

# Содержание

<b>1</b>	<b>Введение</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Литобзор</b>	<b>3</b>
2.1	Теоретическое описание . . . . .	3
2.2	Постановка эксперимента . . . . .	6
2.3	Калибровка . . . . .	7

# 1 Введение

Радиоастрономия является основным двигателем развития сверхчувствительных смесителей для гетеродинных приемников электромагнитного излучения миллиметровых и суб-миллиметровых длин волн. Смесители на основе туннельного перехода сверхпроводник – изолятор – сверхпроводник (СИС) [1] имеют рекордные шумовые характеристики в этом диапазоне, близкие к квантовому пределу. Среди наземных приемников наибольшее распространение получили смесители с разделением боковых полос, которые имеют в составе два одиночных СИС-смесителя [2] [3].

Для эффективной работы приемника, а именно для достижения предельной чувствительности и для высокого качества разделения боковых полос, принципиально важно иметь СИС-смесители с низким уровнем отражения. Низкий уровень отражений нужен как по входу смесителя, т.е. на частоте принимаемого сигнала, на высокой частоте (ВЧ) [4] [5], так и по выходу, т.е. на промежуточной частоте (ПЧ, IF). В тракте ПЧ такая необходимость обусловлена возникновением стоячих волн между самим СИС-смесителем и криогенным малошумящим усилителем, так как последний имеет достаточно высокий уровень отражения до  $\sim -6$  дБ.

Данная работа посвящена определению уровня отражений от СИС-смесителя в рабочем режиме с целью минимизации этого уровня в будущем. Для решения поставленной задачи проведен теоретический расчет уровня отражения от СИС-смесителя по выходному тракту ПЧ, а также собрана экспериментальная схема, и проведено непосредственное измерение отраженного сигнала.

Полученные результаты могут быть применимы для лучшей характеристики СИС-смесителей и оптимизации их работы.

## 2 Литобзор

На данный момент достаточно много научных статей, посвященных изучению криогенных приемников на основе туннельного перехода СИС и их различных характеристик. Однако, на настоящий момент нет опубликованных материалов и результатов экспериментов с прямым измерением уровня отражения по промежуточной частоте от СИС-смесителя.

В работе Serres et al. [7], посвященной определению выходного импеданса СИС-смесителя по промежуточной частоте, приведено сравнение теоретических расчетов и экспериментальных результатов. Цель данной статьи достаточно близка к нашей, поскольку определение импеданса необходимо для получения уровня отражения. Предложена модифицированная однопортовая экспериментальная схема с использованием циркулятора. Особенностью калибровки является то, что сам СИС-смеситель используется как калибратор, двигаясь по его вольт-амперной характеристике (ВАХ) можно получить три калибровочных стандарта (SOL). Причем, такая калибровка позволяет учесть собственную емкость и индуктивность перехода. Численный расчет импеданса смесителя опирается на теорию Tucker et al. [1].

### 2.1 Теоретическое описание

Величина отражений от СИС-смесителя по тракту ПЧ, характеризующаяся параметром  $S_{11_{IF}}$  [6], может быть определена, если известен выходной импеданс ПЧ СИС-смесителя  $Z_{IF}$  и импеданс подводящей линии тракта ПЧ  $Z_L$

$$S_{11_{IF}} = \frac{Z_{IF} - Z_L}{Z_{IF} + Z_L} \quad (1)$$

Для расчета мы используем 3х частотное приближение к теории квантового смешения Tucker [1]. Рассмотрены сигналы на частотах  $f_m = m \cdot f_{LO} + f_0$ , где  $m = 0, \pm 1$ ;  $f_{\pm}$  - верхняя и нижняя полосы;  $f_{LO}$  - частота опорного генератора;  $f_0$  - промежуточная частота. Полагаем, что более высокие гармоники шунтируются емкостью СИС-смесителя, составляющей в нашем случае порядка 100 фФ. Принимая во внимание взаимодействие портов смесителя, компоненты напряжений и токов слабых сигналов линейно связаны матрицей проводимости  $i_m = \sum_{m'} Y'_{mm'} v_{m'}$  :

$$Y'_{mm'}(V_{gap}, R_N, f_{LO}, \alpha, V_0) = \begin{bmatrix} Y_{11} + Y_S & Y_{10} & Y_{1-1} \\ Y_{01} & Y_{00} + Y_L & Y_{0-1} \\ Y_{-11} & Y_{-10} & Y_{-1-1} + Y_I \end{bmatrix} \quad (2)$$

где  $V_{gap}$  - напряжение смещения туннельного скачка тока,  $R_N$  - нормальное дифференциальное сопротивление ВАХ,  $\alpha = eV_{LO}/hf_{LO}$  - безразмерный параметр накачки, пропорциональный напряжению опорного генератора  $V_{LO}$ ,  $V_0$  - напряжение смещения СИС-смесителя.

У каждого порта есть своя канальная проводимость:  $Y_1 = Y_S$  - нагрузка порта с принимаемым сигналом,  $Y_0 = Y_L$  - нагрузка порта ПЧ,  $Y_{-1} = Y_I$  - нагрузка порта нижней полосы.

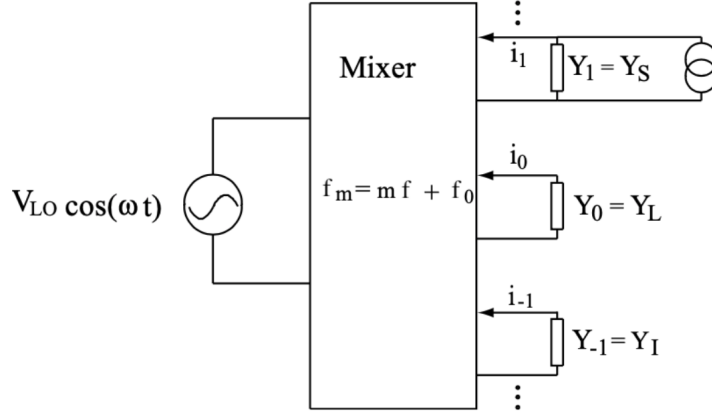


Рис. 1: Эквивалентная схема гетеродинного смесителя, с приложенным сигналом опорного генератора частоты , принимаемым сигналом частоты и сигналом ПЧ

Для идеального двухполосного смесителя импедансы верхней и нижней полос равны  $Y_1 = Y_{-1}$ . В нашем случае  $Y_{\pm 1}$  - результат преобразования проводимости опорного генератора несколькими микрополосковыми линиями.

Воспользовавшись результатом [1], получим  $Y_{mm'} = G_{mm'} + iB_{mm'}$  , где

$$G_{mm'} = \frac{e}{2\hbar\omega_{m'}} \cdot \sum_{n,n'=-\infty}^{\infty} J_n(\alpha) J_{n'}(\alpha) \delta_{m-m',n'-n} \quad (3)$$

$$\{ [I_{dc}(V_0 + n'\hbar\omega/e + \hbar\omega_{m'}/e) - I_{dc}(V_0 + n'\hbar\omega/e)] +$$

$$[I_{dc}(V_0 + n\hbar\omega/e) - I_{dc}(V_0 + n\hbar\omega/e - \hbar\omega_{m'}/e)] \}$$

$$B_{mm'} = \frac{e}{2\hbar\omega_{m'}} \cdot \sum_{n,n'=-\infty}^{\infty} J_n(\alpha) J_{n'}(\alpha) \delta_{m-m',n'-n} \quad (4)$$

$$\{ [I_{kk}(V_0 + n'\hbar\omega/e + \hbar\omega_{m'}/e) - I_{kk}(V_0 + n'\hbar\omega/e)] -$$

$$[I_{kk}(V_0 + n\hbar\omega/e) - I_{kk}(V_0 + n\hbar\omega/e - \hbar\omega_{m'}/e)] \}$$

Где  $I_{dc}(V_0)$  - зависимость туннельного тока СИС-смесителя от его напряжения;  $I_{kk}(V_0)$  - зависимость соотношения Крамерса-Кронига тока  $I_{dc}$  от напряжения СИС-смесителя;  $J_n(\alpha)$  - функция Бесселя порядка от параметра накачки  $\alpha$  . Тогда, в нашем случае импеданс по ПЧ:

$$Z_{IF} = \|Y_{mm'} + Y_m \delta_{mm'}\|_{00}^{-1} \quad (5)$$

На рис.2 продемонстрирована измеренная ВАХ СИС-перехода, которая является зависимостью  $I_{dc}(V_0)$  и определяет  $I_{kk}$ . Автономная кривая показана зеленой линией,

при этом, оранжевой кривой показана ВАХ для случая, когда приложен внешний сигнал генератора частотой 600 ГГц.

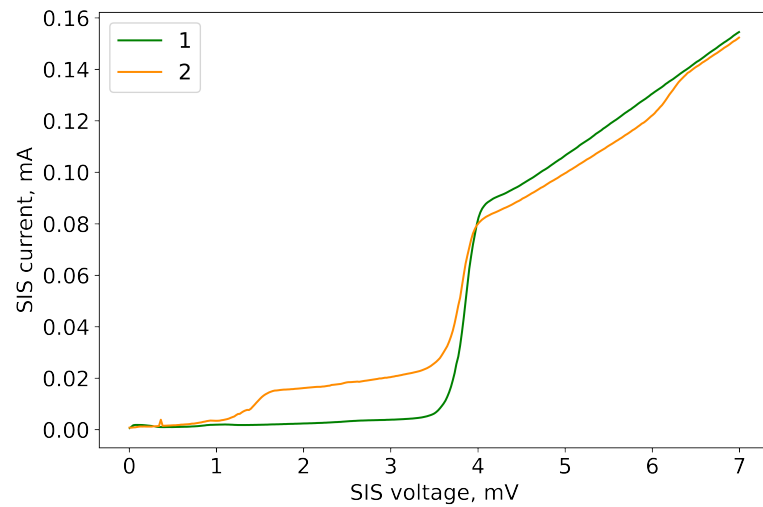


Рис. 2: ВАХ автономная (№1 зеленая кривая) и с приложенным сигналом опорного генератора (№2 оранжевая кривая).

На рис.3 приведен результат теоретического расчета импеданса с использованием ВАХ (рис.2) в диапазоне ПЧ 0.1-12 ГГц при различных напряжениях на СИС-переходе: 2.8, 3, 3.2 мВ, причем импеданс подводящей линии полагается  $\sim 50$  Ом. Можно заключить, что действительная часть изменяется незначительно с промежуточной частотой, в отличие от мнимой части. Также видно, что импеданс сильно зависит от напряжения на СИС-переходе.

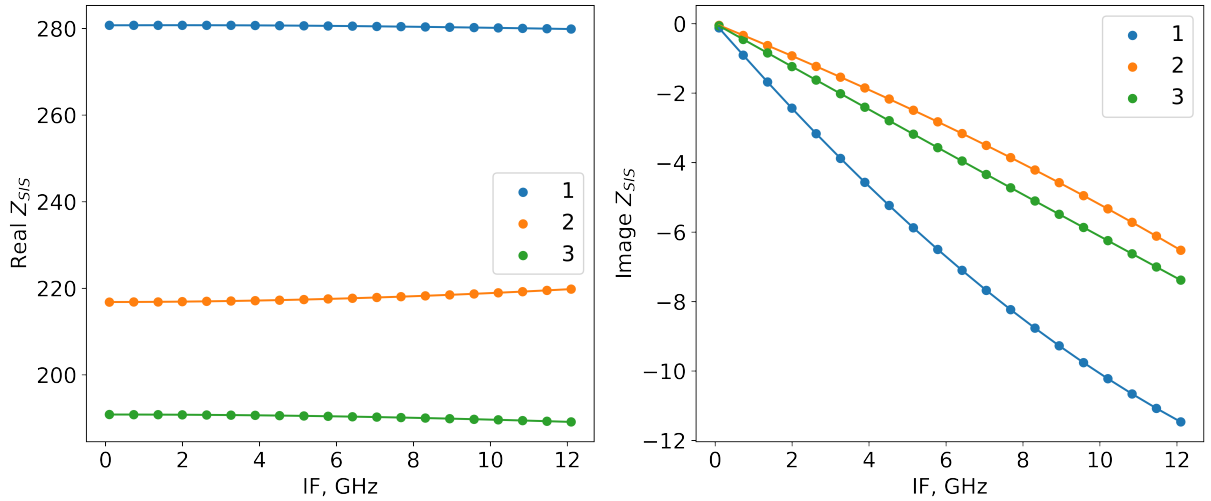


Рис. 3: Действительная (слева) и мнимая (справа) части расчетного импеданса СИС-смесителя от ПЧ при разных напряжениях на СИС-смесителе; №1 – 2.8 мВ, №2 – 3 мВ, №3 – 3.2 мВ.

## 2.2 Постановка эксперимента

Задача эксперимента - измерение уровня отражения от СИС-смесителя по выходному каналу ПЧ, когда на смеситель подается напряжение смещения и приложен сигнал высокочастотного опорного генератора. Измерения проведены в диапазоне 4–8 ГГц; этот диапазон определен полосой используемого криогенного ПЧ усилителя. Схема эксперимента представлена на Рис.4; СИС-смеситель помещен в криостат замкнутого цикла при температуре около 4 К. Высокочастотный опорный генератор (LO) интегрирован с СИС-смесителем на одном чипе и представляет собой распределенный джозефсоновский переход с вязким течением магнитных вихрей (РДП, FFO). Векторный анализатор цепей (ВАЦ, VNA), размещенный вне криостата, генерирует тестовый сигнал диапазона 4–8 ГГц на порте (П1, P1), который, проходя через аттенуатор -10 дБ, поступает в направленный ответвитель (Directional coupler), который направляет его на СИС-смеситель с коэффициентом связи около -10 дБ. Далее сигнал проходит специальный инжектор (Bias Tee), позволяющий беспрепятственно проходить ПЧ сигналу, задавая при этом напряжение на СИС-смесителе по постоянному току через большую индуктивность. Отразившись от СИС-смесителя, основная часть сигнала проходит напрямую через направленный ответвитель и поступает на вход криогенного малошумящего усилителя (LNA), который усиливает этот сигнал и направляет его на приемный порт (П2, P2) ВАЦ. Фактически, измеряемым параметром является отношение сигналов ВАЦ на портах П1 и П2, а точнее его спектр.

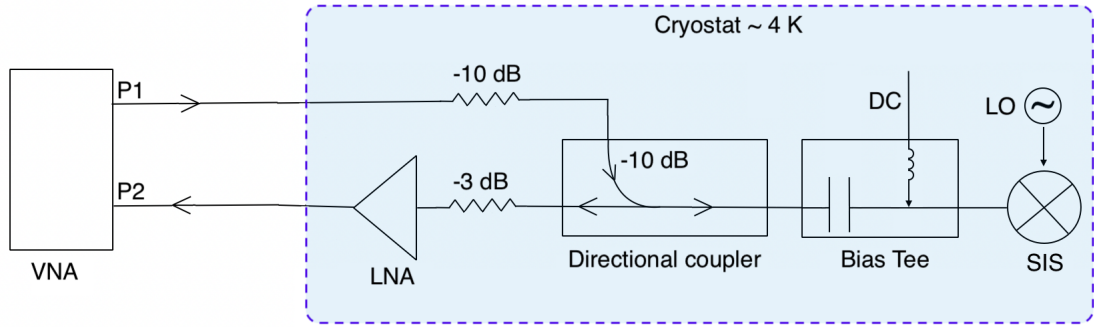


Рис. 4: Схема эксперимента по измерению отражения от СИС-смесителя по выходу ПЧ

## 2.3 Калибровка

Важным этапом в эксперименте является калибровка ВАЦ, чтобы повысить точность измерений. Мы используем стандартную однопортовую калибровку (Рис. 5), в основе которой лежит определение 3х параметров цепи:  $D$  - прямые утечки в цепи,  $R$  - внутреннее отражения,  $M$  - рассогласование. Путем несложных преобразований, можно явно выразить фактический коэффициент отражения  $\Gamma$  через измеряемую величину  $\Gamma_m$  и 3 калибровочных параметра  $D$ ,  $R$ ,  $M$ :

$$\Gamma = \frac{\Gamma_m - D}{R + M(\Gamma_m - D)} \quad (6)$$

Коэффициенты  $D$ ,  $R$ ,  $M$  могут быть определены по трем калибровочным измерениям, путем составления и решения системы из трех уравнений (6), где коэффициент отражения вычисляется теоретически по формуле (1), а величина непосредственно измеряется векторным анализатором цепей.

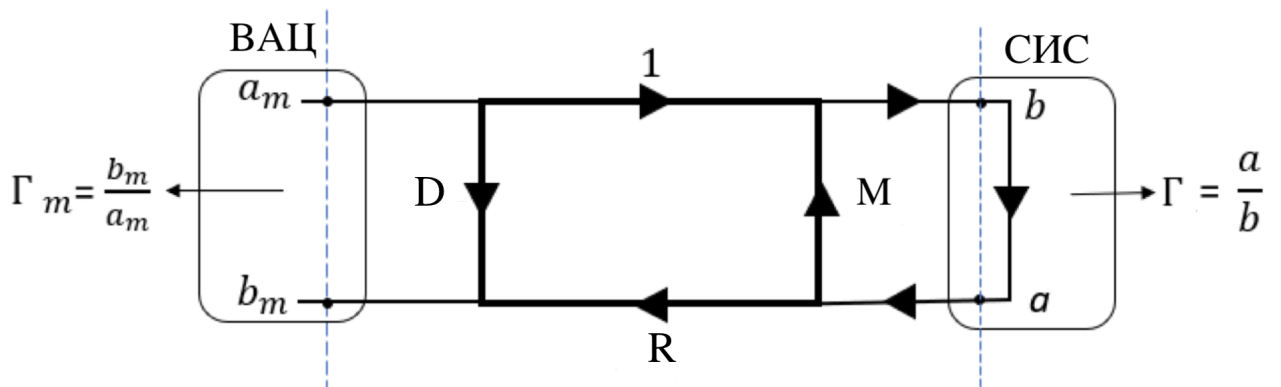


Рис. 5: Схема однопортовой калибровки.

В калибровочных измерениях при 4 К сам СИС-переход используется как калибратор [7]. Это позволяет избежать погрешностей, возникающих при калибровке при комнатной

температуре и связанных с изменениями электрической длины и импеданса элементов цепи при охлаждении. СИС-смеситель находится в автономном состоянии, т.е. без приложения внешнего сигнала.

На Рис. 6 проиллюстрировано, какие напряжения смещения используются для калибровки: 1) при напряжении смещения в 2 мВ дифференциальное сопротивление становится порядка 1000 Ом, что близко к ситуации «открытой цепи», т.к. импеданс подводящей линии близок к величине Ом; 2) при напряжении смещения 3.8 мВ, т.е. посередине туннельного скачка тока, его дифференциальное сопротивление составляет около 3 Ом, что приближенно соответствует калибровке «короткое замыкание»; 3) при напряжении смещения 5–7 мВ дифференциальное сопротивление становится Ом, что близко к ситуации «нагруженной линии».

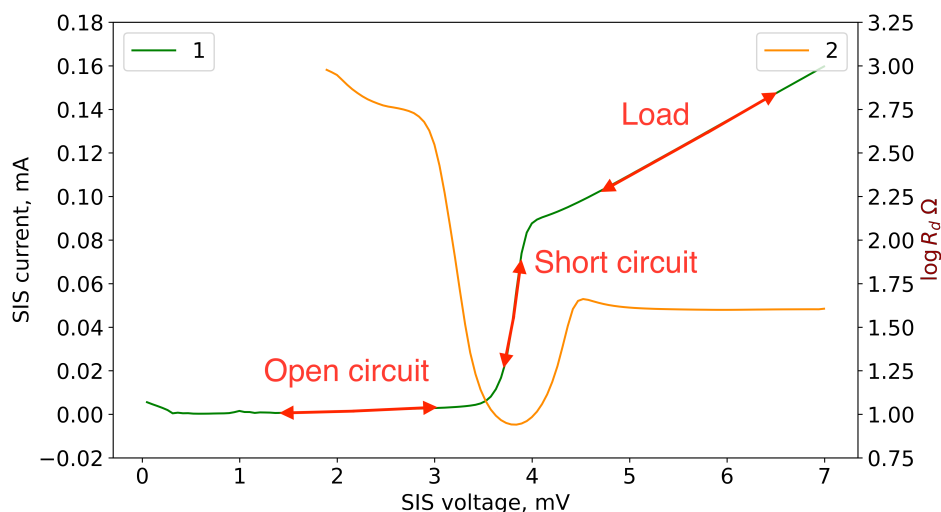


Рис. 6: Автономная Вольт-амперная характеристика СИС-смесителя №1 зеленая линия; соответствующее дифференциальное сопротивление показано оранжевой линией №2.

Этих трех калибровок достаточно, чтобы составить 3 уравнения используя (6) и тем самым определить коэффициенты  $D$ ,  $R$  и  $M$ . Это позволяет учесть все отражения и утечки в цепи и корректно измерить отражение от СИС-смесителя в рабочем режиме. Стоит отметить, что в приведенной калибровке внутренняя емкость СИС-смесителя выступает как часть внешней цепи и ее влияние также нивелируется калибровкой.



## Список литературы

- [1] Tucker J. R. et al., Quantum limited detection in tunnel junction mixers. IEEE J. Quantum Electron., **QE-6**, 11, 1234 (1979).
- [2] Belitsky, V., Bylund, M., Desmaris, V., Ermakov, A., Ferm, S.E., Fredrixon, M., Krause, S., Lapkin, I., Meledin, D., Pavolotsky, A. and Rashid, H., ALMA Band 5 receiver cartridge-Design, performance, and commissioning. Astronomy & Astrophysics, 611, p.A98 (2018)
- [3] Chenu, J.Y., Navarrini, A., Bortolotti, Y., Butin, G., Fontana, A.L., Mahieu, S., Maier, D., Mattiocco, F., Serres, P., Berton, M. and Garnier, O., The front-end of the NOEMA interferometer. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 6(2), 223 (2016)
- [4] Hesper, R., Khudchenko, A., Baryshev, A.M., Barkhof, J. and Mena, F.P., A high-performance 650-GHz sideband-separating mixer—design and results. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 7(6), 686 (2017)
- [5] Khudchenko, A., Hesper, R., Barkhof, J., Mena, F.P. and Baryshev, A.M., September. Comprehensive Description of Sideband Ratio of 2SB SIS Receiver. In 2019 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz) (pp. 1-2). IEEE. (2019)
- [6] Kooi J.W., Advanced Receivers for Submillimeter and Far Infrared Astronomy. Print Partners Ipskamp B.V., Enschede, The Netherlands, ISBN 978-90-367-3653-4 (2008)
- [7] Serres P. et al., The IF Output Impedance of SIS Mixers. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, **5**, 1, 27 (2015)
- [8] Barichev A.M., Superconductor-Insulator-Superconductor THz Mixer Integrated with a Superconducting Flux-Flow Oscillator. PhD thesis, Delft University of Technology, ISBN 90-9019220-4 (2005)
- [9] Shen T.M., Conversion gain in millimeter wave quasi-particle heterodyne mixers. IEEE J. Quantum Electronics, **17**, 7, 1151 (1981)