3), что соответствует выводам, приведённым в [2].

Определение значений коэффициента усиления в дальней зоне по результатам измерения в зоне Френеля в большинстве национальных метрологиче-

ских институтов выполняется методом экстраполяции [6], что подтверждается результатами ключевых сличений коэффициентов усиления антенн [7]. В отличие от метода, описанного в [6], полином по степеням $(1/R)$ удобнее вписывать в результат расчёта по формуле (1) для значений $G_{ij}(R)$. Значение $G_{ij}(\infty) = P_{0i}$ определяется по формулам:

$$G_{ij}(R) = P_{03} + \frac{P1}{R} + \frac{P2}{R^2} + \frac{P3}{R^3} \quad \text{или} \quad G_{ij}(R) = P_{02} + \frac{P1}{R} + \frac{P2}{R^2}. \quad (6)$$

Использование двух полиномов второй и третьей степени позволяет произвести оценку погрешности результата экстраполяции по формуле:

$$\delta G_{ij}(\infty) = \left| \frac{P_{03} - P_{02}}{2} \right|. \quad (7)$$

На рисунках 1 и 2 красными линиями проведены результаты расчёта по формулам (6). Горизонтальные линии — это результат расчёта коэффициента усиления в дальней зоне $G_{ij}(\infty)$. Кривая $G(R + 2\PhiЦ)$ получена по формуле (1), когда для расчёта коэффициента усиления вместо расстояния между апертурами антенн R подбирали значения расстояния до фазовых центров антенн $R + 2\PhiЦ$ таким образом, чтобы получить минимальное значение среднеквадратического отклонения $G_{ij}(R + 2\PhiЦ)$ от значения коэффициента усиления, полученного методом экстраполяции.

Из анализа этих кривых видно, что при проведении измерений на расстояниях в соответствии с формулой (5) поправка на близость превышает значение в 1 дБ (25 %) и снижается до значений 0,2 дБ (5 %) и менее на расстояниях между антеннами, соответствующими формуле (3), что соответствует выводам, приведённым в [2].

Иллюстрация по определению положения фазовых центров приведена на рис. 3 для результатов измерений коэффициента усиления логопериодической антенны. Для логопериодических антенн фазовые центры, очевидно, определяются по положению диполей, которые на частоте измерений находятся в резонансе. Измерение коэффициента передачи для последующего расчёта коэффициента усиления проводилось при измерении расстояния между концами логопериодических антенн. На рисунке это нижняя кривая. После этого в формулу (1) подставляли значения расстояний с учётом предполагаемого положения фазового центра. Слева в скобках указаны значения расстояний до фазового центра. Для всех указанных кривых рассчитывались экстраполяционные значения в дальней зоне, и все они имели одно и то же значение 8,95. Видно, что кривая с расстоянием 45 см наиболее близко расположена к результату экстраполяции. При этом значение измеренного коэффициента усиления наиболее близко к константе. Над значениями в скобках указаны значения среднеквадратического отклонения от значения усиления в дальней зоне, рассчитанного для расстояний от 50 до 250 см.

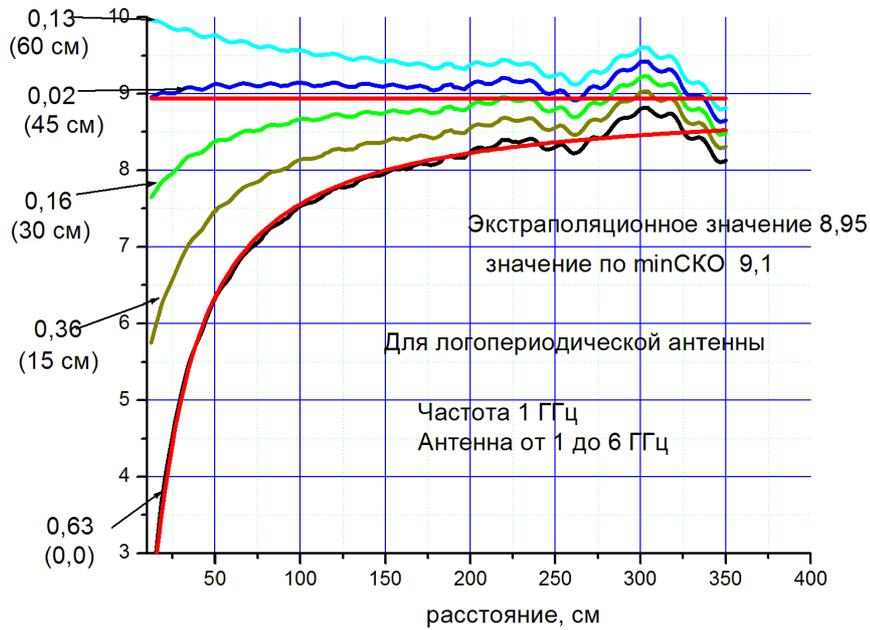


Рис. 3. Расчёт расстояния от края антенны до центра излучения

Для наиболее широко применяемых антенн в диапазоне частот П6 = 23М, П6-59 измеренные положения центров излучения в зависимости от частоты приведены на рис. 4.

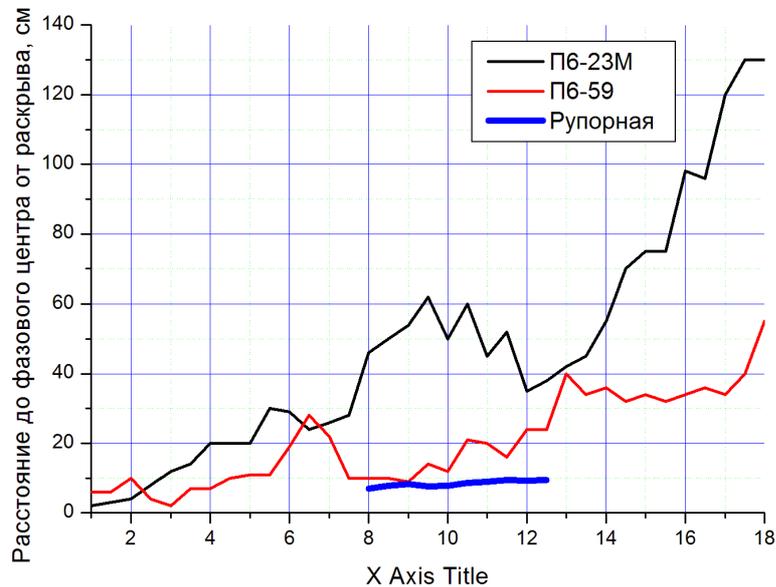


Рис. 4.

Видно, что эти расстояния весьма значительны относительно размеров антенн П6-23М и П6-59. На частотах больше 16 ГГц центры излучений смещаются практически до выходного разъёма антенн.

Описанная процедура калибровки антенн с минимальной неопределённостью измерений предполагает наличие специального дорогостоящего оборудования и соответствующей квалификации специалистов метрологов и применяется для калибровки эталонных антенн.

Для калибровки антенн из состава рабочих средств измерений применяют методы калибровки (поверки) антенн методом эталонной антенны.

При этом может использоваться нормирование параметров антенн как по коэффициенту усиления, так и по эффективной площади. Связь коэффициента усиления и эффективной площади выражается соотношением:

$$G = \frac{4\pi S}{\lambda^2}. \quad (8)$$

В методах эталонной антенны используется одна излучающая антенна $S_{\text{и}}$, для формирования электромагнитного поля на расстоянии R , и приёмная антенна S_j , в качестве которой поочерёдно подключается эталонная антенна $S_{\text{эталон}}$ или поверяемая (калибруемая) антенна $S_{\text{пов}}$, при этом измеряется уровень мощности на выходах антенн $P_{\text{эталон}}$ и $P_{\text{пов}}$, при условиях

$$P_{\text{ген}} = \text{const},$$

$$R = \text{const},$$

$$\lambda = \text{const}.$$

С учётом уравнения (1) для отношения коэффициентов усиления эталонной и поверяемой антенн, если не рассматривать влияние рассогласования в трактах, при указанных условиях получим соотношение:

$$\frac{G_{\text{эталон}}}{G_{\text{пов}}} = \frac{P_{\text{эталон}}}{P_{\text{пов}}}. \quad (9)$$

Соответственно для эффективной площади антенн:

$$\frac{S_{\text{эталон}}}{S_{\text{пов}}} = \frac{P_{\text{эталон}}}{P_{\text{пов}}}. \quad (10)$$

Использование уравнений (9, 10) для калибровки антенн в условиях ограниченных размеров помещений без существенной потери точности может применяться только для идентичных антенн, имеющих одинаковую зависимость коэффициента усиления от расстояния (одинаковые диаграммы направленности). Фактически для этого необходимо иметь эталонные антенны для каждого типа антенн или выполнять условие измерений в соответствии с формулой (3).

Калибровка антенн методом эталонной антенны с учётом близости антенн с существенно отличающейся апертурой можно производить двумя способами:

- введением в формулы (9, 10) значений поправок на близость;
 - учётом положения центров излучений эталонной и калибруемой антенн.
- Выведем соотношения для калибровки (поверки) антенн методом эталонной антенны с учётом их фазовых центров. На рис. 5 приведена схема измерений.

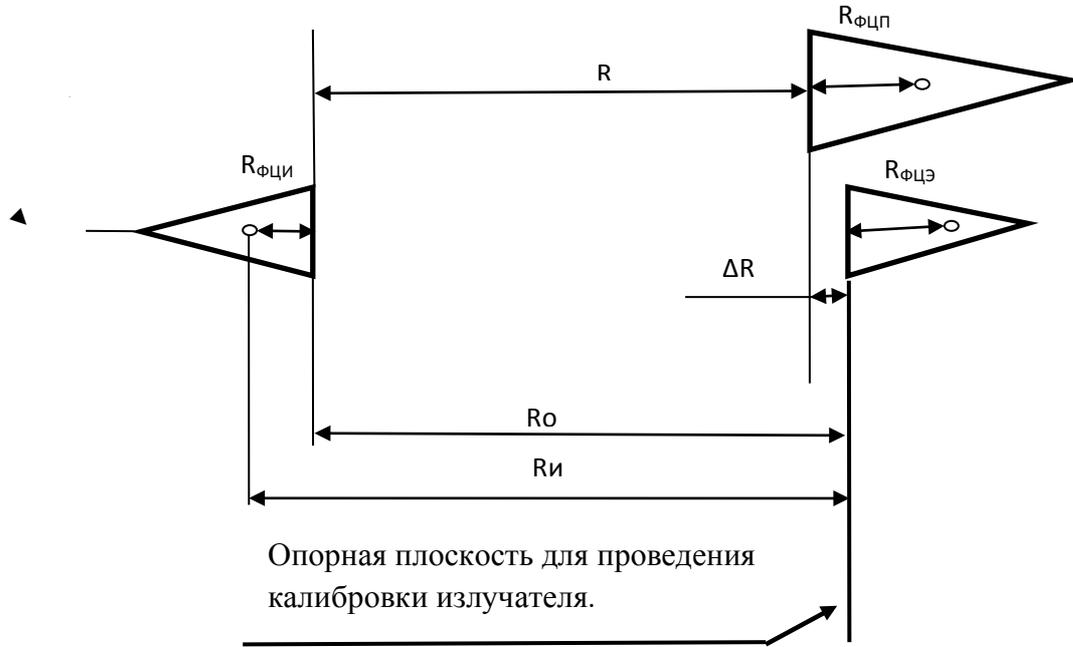


Рис. 1. Схема калибровки антенн

Вернёмся к уравнениям измерений $S_{ЭФФ}$ метода двух антенн. Для эффективной площади:

$$S_i S_j = R^2 \lambda^2 \frac{P_{пр}}{P_{ген}}, \quad (11)$$

- где R — расстояние между апертурами (раскрывами) антенн;
 λ — длина волны;
 S_i — эффективная площадь излучающей антенны;
 S_j — эффективная площадь приёмной антенны;
 $P_{пр}$ — мощность на выходе приёмной антенны;
 $P_{ген}$ — мощность на входе излучающей антенны.

При этом если использовать информацию о фазовом центре (центре излучения) излучающей и приёмной антенн, то формулу (11) можно записать в виде:

$$S_i S_j = \lambda^2 \left(R + R_{\text{фци}} + R_{\text{фцип}} \right)^2 \frac{P_{\text{пр}}}{P_{\text{ген}}}, \quad (12)$$

где $R_{\text{фци}}$ — расстояние от апертуры до фазового центра излучающей антенны;
 $R_{\text{фцип}}$ — расстояние от апертуры до фазового центра приёмной антенны.

Для этого случая $S_i S_j$ — произведение эффективной площади антенн, рассчитанных с учётом положения фазовых центров.

Опорная плоскость, относительно которой откалиброван излучатель, может использоваться для калибровки других антенн, измерителей напряжённости поля и плотности потока энергии. При этом плотность потока энергии электромагнитного поля в опорной плоскости может быть рассчитана по формуле:

$$\Pi = \frac{P_{\text{ген}} G_{\text{И}}}{4\pi R_{\text{И}}^2}, \quad (13)$$

где $R_{\text{И}} = R_0 + R_{\text{фци}}$;

$G_{\text{И}}$ — коэффициент усиления излучающей антенны;

R_0 — расстояние между апертурой излучающей антенны и плоскостью, в которой определяется напряжённость поля, формируемого излучающей антенной.

Калибровка методом эталонной антенны производится методом замещения эталонной антенны поверяемой. При этом мощность на входе излучающей антенны $P_{\text{ген}}$ при смене приёмных антенн поддерживается постоянной. Сначала устанавливаем излучатель и эталонную антенну на расстоянии R_0 между апертурами и измеряем мощность на выходе эталонной антенны $P_{\text{прэ}}$. При этом расположение апертуры приёмной антенны может отклоняться от опорной плоскости на величину отклонения ΔR :

$$\Delta R = R - R_0. \quad (14)$$

Для этого случая перепишем (12):

$$S_{\text{И}} S_{\text{Э}} = \lambda^2 (R_{\text{И}} + R_{\text{фциэ}} + \Delta R_{\text{Э}})^2 P_{\text{прэ}}. \quad (15)$$

После этого заменяем эталонную антенну на поверяемую (калибруемую):

$$S_{\text{И}} S_{\text{П}} = \lambda^2 (R_{\text{И}} + R_{\text{фцип}} + \Delta R_{\text{П}})^2 P_{\text{прп}}. \quad (16)$$

Разделив 6 на 5, получим:

$$\frac{S_{\text{П}}}{S_{\text{Э}}} = \frac{(R_{\text{И}} + R_{\text{фцип}} + \Delta R_{\text{П}})^2 P_{\text{прп}}}{(R_{\text{И}} + R_{\text{фциэ}} + \Delta R_{\text{Э}})^2 P_{\text{прэ}}}, \quad (17)$$

отсюда

$$S_{\text{П}} = \frac{\left(1 + \frac{R_{\text{фцип}} + \Delta R_{\text{П}}}{R_{\text{И}}} \right)^2 P_{\text{прп}}}{\left(1 + \frac{R_{\text{фциэ}} + \Delta R_{\text{Э}}}{R_{\text{И}}} \right)^2 P_{\text{прэ}}} S_{\text{Э}}. \quad (18)$$

Для калибровки излучателя и последующего использования в качестве эталона для калибровки или поверки измерительных антенн перепишем (18) в виде:

$$S_{\Pi} = K_{\text{изл}} \left(1 + \frac{R_{\text{фш}} + \Delta R_{\Pi}}{R_{\text{И}}} \right)^2 P_{\text{прп}}, \quad (19)$$

$$K_{\text{изл}} = \frac{S_{\text{Э}}}{P_{\text{прэ}} \left(1 + \frac{R_{\text{фцэ}} + \Delta R_{\text{Э}}}{R_{\text{И}}} \right)^2}. \quad (20)$$

Для такого эталона $K_{\text{изл}}$ может быть определён по разным типам эталонных антенн с приписанными этим антеннам фазовыми центрами. Это позволяет снизить влияние отражённых сигналов на результат калибровки. Проводя калибровку эталона на разных расстояниях R_0 можно определить рабочую зону в конкретном помещении с минимальным уровнем отражённых сигналов от окружающих предметов и стен помещения. В качестве калибровочного коэффициента рабочего эталона $K_{\text{изл}}$ принимаем среднее значение по всем калибровкам для заданного расстояния между антеннами.

В рабочем эталоне РЭИА-2 во ФГУП «ВНИИФТРИ» в качестве эталонных антенн используются антенны П6-23М, П6-59 и логопериодическая ЛПА-1, откалиброванные с расширенной неопределённостью $\pm 0,35$ дБ. После выполнения вышеописанной процедуры калибровки в диапазоне частот от 1 до 18 ГГц пределы погрешности калибровки (поверки) всех типов измерительных антенн не превышают $\pm 0,5$ дБ во всём диапазоне частот. При этом расстояние от излучающей до приёмной антенны может находиться в диапазоне от 3 до 5 метров.

В случае, когда нет информации о центрах излучения антенн, проведение измерений методом эталонной антенны может выполняться с использованием данных о поправках на близость для расчёта коэффициента усиления калибруемой антенны. Чаще всего такая задача возникает при калибровке антенн на частотах выше 26 ГГц. В этом диапазоне частот рупорные антенны изготавливаются с размерами апертуры, отличающимися в 10–20 раз. При этом реальные измерения проводятся на расстояниях от 1 до 1,5 метра. Это обусловлено динамическим диапазоном измерителей мощности и имеющейся выходной мощности генераторов для обеспечения минимальной погрешности измерения мощности на выходе эталонной и калибруемой антенн. Опыт калибровки рупорных антенн показал, что значения поправок достигают значений от 1 до 2,5 дБ.

В этом случае измерения проводятся на фиксированном расстоянии от излучателя с коэффициентом усиления $G_{\text{И1}}$. Для эталонной и поверяемой антенн получаются два соотношения, из которых рассчитывается значение коэффициента усиления поверяемой антенны. Если коэффициент усиления

выражать в дБ, мощность на выходе приёмной антенны — в дБм, то из уравнения (9), получим:

$$G_{\text{П1}} - G_{\text{Э1}} = P_{\text{П1}} - P_{\text{Э1}}, \quad (21)$$

где $G_{\text{П1}}$, $G_{\text{Э1}}$ — коэффициенты усиления на расстоянии R_1 ; $P_{\text{П1}}$, $P_{\text{Э1}}$ — мощности на выходе поверяемой и эталонной антенн.

Отсюда получаем коэффициент усиления поверяемой антенны на расстоянии R_1 от излучателя. В рабочих эталонах для калибровки рупорных антенн, как правило, имеются две антенны — излучающая и эталонная, которые имеют одинаковую конструкцию и размеры. Для них определены поправки на близость $A_{\text{Э1}}$ и коэффициент усиления на измерительном расстоянии R_1 . Коэффициент усиления этих антенн определяется на фиксированном расстоянии, и отдельно определяют поправку на близость для пересчёта коэффициента усиления в дальнюю зону. Эта поправка может определяться как расчётными методами, так и путём проведения измерений. Если для калибровки поступает антенна с размерами, существенно отличающимися от размеров эталонной антенны, может быть измерена только средняя поправка на близость двух антенн — излучающей и калибруемой $A_{\text{П1}}$.

Выведем формулу для расчёта коэффициента усиления калибруемой антенны в дальней зоне при измерениях на фиксированном расстоянии R_1 .

Для двух эталонных антенн запишем:

$$G_{\text{И1}} + G_{\text{Э1}} + 2A_{\text{Э1}} = G_{\text{И∞}} + G_{\text{Э∞}}. \quad (22)$$

Для двух антенн — излучающей и калибруемой, запишем:

$$G_{\text{И1}} + G_{\text{П1}} + 2A_{\text{П1}} = G_{\text{И∞}} + G_{\text{П∞}}. \quad (23)$$

Вычтем уравнение (6) из уравнения (7):

$$G_{\text{П1}} - G_{\text{Э1}} + 2A_{\text{П1}} - 2A_{\text{Э1}} = G_{\text{П∞}} - G_{\text{Э∞}}. \quad (24)$$

Для эталонной антенны справедливо выражение

$$G_{\text{Э∞}} = G_{\text{Э1}} + A_{\text{Э1}}. \quad (25)$$

Подставим уравнения (9) и (5) в (8):

$$G_{\text{П∞}} = P_{\text{П1}} - P_{\text{Э1}} + G_{\text{Э1}} + 2A_{\text{П1}} - A_{\text{Э1}}. \quad (26)$$

Для измерения поправок на близость достаточно использовать детекторные головки, имеющие большой динамический диапазон при тщательной калибровке нелинейности детектора. При этом поправки на близость можно измерить один раз для конкретной пары антенн и использовать эти данные при повторных калибровках других антенн этого типа.

Таким образом, получены формулы, обеспечивающие возможность создания рабочих эталонов для проверки и калибровки измерительных антенн, не требующих больших размеров помещений. Для работы на близких расстояниях между антеннами необходимо нормировать либо положение фазовых центров (центров излучения), либо значения поправок на близость для конкретного типа антенн. При этом поправки на близость и положение

центров излучения можно измерить один раз для конкретной пары антенн и использовать эти данные при повторных калибровках других антенн этого типа.

Литература

1. Айзенберг Г.З. Антенны ультракоротких волн. М.: Связьиздат, 1957. 669 с.
2. Захарьев Л.Н., Леманский А.А., Турчин В.И. и др. Методы измерения характеристик антенн СВЧ / под. ред. Н.М. Цейтлина. М.: Радио и связь, 1985. 368 с.
3. Кинбер Б.Е., Цейтлин В.Б. О погрешности измерения коэффициента направленного действия и диаграмм направленности антенн на близких расстояниях // Радиотехника и электроника. 1964. Т. 9. № 9. С. 1581–1593.
4. Тищенко В.А., Токатлы В.И., Колотыгин С.А., Лукьянов В.И. Уравнения измерения метода двух (трёх) антенн // Измерительная техника. 2012. № 11. С. 33–36.
5. Кюн Р. Микроволновые антенны. Л.: Судостроение, 1967. 506 с.
6. Newell A.C., Baird R.C., Wachter P.F. Accurate measurements of antenna gain and polarization at reduced distances by extrapolation technique // IEEE Trans. 1973. V. AP-21. P. 418–431.
7. CCEM Key Comparison CCEM.RF-K23.F. Measurement Techniques and Results of an Intercomparison of Horn Antenna Gain at Frequencies of 12.4, 15.0, 18.0 GHz [Electronic resource]. URL: https://www.bipm.org/utis/common/pdf/final_reports/EM/RF-K23/CCEM.RF-K23.F.pdf.