

МАТЕРІАЛИ КОНФЕРЕНЦІЇ

УДК 621.373.187

Методика вимірювання параметрів балансних змішувачів терагерцового діапазону

Май О.В., д.т.н., проф. Денбновецький С.В.

Введение

Технология субтерагерцового и терагерцового диапазонов находит новые и важные применения в ряде ключевых отраслей, таких как радиотелекоммуникационные системы, медицина, безопасность, химическая и биологическая визуализация, а также аэрокосмическое и атмосферное зондирование.

На терагерцовых частотах, в особенности субтерагерцовом диапазоне, измерение параметров входных каскадов приемников развивается в основном в двух направлениях: *первое* – охлаждение входных каскадов приемника в криостате до азотного уровня; *второе* – измерение и калибровка на основе высокотемпературных источников в температурном диапазоне 300-1500°K и выше абсолютно черного тела [1,2].

В данной работе рассмотрено измерение коэффициента шума входных каскадов интегрального приемника (балансного смесителя на первой субгармонике гетеродина $f_{гет}$

= 130 ГГц) путем охлаждения до уровня кипения жидкого азота ($T=80\pm 5^\circ\text{K}$) согласованной нагрузки металлодиэлектрического волновода сечением 10×10 мм в кювете [5].

Измерения параметров балансного смесителя проводились в диапазоне 280-300 ГГц на измерительной установке, структурная схема которой приведена на рис.1.

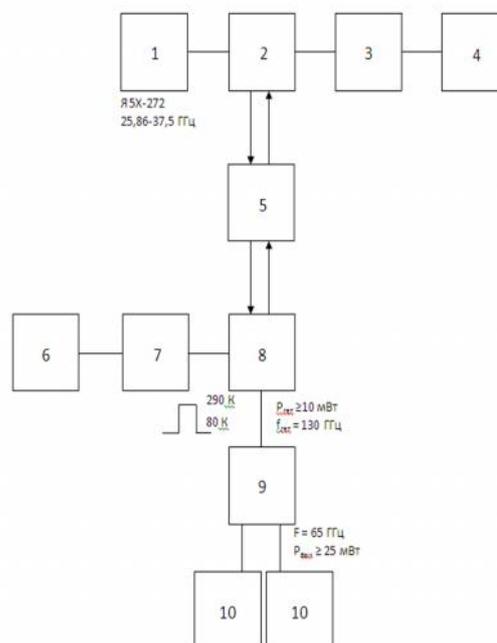


Рис.1. Структурная схема измерения

параметров смесителей.»

1. Генератор шума Я5Х-272 ($\Delta f = 25,86 \dots 37,5$ ГГц).
2. Двухплечий циркулятор (сечением канала $7,2 \times 3,4$ мм).
3. Радиометрический модуль.
4. Осциллограф.
5. Коаксиально-волноводный переход ($\Delta f = 25,86 \dots 37,5$ ГГц).
6. Генератор шума низкотемпературный $T = (80) \pm 5^\circ\text{К}$.
7. Амплитудный модулятор ($\Delta f = 280 \dots 300$ ГГц).
8. Балансный смеситель на металлодиэлектрическом волноводе сечением 10×10 мм ($\Delta f = 280 \dots 300$ ГГц; $L_{\text{пр}} \leq 15$ дБ).
9. Квазиоптический открытый резонатор ($f = 130$ ГГц; $P_{\text{вых}} = 10 \dots 15$ мВт).
10. Генератор на диоде Ганна ($f = 65$ ГГц; $P_{\text{вых}} \geq 25$ мВт).

Метод измерения основан на применении двух калиброванных нагрузок с известными шумовыми температурами. Первая

калиброванная нагрузка, охлажденная до уровня кипения жидкого азота, согласованная нагрузка на основе отрезка металлодиэлектрического волновода 10×10 мм (ГШ 2) и тепловой развязки состоящей из отрезка металлодиэлектрического волновода из нержавеющей стали длиной 60 мм. Вторая калиброванная нагрузка,

калиброванный генератор шума Я5Х-272 (ГШ 1).

Основа метода заключается в том, что погрешности за счет отражений в измерительном тракте промежуточной частоты (ПЧ), которые обусловлены омическими потерями устраняются за счет использования двух источников шума, один из которых направленно излучает в сторону смесителя (ГШ 2), а другой направленно излучает в сторону радиометрического модуля (ГШ 1) (РМ).

С помощью первого генератора шума (ГШ 2) мощность которого излучается в сторону исследуемого смесителя по цепи сигнала, производится контроль глубины согласования смесителя и измерение, в дальнейшем, его потерь преобразования.

Второй источник шума (ГШ 1) применяется в качестве *образцового* генератора шума, благодаря чему омические потери в тракте промежуточной частоты калибруются и тем самым, не вносят погрешность в измеряемые величины параметров.

Метод измерения потерь преобразования и КСВН выхода смесителя осуществляется в два этапа: калибровка измерительной установки и измерение параметров.

Калибровка измерительной установки.

В тракт ПЧ смесителя подключается ГШ 1. Калиброванный шумовой сигнал, через двухплечий

циркулятор, фільтр ПЧ смесителя поступає на діод, відбиваючись від нього, проходить по другому плечу циркулятора і поступає на вхід радіометричного модуля (РМ).

Общая шумовая температура на входе РМ $T_{\text{общ.}}$ в этом случае равна (напряжение смещения на диод не подается):

$$T_{\text{общ.}} = T_0 \Gamma^2 + T_{\text{собст.д}} (1 - \Gamma^2), \quad (1)$$

где $T_0 = 290^\circ\text{K}$; $T_{\text{собст.д}}$ – собственная температура шума диода, Γ – коэффициент отражения.

Уровень шумового калиброванного опорного сигнала регистрируется на экране осциллографа.

Измерение собственной температуры шума смесительного диода в статическом режиме осуществляется при подаче смещения на диод.

Спектральная плотность мощности шума, поступающая от генератора шума ГШ 1, частично поглощается диодом вследствие изменения его дифференциального сопротивления. Отраженный шумовой сигнал проходит по тракту ПЧ и его уровень измеряется РМ и регистрируется на экране осциллографа.

Собственная температура шума диода определяется по формуле:

$$T_{\text{собст.д}} = \frac{l_1}{l_2} T_{\text{ш1}}, \quad (2)$$

где l_1 – величина импульса при напряжении смещения $U_{\text{см}} = 0$ В; l_2 – величина импульса при $U_{\text{см}} = 0,5$ В; $T_{\text{ш1}}$ – температура шума ГШ 1. Потери преобразования смесителя L измеряются при подаче мощности гетеродина ($P \geq 10$ мВт) на вход смесителя.

Методика измерения потерь преобразования ($L_{\text{пр}}$) смесителя. Включается генератор шума ГШ 2, сигнал которого поступает на вход исследуемого смесителя, затем включается генератор шума ГШ 2. Калиброванный уровень спектральной плотности мощности шума поступает на вход смесителя, преобразуется на ПЧ и по его тракту поступает на вход РМ и его уровень регистрируется на его экране осциллографа.

Потери преобразования смесителя определяются по формуле:

$$L_{\text{пр}} = \frac{T_{\text{ш вх}}}{T_{\text{ш вых}} \cdot \frac{l_x}{l_k}} \quad (3)$$

где $T_{\text{ш вх}}$ – температура шума ГШ 2; $T_{\text{ш вых}}$ – температура шума выхода смесителя; l_x – величина импульса, обусловленная потерями преобразования смесителя; l_k – величина калиброванного импульса.

КСВН выхода смесителя измеряется как в статическом, так и в динамическом режимах. КСВН выхода смесителя в статическом режиме определяется по формуле:

$$|\Gamma_0|^2 = \frac{l_1}{l_2}, \quad (4)$$

где l_1 – величина імпульса при $U_{см} = 0$ В; l_2 – величина імпульса при $U_{см} = 0,5$ В.

КСВН вихода смесителя в динамічному режимі визначається при виконанні операцій, таких же як при вимірюванні втрат перетворення.

КСВН вихода смесителя в динамічному режимі (при подачі потужності гетеродина) визначається по формулі:

$$|\Gamma|^2 = \frac{l_k}{l_x} \quad (5)$$

где l_k – величина каліброваного імпульса; l_x – величина імпульса, обумовлена температурой шуму смесителя.

Расчетные формулы

Флуктуации возникающие в диоде с барьером Шоттки, под действием местного гетеродина, обычно имеют более высокий уровень, чем тепловые флуктуации в эквивалентном сопротивлении. Температура шума смесителя $T_{ш см}$ определяется как отношение выходной мощности флуктуаций диода, к выходной мощности тепловых флуктуаций сопротивления диода при комнатной температуре:

$$T_{ш см} = \frac{N_0}{kT_0\Delta f}, \quad (6)$$

где N_0 – выходная шумовая мощность смесительного диода; k – постоянная Больцмана; $T_0 = 290^\circ\text{K}$; Δf – полоса пропускания усилителя.

Соотношение между температурой шума ($T_{ш}$), потерями преобразования ($L_{пр}$) и коэффициентом шума ($F_{ш}$) определяется выражением:

$$F_{ш} = T_{ш} \cdot L_{пр}, \quad (7)$$

В случае если измерение характеристик смесителя производится с использованием малошумящего усилителя (МШУ) в тракте ПЧ, действующее значение коэффициента шума смесителя и усилителя ПЧ определяется по формуле:

$$F_{преобр.} = L_{пр} (T_{ш см} + F_{упч} - 1), \quad (8)$$

где $L_{пр}$ – потери преобразования; $T_{ш см}$ – температура шума смесителя; $F_{упч}$ – действующее значение коэффициента шума усилителя промежуточной частоты (УПЧ).

Конструкция балансного смесителя, гетеродина и экспериментальные результаты.

Балансный смеситель на первой субгармонике гетеродина реализован на новом типе квазиоптической резонансной системы, представляющий собой симбиоз сверхразмерного металлического и металлодиэлектрического волноводов и волноводной вставки состоящей планарной антенны, двух

диодов с барьером Шоттки, отрезками подвешенной полосковой и копланарной линии передачи [3].

В качестве выходного каскада гетеродина использован полусферический квазиоптический открытый резонатор (КОР). Радиус кривизны R криволинейного отражателя составил 39 мм, апертуры обоих зеркал равны 40 мм. Рабочая длина волны $\lambda = 2,308$ мм ($f = 130$ ГГц). Нагруженная добротность резонатора является мерой потерь в электродинамической системе. Проведенные оценки по полуширине резонансной кривой показали, что она находится в интервале 3200-3500 [4].

Введение в гетеродин квазиоптического открытого резонатора обеспечивает эффективное пространственное сложение мощностей, подавление паразитных колебаний (до уровня минус 50 дБн и ниже), обеспечивает стабильность частоты в пределах $10^{-6} \dots 10^{-7}$.

Эффективность сложения мощностей двух генераторов на второй гармонике проводимости диодов Ганна составляет 0,67.

Потери преобразования балансного смесителя (режим SSB) в диапазоне частот 280-300 ГГц не превышают 15 дБ при мощности гетеродина $P = 10$ мВт.

Расчет погрешностей измерений.

Погрешность измерений определяется по формуле:

$$\delta = \sqrt{\delta_{\text{ши}}^2 + \delta_{\text{амт}}^2 + \delta_{\text{волн}}^2 + \delta_{\text{нч}}^2 + \delta_{\text{ст}}^2 + \delta_{\tau}^2 + \delta_{\text{ши2}}^2}$$

$$\delta = \sqrt{0,1^2 + 0,01^2 + 0,05^2 + 0,015^2 + 0,05^2 + 0,05^2 + 0,05^2} \leq 0,20$$

где $\delta_{\text{гш}}$ – погрешность калибровки генератора шума ($T = 80 \pm 5^\circ\text{K}$);

$\delta_{\text{амт}}$ – погрешность амплитудного модулятора;

$\delta_{\text{волн}}$ – погрешность измерения потерь в волноводных элементах и начального затухания амплитудного модулятора;

$\delta_{\text{нч}}$ – погрешность измерения напряжения на выходе радиометра;

$\delta_{\text{ст}}$ – погрешность измерения «ступеньки»;

δ_{τ} – погрешность калибровки RC-цепочки;

$\delta_{\text{гш2}}$ – погрешность калибровки генератора шума Я5Х-272.

Выводы.

1. Предложенный метод измерения параметров балансных смесителей обладает погрешностью измерений не превышающей 20%.
2. В разработанном балансном смесителе на первой субгармонике гетеродина потери преобразования (режим SSB) в

диапазоне частот 280-300 ГГц не превышают 15 дБ.

3. Рассмотренный в работе балансный смеситель с полосой пропускания 20 ГГц и более может быть использован для приема и обработки широкополосных и сверхширокополосных (IR-UWB) сигналов.

Литература

1. Peter H. Siegel. Terahertz technology // IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques.-2002.-vol.50, No.3-p.910-928;
2. Alex Svetlitz, Michael Slavenko, Tatiana Blank, Igor Brouk, Sara Stolyarova, and Yael Nemirovsky. THz Measurements and Calibration Based on a Blackbody Source. IEEE Transaction on Terahertz Science and Technology, vol.4, No.3, May 2014;
3. Май А.В., Денбновецкий С.В. Интегральный приемник

субмиллиметрового диапазона. Матеріали Х-ї науково-практичної конференції «Перспективні напрямки сучасної електроніки», «КПІ» ім. Ігоря Сікорського, ФЕЛ, 7-8 квітня 2016р;

4. И.К. Кузьмичев, В.Д. Еремка, А.В. Май, А.С. Трошило. Открытый резонатор для сложения мощностей в субтерагерцовом и терагерцовом диапазонах. Радиофизика и радиоастрономия. 2017, Т. 22, № 1, с. 67-77;
5. В.Г. Божков, В.А. Геннеберг, В.Н. Романовская, Л.И. Федосеев, А.Д. Фригер, А.А. Швецов. Исследование монолитного балансного смесителя 1,5-миллиметрового диапазона. Радиотехника и Электроника, 1996, том 41, № 7, с. 876-881.