

УДК 537.811.088.22:621.396.67(045)(476)

ИСТОЧНИКИ ПОГРЕШНОСТИ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДИ ЭТАЛОННЫХ АНТЕНН НАЦИОНАЛЬНОГО ЭТАЛОНА ЕДИНИЦЫ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НЭ РБ 26-15 МЕТОДОМ ТРЕХ АНТЕНН
Вольнец А.С.

Белорусский государственный институт метрологии, Минск, Республика Беларусь

Реализация метода трех антенн основана на формуле передачи электромагнитной энергии в свободном пространстве, в соответствии с которым для системы с двумя антеннами (излучающей и приемной), расположенных на некотором расстоянии друг от друга, можно записать уравнение [1]:

$$S_{ИА} \cdot S_{ПА} = \lambda^2 \cdot r^2 \cdot \frac{P_{ПА}}{P_{ИА}} \quad (1)$$

где $S_{ИА}$ - эффективная площадь излучающей антенны, м²; $S_{ПА}$ - эффективная площадь приемной антенны, м²; $P_{ПА}$ - мощность на выходе приемной антенны, Вт; $P_{ИА}$ - мощность, подведенная к излучающей антенне, Вт; λ - длина волны, м; r - расстояние между антеннами, м [1].

На практике при реализации метода трех антенн измеряется мощность при непосредственном подключении преобразователя измерителя мощности к генератору ($P_{Г}$) и мощность при его подключении к приемной антенне ($P_{ПА}$) при условии поддержания постоянной мощности на выходе генератора.

При непосредственном подключении генератора и измерителя мощности, поглощенная измерителем мощности мощность с учетом рассогласования в сверхвысокочастотном (далее - СВЧ) измерительном тракте будет равна

$$P_{Г} = P_{ГП} \cdot \frac{|1 - \Gamma_{Г} \Gamma_{П}|^2}{(1 - |\Gamma_{Г}|^2)(1 - |\Gamma_{П}|^2)} \quad (2)$$

где $P_{ГП}$ - мощность, принятая термоэлектрическим преобразователем измерителя мощности на выходе генератора; $P_{Г}$ - действительное значение мощности сигнала на выходе генератора с учетом рассогласования; $\Gamma_{Г}$ и $\Gamma_{П}$ - комплексные коэффициенты отражения высокочастотного выхода генератора и термоэлектрического преобразователя измерителя мощности [1].

Мощность, поступающая в излучающую антенну при подключении ее к генератору равна

$$P_{ИА} = P_{Г} \cdot \frac{(1 - |\Gamma_{Г}|^2)(1 - |\Gamma_{ИА}|^2)}{|1 - \Gamma_{Г} \Gamma_{ИА}|^2} \quad (3)$$

где $P_{ИА}$ - действительное значение мощности сигнала, поданное на излучающую антенну с учетом рассогласования; $\Gamma_{ИА}$ - комплексный коэффициент отражения излучающей антенны.

Подставляя (3) в (2) получим

$$P_{ИА} = P_{ГП} \cdot \frac{|1 - \Gamma_{Г} \Gamma_{П}|^2 \cdot (1 - |\Gamma_{ИА}|^2)}{|1 - \Gamma_{Г} \Gamma_{ИА}|^2 \cdot (1 - |\Gamma_{П}|^2)} \quad (4)$$

Мощность, поглощенная термоэлектрическим преобразователем на выходе приемной антенны с учетом рассогласования в СВЧ тракте равна

$$P_{ПА} = P_{ПП} \cdot \frac{|1 - \Gamma_{ПА} \Gamma_{П}|^2}{(1 - |\Gamma_{ПА}|^2)(1 - |\Gamma_{П}|^2)} \quad (5)$$

где $P_{ПП}$ - мощность, принятая термоэлектрическим преобразователем на выходе антенны; $P_{ПА}$ - действительное значение мощности сигнала на выходе антенны; $\Gamma_{ПА}$ - комплексный коэффициент отражения приемной антенны.

Подставив (4) и (5) в (1) получим:

$$S_{ИА} \cdot S_{ПА} = \lambda^2 \cdot r^2 \cdot \frac{P_{ПП}}{P_{ГП}} \cdot \frac{|1 - \Gamma_{ПА} \Gamma_{П}|^2 \cdot |1 - \Gamma_{Г} \Gamma_{ИА}|^2}{(1 - |\Gamma_{ПА}|^2) \cdot (1 - |\Gamma_{П}|^2) \cdot (1 - |\Gamma_{ИА}|^2)} \quad (6)$$

Поскольку уравнение содержит две неизвестные, при проведении измерений вводят третью вспомогательную антенну и выполняют три серии измерений. Уравнения измерений запишутся в виде:

$$\begin{aligned} S_1 \cdot S_2 &= \lambda^2 \cdot r^2 \cdot \frac{P_2}{P_1} \cdot \frac{|1 - \Gamma_2 \Gamma_{П}|^2 \cdot |1 - \Gamma_1 \Gamma_1|^2}{(1 - |\Gamma_2|^2) \cdot |1 - \Gamma_1 \Gamma_{П}|^2 \cdot (1 - |\Gamma_1|^2)} \\ S_1 \cdot S_3 &= \lambda^2 \cdot r^2 \cdot \frac{P_3}{P_1} \cdot \frac{|1 - \Gamma_3 \Gamma_{П}|^2 \cdot |1 - \Gamma_1 \Gamma_1|^2}{P_1 (1 - |\Gamma_3|^2) \cdot |1 - \Gamma_1 \Gamma_{П}|^2 \cdot (1 - |\Gamma_1|^2)}; \quad (7) \\ S_2 \cdot S_3 &= \lambda^2 \cdot r^2 \cdot \frac{P_3}{P_2} \cdot \frac{|1 - \Gamma_3 \Gamma_{П}|^2 \cdot |1 - \Gamma_1 \Gamma_2|^2}{P_2 (1 - |\Gamma_3|^2) \cdot |1 - \Gamma_1 \Gamma_{П}|^2 \cdot (1 - |\Gamma_2|^2)}. \end{aligned}$$

Решив систему уравнений, найдем искомые эффективные площади каждой из трех антенн:

$$\begin{aligned} S_1 &= \frac{R_{12} \cdot R_{13}}{R_{23}} \cdot M_1 \\ S_2 &= \frac{R_{12} \cdot R_{23}}{R_{13}} \cdot M_2 \\ S_3 &= \frac{R_{13} \cdot R_{23}}{R_{12}} \cdot M_3, \end{aligned} \quad (8)$$

где $R_{ij} = \lambda \cdot r \cdot \sqrt{\frac{P_j}{P_i}}$; P_j - мощность, принятая термоэлектрическим преобразователем на выходе антенны $P_{ПП}$ в каждой из серий измерений, Вт; P_i - мощность, принятая термоэлектрическим преобразователем измерителя мощности на выходе генератора $P_{ГП}$ в каждой из серий измерений, Вт.

Поправочные множители на рассогласование в СВЧ измерительном тракте будут равны:

$$\begin{aligned} M_1 &= \frac{|1 - \Gamma_2 \Gamma_{П}| \cdot |1 - \Gamma_1 \Gamma_1|^2}{|1 - \Gamma_1 \Gamma_2| \cdot (1 - |\Gamma_1|^2) \cdot |1 - \Gamma_1 \Gamma_{П}|} \\ M_2 &= \frac{|1 - \Gamma_2 \Gamma_{П}| \cdot |1 - \Gamma_1 \Gamma_2|}{|1 - \Gamma_1 \Gamma_{П}| \cdot (1 - |\Gamma_2|^2)} \\ M_3 &= \frac{|1 - \Gamma_3 \Gamma_{П}|^2 \cdot |1 - \Gamma_1 \Gamma_2|}{(1 - |\Gamma_3|^2) \cdot |1 - \Gamma_1 \Gamma_{П}| \cdot |1 - \Gamma_2 \Gamma_{П}|} \end{aligned} \quad (9)$$

где Γ_1 - комплексный коэффициент отражения первой (излучающей) антенны; Γ_2 - комплексный коэффициент отражения второй (вспомогательной) антенны, используется в качестве излучающей и приемной в разных сериях измерений; Γ_3 - комплексный коэффициент отражения третьей (приемной) антенны.

Оценивание неисключенной систематической погрешности результатов измерений эффективной площади методом трех антенн

При расчете неисключенной систематической погрешности примем во внимание следующие составляющие: погрешность измерения отношения мощностей измерителем мощностей; погрешности, обусловленные рассогласованием в СВЧ измерительном тракте, непостоянством электромагнитного поля за время измерений, неидеальностью настройки антенн по поляризации, неидеальностью поляризационных характеристик антенн, неточностью позиционирования антенн, переотражением электромагнитных волн от стен камеры, изменением характеристик СВЧ кабеля при изгибании, неидеальностью соединений СВЧ тракта (повторяемость СВЧ соединений при переключении антенн).

Поскольку при реализации метода трех антенн в каждой серии эксперимента выполняется измерение отношения мощностей сигналов, частотной составляющей погрешности измерителя мощности можно пренебречь. Градуировка термоэлектрических преобразователей из состава Национального эталона единицы плотности потока энергии НЭ РБ 26-15 выполнена непосредственно на оборудовании Национального эталона единицы мощности электромагнитных колебаний, границы относительной погрешности измерения отношения мощностей сигналов составят не более $\pm 1,2\%$.

При реализации метода трех антенн, так или иначе, присутствует погрешность из-за рассогласования в СВЧ измерительном тракте. Поскольку в нашем случае целью эксперимента является определение эффективной площади приемной антенны из состава эталона (третья антенна в серии измерений), определим значение погрешности из-за рассогласования в СВЧ тракте при определении эффективной площади третьей антенны. Принимая равномерный закон распределения модулей коэффициента отражения, для доверительной вероятности $P=0,95$ погрешность из-за рассогласования в СВЧ тракте δ , отн. ед., можно оценить по формуле:

$$\delta = \pm 1,1 \cdot \sqrt{\frac{|\Gamma_3|^4 + 4 \cdot |\Gamma_3|^2 |\Gamma_{\Pi}|^2 + 4 \cdot |\Gamma_2|^2 |\Gamma_{\Pi}|^2 + |\Gamma_{\Gamma}|^2 |\Gamma_2|^2 + 4 \cdot |\Gamma_{\Gamma}|^2 |\Gamma_{\Pi}|^2}{|\Gamma_3|^4 + 4 \cdot |\Gamma_3|^2 |\Gamma_{\Pi}|^2 + 4 \cdot |\Gamma_2|^2 |\Gamma_{\Pi}|^2 + |\Gamma_{\Gamma}|^2 |\Gamma_2|^2 + 4 \cdot |\Gamma_{\Gamma}|^2 |\Gamma_{\Pi}|^2}}$$

Принимая значения модулей коэффициентов отражения равными $|\Gamma_{\Pi}| \leq 0,1$; $|\Gamma_{\Gamma}| \leq 0,1$; $|\Gamma_3| \leq$

0,2 значение погрешности из-за рассогласования в СВЧ измерительном тракте составит не более $\pm 9\%$, что значительно превышает любую из составляющих погрешности, поэтому реализация метода трех антенн без применения корректирующего множителя является неприемлемым.

Тем не менее, использование корректирующего множителя не позволяет полностью исключить погрешность из-за рассогласования в СВЧ тракте, поскольку существует погрешность в измерениях значений действительной и мнимой частей коэффициентов отражения компонентов СВЧ тракта. Эта погрешность содержит как случайную составляющую из-за случайных эффектов в соединении устройств, так и неисключенную систематическую погрешность, возникающую из-за погрешности измерения коэффициентов отражения векторным анализатором цепей. Опыт показал, что случайная погрешность в реальной или мнимой частях коэффициента отражения антенны с прецизионным соединителем вряд ли превысит $\pm 0,7\%$ при условии, что антенна направлена на соответствующий радиопоглощающий материал во время измерений. Принимая в расчетах погрешность измерения модулей и аргументов комплексных коэффициентов отражения векторным анализатором цепей, равную $\pm 5\%$, неисключенная систематическая погрешность из-за рассогласования в СВЧ измерительном тракте после применения поправочного множителя не превысит $\pm 0,8\%$. Анализ показал, что использование поправочного множителя с учетом модулей комплексных коэффициентов отражения позволяет снизить погрешность из-за рассогласования в 1,5 – 2,5 раза, с учетом комплексных коэффициентов отражения – в 9-10 раз [2].

Приведенная методика предполагает [1], что используемые при измерениях передающая и приемная антенны линейно поляризованы и большие оси их поляризационных эллипсов настроены друг на друга. На практике лабораторные антенны не будут полностью линейно поляризованными, а большие оси их поляризационных эллипсов не будут идеально выровнены. Чтобы оценить погрешность из-за неидеальности поляризационных характеристик антенн, можно использовать следующее уравнение для определения эффективности соответствия поляризации L :

$$L = \frac{(1+r_{\text{ИА}}^2)(1+r_{\text{ПА}}^2)+4 \cdot r_{\text{ИА}} \cdot r_{\text{ПА}}+(1-r_{\text{ИА}}^2)(1-r_{\text{ПА}}^2) \cdot \cos \Delta}{2 \cdot (1+r_{\text{ИА}}^2) \cdot (1+r_{\text{ПА}}^2)}, \quad (10)$$

где $r_{\text{ИА}}$ – коэффициент эллиптичности излучающей антенны; $r_{\text{ПА}}$ – коэффициент эллиптичности приемной антенны; Δ - половина угла между большими осями поляризационных эллипсов антенн.

В случае, когда излучающая и приемная антенны имеют идеальную линейную поляризацию, т.е. $r_{\text{ИА}} \rightarrow \infty$ и $r_{\text{ПА}} \rightarrow \infty$, получим:

$$L = \frac{1+r^2-(1-r^2)\cos\Delta}{2\cdot(1+r^2)}, \quad (11)$$

где r – максимальный из коэффициентов эллиптичности антенн.

Из (12) видно, что $r \rightarrow \infty$ и $L \rightarrow \cos\Delta$. Это ожидаемо, поскольку в данном случае обе антенны совершенно линейно поляризованными и единственным несоответствием является несоосность эллипсов поляризации. Принимая во внимание, что $\cos\Delta = 2\cos^2\Phi - 1$, запишем (12) в виде:

$$L = \cos^2\Phi, \quad (12)$$

где Φ – угол между большими осями поляризационных эллипсов излучающей и приемной антенн.

Поворотное устройство эталона позволяет позиционировать антенны с точностью 1° , тогда погрешность из-за несоосности поляризационных эллипсов составит не более $\pm 0,1\%$.

Теперь рассмотрим тот факт, что лабораторные антенны не являются, по сути, совершенно линейно поляризованными. **Погрешность из-за нелинейности поляризационных характеристик антенн** можно оценить по формуле (11), оценив сначала коэффициенты эллиптичности антенн. Коэффициент эллиптичности любой из антенн может быть получен путем нахождения отношения максимального принимаемого сигнала к минимально принятому сигналу, когда приемная антенна вращается вокруг своей оси [3]. Антенны из состава эталона имеют коэффициент эллиптичности порядка 30 дБ, тогда погрешность из-за нелинейности поляризационных характеристик антенн не превысит $\pm 0,4\%$.

Все кабели, используемые при проведении измерений, испытывают некоторые изгибы, в результате которых изменяются их характеристики, что в свою очередь приводит к **погрешности из-за изгибания кабелей**. В приемном тракте термоэлектрические преобразователи измерителя мощности подключаются непосредственно фланцем приемной антенны, от которых к измерительному блоку по кабелям идут сигналы постоянного тока. Таким образом, указанная погрешность возникает прежде всего в передающем тракте, где имеет место подключение излучающей антенны к генератору сигналов посредством коаксиального фидера. Эффект такого типа изгиба кабеля можно легко оценить, включив его в тракт векторного анализатора цепей, сгибая кабель в той же степени, что и на практике, и сравнивая спектрограммы векторного анализатора цепей. Практика показывает, границы относительной погрешности из-за изгибания кабеля, как правило, составляют не более $\pm 0,2\%$.

Хотя болты, используемые для прикрепления каждой антенны к соответствующему волноводу, находятся близко друг к другу, так или иначе существует какое-либо провисание, а крутящий

момент, приложенный к этим болтам, редко бывает одинаковым. Эти факторы приводят к погрешностям **из-за неидеальности соединений компонентов СВЧ тракта**. Аналогичным образом для коаксиальных систем возможны изменения в способе соединения, что приводит к незначительным различиям в потерях, возникающих в местах соединений. Как и с погрешностью из-за изгибания кабеля, возникающая погрешность может быть оценена путем выполнения повторных подключений и отключений во время измерения, и, как правило, не превышает $\pm 0,2\%$.

Используемый в расчетах полином (8) предполагает, что единственные сигналы, достигающие приемной антенны, поступают непосредственно от излучающей антенны. Хотя модель и включает в себя эффект множественных переотражений между самими антеннами, она не учитывает какие-либо переотражения от поглотителя внутри камеры. Эти отражения будут приводить к погрешностям в измеренном значении эффективной площади. При этом значение **погрешности из-за переотражений** определяется коэффициентом безэховости камеры. Существуют различные способы определения коэффициента безэховости камеры: метод КСВН, метод наложения диаграмм направленности, метод двух приемных антенн и др. [4]. Нами был использован метод, основанный на перемещении излучающей изотропной антенны в объеме камеры, определении КСВН камеры в соответствии с ГОСТ CISPR 16-1-4-2016 с последующим пересчетом полученных результатов в коэффициент безэховости камеры. Для этих целей использован специальный комплект изотропных антенн и позиционер. Измеренное значение коэффициента безэховости составило – (30...40) дБ, что с учетом малого измерительного расстояния в камере является достаточным для проведения измерений с погрешностью из-за переотражений в безэховой камере порядка 1-2%.

Нестабильность электромагнитного поля за время проведения измерений определяется в первую очередь характеристиками используемого генератора сигналов и наличием внешних электромагнитных помех. Кратковременная нестабильность уровня выходной мощности генератора сигналов из состава эталона составляет 0,01 дБ за 15 минут работы. С учетом того, что измерения выполняются в экранированной безэховой камере, исключающей попадания внешних электромагнитных полей, **погрешность из-за непостоянства электромагнитного поля** за время измерений не превысит 0,3% [5].

Погрешность из-за неточности позиционирования антенн определяется характеристиками используемого координатного устройства. Можно выделить три типа ошибок позиционирования антенн, которые приводят к погрешности в измеренном значении эффективной площади: угловая

несоосность, возникающая при вращении антенны вокруг любой оси, нормальной к направлению измерения, боковое смещение, возникающее при боковом смещении антенны относительно направления измерения, и неточность установки расстояния между антеннами. Следует отметить, что не каждая ошибка в позиционировании антенны приведет к погрешностям результатов измерений. Так, например, неточность позиционирования антенны 1 не влияет на точность измерения эффективной площади антенны 3, если она не меняла положения между запусками антенн 1-2 и антенн 1-3. Это связано с тем, что несогласованная антенна 1 может рассматриваться как идеально выровненная антенна, но с другой эффективной площадью, и значение этой эффективной площади взаимовычитается в уравнении для вычисления эффективной площади антенны 3. Измерения, в целом, конечно, приведут к неправильному значению эффективной площади антенны 1, но если это не является целью измерения, то это может быть приемлемым. Значение погрешности из-за неточности позиционирования антенн несложно найти, проведя серию экспериментальных исследований. С учётом того, координатное устройство эталона позволяет позиционировать антенны с точностью $\pm 1^\circ$ (вокруг оси и по азимуту) и ± 1 мм (расстояние между антеннами и боковое перемещение), значение погрешности из-за неточности позиционирования антенн не превысит $\pm 1,0\%$.

Границы неисключенной систематической погрешности при определении эффективной площади антенны по предложенной методике составляют $\pm 2,3\%$ при доверительной вероятности $P=0,95$.

Заключение

Предложенный метод коррекции результатов измерений эффективной площади методом трех

антенн основан на использовании поправочного множителя, рассчитанного по результатам измерений комплексных коэффициентов отражения компонентов СВЧ измерительного тракта. Анализ показал, что это позволяет уменьшить составляющую погрешности из-за рассогласования в СВЧ измерительном тракте в 10 раз, а погрешность метода трех антенн в целом более чем в 5 раз. Основным достоинством предложенного метода трех антенн с учетом поправочного множителя является высокая точность результатов измерений и отсутствие необходимости использования эталонных антенн. Основным недостатком является сложность его реализации, необходимость выполнения дополнительных измерений для расчета поправочного множителя.

Литература

1. IEEE Std 149™-1979 (R2008) (Revision of IEEE Std 149-1965) IEEE Standard Test Procedures for Antennas – 129 с.
2. Волынец А.С., Гусинский А.В., Кострикин А.М. Повышение точностных характеристик национального эталона единицы плотности потока энергии электромагнитного поля за счет уменьшения погрешности из-за рассогласования в сверхвысокочастотном измерительном тракте // Метрология и приборостроение.- 2017.- №1
3. А.С. Волынец, А.В. Гусинский. Калибровка антенн с круговой поляризацией с использованием линейно поляризованных эталонных антенн // Метрология и приборостроение.- 2015.- №1
4. Беззховые камеры СВЧ / М. Ю. Мицмахер, В. А. Торгованов, 129 с. ил. 21 см., М. Радио и связь 1982.
5. Мелехов М.Е., Иващенко П.А.. Поверка средств измерений напряженности электромагнитного поля. Учебное пособие. – М.: Издательство стандартов, 1986 г.