

УДК 535.8 → 523.164

РАДИОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ МАЛЫХ ЗАТУХАНИЙ

В. Я. Гольнев, Д. В. Корольков, Г. М. Тимофеева

1. Измерение малых затуханий в элементах СВЧ тракта ($\alpha \ll 0,1$ дБ) является в настоящее время актуальной задачей, особенно в связи с появлением малозумящих устройств. Известными методами измерения [1], например, по отношению мощностей или методом замещения, трудно измерять очень малые потери. Метод короткого замыкания позволяет измерять малые потери, но неприменим к невзаимным (ферритовым) элементам, которые представляют собой очень важную группу СВЧ элементов.

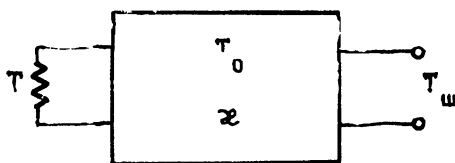


Рис. 1. $T_{ш} = Te^{-\alpha} + T_0(1 - e^{-\alpha}) \approx T + \alpha(T_0 - T)$.

В работе предлагается более точный и удобный радиометрический метод измерения малых затуханий, применимый как к взаимным, так и к невзаимным элементам*. Измерения затухания производятся по собственному тепловому излучению измеряемого элемента или с помощью излучения внешнего генератора шума. Принцип измерения затухания α (см. рис. 1) ясен из связи между значениями шумовой температуры на выходе четырехполюсника (измеряемого элемента) $T_{ш}$, температуры согласованной нагрузки на его входе T и температуры самого измеряемого элемента T_0 (окружающая температура). При $\alpha \ll 1$

$$T_{ш} = T(1 - \alpha) + T_0\alpha = T + \alpha(T_0 - T),$$

откуда α может быть легко определено.

Если учесть, что затуханию в 0,1 дБ соответствует температура излучения около 6,7°К, а современные радиометры позволяют измерять шумовую температуру с точностью до 0,1 ÷ 0,01°К при осреднении $\tau = 1$ сек, то ясно видно сколь малые затухания позволяет измерять этот метод. Чтобы избежать абсолютных измерений температуры и иметь дело лишь с приращением сигнала за счет измеряемого элемента, следует построить измерения по балансной схеме (рис. 2) и применить известный в радиоастрономии квазиулевым метод измерения. При

* Этот принцип измерений был высказан ранее в работах Кайдановского и др. [2] и Троицкого [3].

этом исключаются также влияния изменений коэффициента усиления в радиометре.

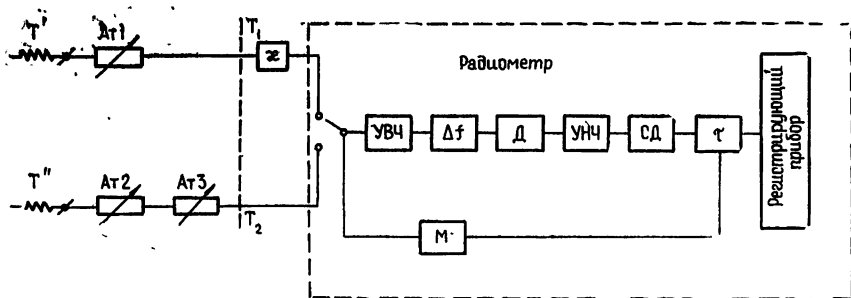


Рис. 2.

2. Процедура измерений заключается в следующем.

1) Без измеряемого элемента (x на рис. 2) с помощью аттенюаторов 1 и 2 выравниваются температуры излучения каналов $T_1 = T_2$; радиометр при этом используется как нульиндикатор.

2) Полностью вводится затухание аттенюатора 3 во втором канале, получается калибровочный отсчет α_1 :

$$\alpha_1 \propto T_0 - T_1. \quad (1)$$

3) Выводится затухание аттенюатора 3 и подсоединяется измеряемый элемент с коэффициентом поглощения x . Получается измерительный отсчет α_2 :

$$\alpha_2 \propto [T_1(1 - x) + T_0 x] - T_1 = x(T_0 - T_1). \quad (2)$$

Из (1) и (2) коэффициент x определяется просто как отношение отсчетов α_1 и α_2 ,

$$x = \alpha_2 / \alpha_1, \quad (3)$$

т. е. при этом нет необходимости знать абсолютное значение температур T_1 и T_0 . Необходимо только, чтобы измеряемый элемент и аттенюаторы находились при одинаковой окружающей температуре T_0 .

Формула (3) получена в предположении, что измеряемый элемент идеально согласован. В случае неидеального согласования, когда коэффициент отражения от измеряемого элемента $\Gamma \neq 0$, нетрудно получить соотношение

$$\frac{\alpha_2}{\alpha_1} = \Gamma^2 + x \left(1 + \frac{T_1 \Gamma^2}{T_0 - T_1} \right) \approx \Gamma^2 + x. \quad (4)$$

Так как Γ^2 (или КСВН) легко и с большой точностью определяется с помощью измерительной линии, соотношение (4) позволяет определить x с тем же успехом, что и выше*. В случае невзаимного элемента коэффициенты отражения последнего в сторону радиометра Γ_1 и в сторону входа Γ_2 могут быть разными и (4) приводится к виду

$$\frac{\alpha_2}{\alpha_1} = \frac{T_0 \Gamma_2^2 - T_1 \Gamma_1^2}{T_0 - T_1} + x \left(1 + \frac{T_1 \Gamma_1^2}{T_0 - T_1} \right). \quad (5)$$

3. Точность измерений (или минимальное значение x_{\min}) оценим из (3), приняв, что минимальное измеримое значение отсчета $\alpha_{2 \min}$ опре-

* С точки зрения применения в радиометрии нас интересует обычно сумма $\Gamma^2 + x$, так как умноженная на T_0 она представляет собой вносимую элементом шумовую температуру.

деляется флуктуационной чувствительностью радиометра $\Delta T = \frac{T_{\text{пр}} + T_1}{\sqrt{\Delta f \tau}}$,

где $T_{\text{пр}} + T_1$ — шумовая температура на входе радиометра (сумма температур приемника и входа), Δf — полоса принимаемых частот, τ — время накопления. Отсюда

$$x_{\text{min}} = \frac{\alpha_2 \text{min}}{\alpha_1} = \frac{\Delta T}{|T_0 - T_1|} = \frac{1}{\sqrt{\Delta f \tau}} \frac{T_{\text{пр}} + T_1}{|T_0 - T_1|}.$$

Если на входе используются шумовые генераторы с эффективной шумовой температурой $T_1 \gg (T_0, T_{\text{пр}})$, то

$$x_{\text{min}} = \frac{1}{\sqrt{\Delta f \tau}},$$

т. е. численно равно радиометрическому выигрышу; при скромных величинах $\Delta f = 25 \text{ Мгц}$ и $\tau = 1 \text{ сек}$ $x_{\text{min}} = 0,001 \text{ дб}$. Если же на выходе использовать охлаждение нагрузки $T_1 \ll (T_0, T_{\text{пр}})$, то

$$x_{\text{min}} = \frac{T_{\text{пр}}}{T_0} \frac{1}{\sqrt{\Delta f \tau}}.$$

В этом случае применение малозумящего приемника позволяет еще выиграть в чувствительности.

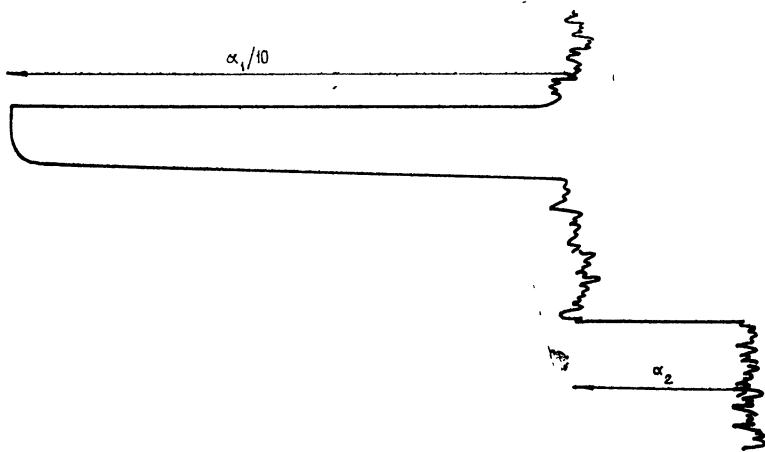


Рис. 3.

Очевидно, что не выгодны случаи, когда T_1 близко к T_0 . Заметим, что для обеспечения точности 10^{-3} дб необходимо измерять КСВН с точностью до 0,01. На рис. 3 показан пример измерения потерь в циркуляторе на волне 4 см с помощью радиометра с чувствительностью $0,2^\circ \text{К}$. Здесь, считая $\Gamma_1^2 = \Gamma_2^2 = \Gamma^2$, получаем из (4) $x = \alpha_2/\alpha_1 - \Gamma^2 = 0,027 \pm 0,002$ или $x \text{ дб} \approx 0,12 \pm 0,01 \text{ дб}$, причем погрешность здесь определяется погрешностью измерений КСВН равной $1,1 \pm 0,05$.

В заключение подчеркнем преимущества метода — возможно измерение очень малых затуханий порядка $0,1 \div 0,001 \text{ дб}$, отсутствие необходимости в абсолютной калибровке, возможность измерения затухания в ферритовых элементах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Э. Л. Гинзтон, Измерения на сантиметровых волнах, под ред. Г. А. Ремеза, ИЛ, М., 1960.
2. Н. Л. Кайдановский, М. Т. Турусбеков, С. Э. Хайкин, Тр. V совещ. по вопросам космогонии, изд. АН СССР, 1956, стр. 347.
3. В. С. Троицкий, Радиотехника и электроника, 1, № 5, 601 (1956).

Ленинградский филиал
Специальной астрофизической обсерватории
АН СССР

Поступила в редакцию
31 октября 1972 г.