

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



B-191

P13 - 10958

ЛЯП

Б.В.Васильев, Г.С.Кривой

109/4-78

СМЕШЕНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ СИГНАЛОВ
НА РЕЗИСТИВНОМ СКВИДЕ

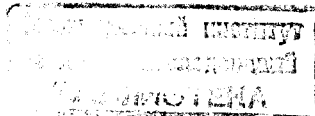
1977

P13 - 10958

Б.В.Васильев, Г.С.Кривой

СМЕШЕНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ СИГНАЛОВ
НА РЕЗИСТИВНОМ СКВИДЕ

Направлено в журнал "Радиотехника и электроника"



Васильев Б.В., Кривой Г.С.

P13 - 10958

Смещение низкочастотных сигналов на резистивном скивде

Экспериментально исследовано смещение низкочастотных сигналов в диапазоне частот 1600 Гц-200 кГц на резистивном скивде. В качестве гетеродинных колебаний использовалась джозефсоновская генерация, возникающая в резистивном скивде при пропускании через него постоянного тока. На частоте сигнала 10 кГц приведенная ко входу смесителя спектральная плотность напряжения шумов составила $\sim 5 \cdot 10^{-12}$ В·Гц^{-1/2}.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1977

Vasiliev B.V., Krivoy G.S.

P13 - 10958

Mixing of Low-Frequency Signals on a Resistive Squid

A mixing of low-frequency signals on a resistive squid has been studied experimentally within the frequency range 1.6-200 kHz. For the heterodyne signal the d.c. Josephson effect on a resistive squid was used. The spectral density of noise voltage reduced to mixer entrance at a signal frequency 10 kHz was equal to $\sim 5 \cdot 10^{-12}$ V·Hz^{-1/2}.

The investigation has been performed at the Neutron Physics Laboratory, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1977

Резистивный скивд /рескви́д/ /1/ может быть использован для смещения низкочастотных сигналов /2/. В работе /3/ был исследован гетеродинный смеситель на рескви́де, в котором в качестве сигнала гетеродина использовалась джозефсоновская генерация, возникающая на рескви́де, когда на его резистивную вставку подано постоянное напряжение. Сигнал с частотой f_s подводился к рескви́ду за счет взаимной индуктивной связи между рескви́дом и катушкой индуктивности, подключенной к генератору сигнала. Частота джозефсоновской генерации в рескви́де f_J определяется по формуле /1/ :

$$f_J = \frac{R I_0}{\Phi_0} \sqrt{1 - \left(\frac{\bar{I}_m}{I_0}\right)^2} \quad /1/$$

где R - сопротивление резистивной вставки рескви́да; I_0 - ток, протекающий через рескви́д от внешнего источника тока; $\Phi_0 = 2,07 \cdot 10^{-15}$ Вб - квант магнитного потока; \bar{I}_m - амплитуда среднего тока в рескви́де, причем $\bar{I}_m \leq \Phi_0 / 2L$ (L - индуктивность рескви́да, обычно $L \leq 10^{-9}$ Г).

При $I_0 \gg \bar{I}_m$ подкоренное выражение в /1/ отличается от единицы на малую величину, и частота f_J , используемая в качестве гетеродинной, зависит линейно от тока I_0 , что позволяет линейно изменять частоту гетеродина извне. В переходе Джозефсона частоты f_s и f_J смешивались, давая промежуточную частоту /ПЧ/ f_{im} . С рескви́дом в работе /3/ был связан LC-контур, настроенный на частоту $f_{im} \sim 30$ МГц. LC-контур был подключен ко входу резонансного усилителя промежуточной частоты /УПЧ/. Далее схема ничем не от-

личалась от обычных АМ-приемников. Полоса пропускания тракта ПЧ составляла $\sim 10^5$ Гц. При смещении низкочастотных сигналов с частотами $f_s \sim 10^4$ Гц в полосе пропускания тракта ПЧ оказывалась и частота гетеродина f_J , т.к. $f_{im} = f_J \pm f_s$.

Нами была исследована структурная схема смесителя, позволяющая ослабить проникновение сигнала с частотой f_s в тракт ПЧ. Структурная схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Низкотемпературная часть установки находится в гелиевой ванне при температуре 4,2 К и окружена сверхпроводящим

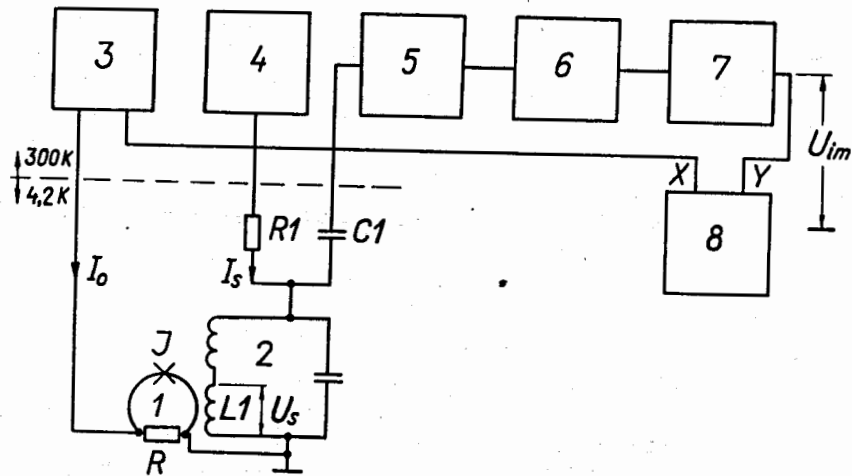


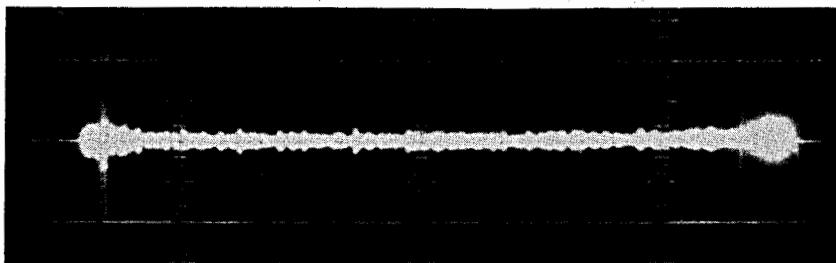
Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки. 1 - ресквид; 2 - резонансный колебательный контур; настроенный на частоту ~ 10 МГц; 3 - генератор линейно нарастающих импульсов тока; 4 - генератор сигнала; 5 - широкополосный усилитель высокой частоты, работающий в автогенерационном режиме; 6 - амплитудный детектор; 7 - узкополосный усилитель ПЧ, настроенный на частоту ~ 800 Гц; 8 - осциллограф.

экраном. Ресквид 1 индуктивно связан с частью индуктивности колебательного контура 2, настроенного на частоту ~ 10 МГц. Ресквид имеет конструкцию, аналогичную описанной нами ранее^{/1/}; сопротивление его

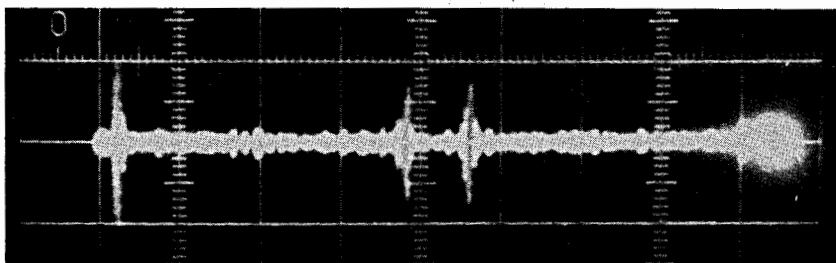
резистивной вставки $R \sim 5 \cdot 10^{-8}$ Ом. Слабая связь J выполнена в виде точечного оксидированного ниобиевого контакта. К рескvidу подключен источник тока 3. Входной цепью смесителя является часть индуктивности колебательного контура - катушка L1. Напряжение сигнала U_s на катушке L1 создается током I_s , поступающим от генератора сигнала 4 через развязывающий резистор R1. К колебательному контуру через разделительный конденсатор C1 подключен широкополосный высокочастотный усилитель 5, работающий в автогенерационном режиме^{/1/}, и амплитудный детектор 6, на выходе которого включен узкополосный низкочастотный усилитель ПЧ 7. С выхода усилителя 7 сигнал поступает на канал вертикального усиления осциллографа 8. На горизонтальные пластины осциллографа поступает напряжение от генератора тока 3. Генератор 3 генерирует импульсы тока I_0 с линейно нарастающим фронтом, которые изменяют частоту f_J в соответствии с^{/1/}. Напряжение, поступающее с генератора 3 на пластины X осциллографа, повторяет по форме ток I_0 и, таким образом, осуществляет развертку по частоте гетеродина.

Частота f_J изменяется за один период развертки от нуля до некоторого максимального значения, определяемого амплитудой импульсов тока от генератора 3. Если в ресквиде циркулирует ток с частотой, меньшей, чем полуширина полосы пропускания колебательного контура, то происходит амплитудная модуляция напряжения на контуре с частотой циркулирующего в ресквиде тока, как описано в^{/1/}. Это напряжение с контура усиливается усилителем 5 и детектируется детектором 6. Если в спектре выходного сигнала детектора присутствуют составляющие с частотами в полосе пропускания УПЧ 7, то эти составляющие усиливаются и дают пик напряжения ПЧ U_{im} на экране осциллографа 8.

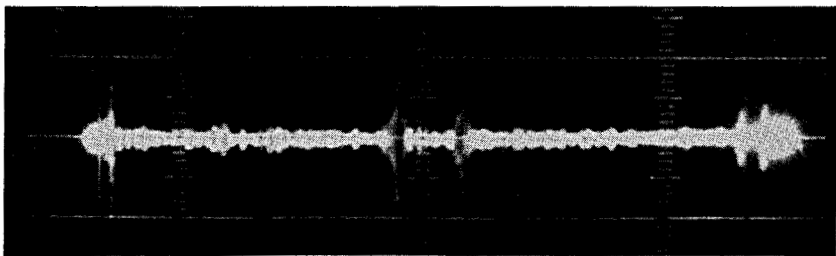
Таким образом, в ресквиде происходит смещение частот f_J и f_s , результат смещения модулирует по амплитуде напряжение на контуре, которое усиливается и детектируется, а затем выделяется промежуточная



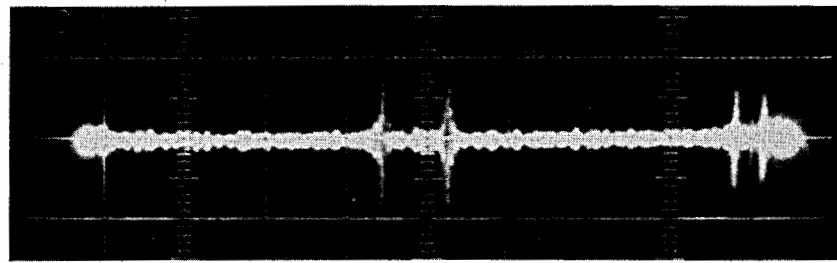
a)



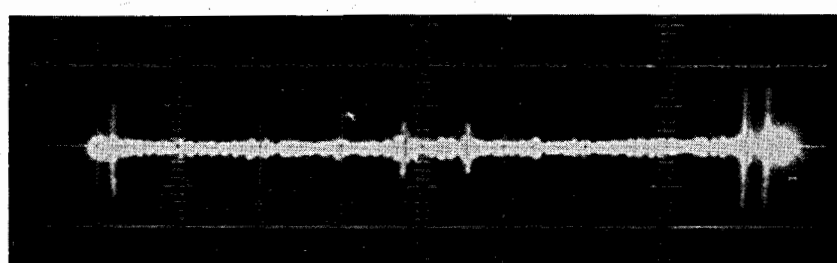
b)



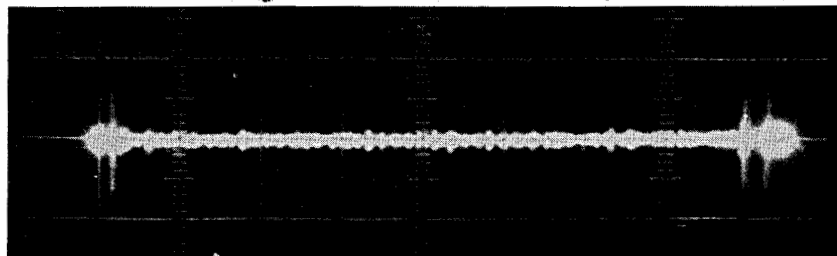
c)



d)



e)



f)

Рис. 2. Спектры, полученные в эксперименте по схеме рис. 1. По горизонтальной оси - частота гетеродина, по вертикальной - напряжение на выходе усилителя ПЧ. Диапазон развертки по частоте гетеродина 0 - 20 кГц; частота сигнала $f_s = 9916$ Гц; уровень сигнала для осциллограмм /относительные единицы/: а - 0; б - 0,36; в - 0,45; д - 0,72; е - 1,08; ф - 1,22.

частота f_{im} узкополосным УПЧ. В данном эксперименте частота f_{im} выбрана довольно низкой ~ 800 Гц, полоса пропускания УПЧ по уровню 0,7 составляет ~ 80 Гц. Ограничение сверху на частоту f_{im} налагает полоса пропускания колебательного контура, которая в нашем эксперименте определяла полосу пропускания всего ВЧ-тракта и составляла ~ 3 кГц. С другой стороны, возможно усиление сигнала с нулевой ПЧ, тогда узкополосный УПЧ 7 должен быть заменен на фильтр нижних частот.

На рис. 2 приведены фотографии с экрана осциллографа, полученные при фиксированной частоте сигнала $f = 9916$ Гц, диапазоне развертки по частоте $f_J = 0 - 20$ кГц и разных уровнях сигнала. Уровень сигнала увеличивается от верхней осциллограммы к нижней. На левом краю осциллограмм видны одиночные пики, соответствующие частоте $f_J = f_{im}$. Два пика в центре осциллограмм соответствуют частотам $f_J = f_S \mp f_{im}$, два пика на правом краю - частотам $f_J = 2f_S \mp f_{im}$. Высота пиков $f_J = f_S \mp f_{im}$ вначале растет с увеличением уровня сигнала, затем уменьшается и стремится к нулю, в то время как высота пиков $f_J = 2f_S \mp f_{im}$ нарастает. При дальнейшем увеличении уровня сигнала высота пиков $f_J = 2f_S \mp f_{im}$ также уменьшается, и появляются пики $f_J = 3f_S \mp f_{im}$, высота которых растет. Таким образом, максимум высоты пиков при увеличении амплитуды сигнала сдвигается на экране осциллографа вправо. При дальнейшем увеличении амплитуды сигнала мы наблюдали смещение максимума высоты пиков вправо вплоть до частот $f_J = 5f_S \mp f_{im}$ при $f_S \sim 10$ кГц. Был исследован диапазон частот сигнала от 1600 Гц до 200 кГц, и во всем диапазоне было получено смещение сигналов типа $f_J = f_S \mp f_{im}$.

Из осциллограммы рис. 2а видно, что при отсутствии сигнала колебания с частотой гетеродина не попадают на вход усилителя ПЧ. Действительно, при $f_J \geq 3$ кГц они ослабляются дважды: первый раз колебательным контуром, второй - усилителем ПЧ.

Для снятия статической характеристики смесителя в качестве источника тока 3 был использован стабилизированный регулируемый источник напряжения с вклю-

ченным последовательно резистором для получения режима заданного тока. Статическая характеристика смесителя $U_{im} = \phi(U_S)$ для двух частот сигнала приведена на рис. 3. Из рисунка видно, что имеется линейный

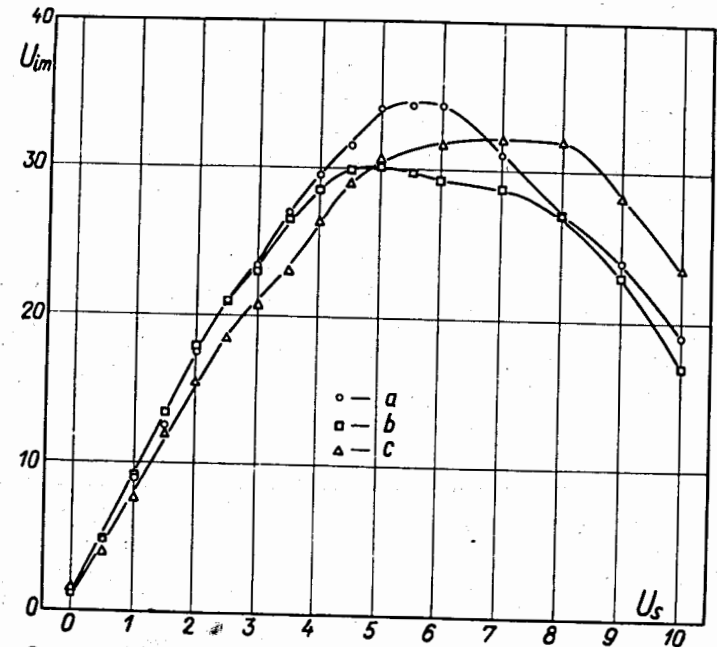


Рис. 3. Статическая характеристика смесителя на ресквиде. По горизонтальной оси - напряжение сигнала U_S в относительных единицах; по вертикальной - напряжение ПЧ U_{im} в относительных единицах. а - частота сигнала $f_J = 10$ кГц, $f_J < f_S$; б - частота сигнала $f_S = 10$ кГц, $f_J > f_S$; в - частота сигнала $f_S = 18,5$ кГц, $f_J < f_S$.

участок в начале характеристики, позволяющий использовать смеситель для усиления низкочастотных сигналов в диапазоне нескольких килогерц.

Ширина линии Δf_J гетеродинных колебаний определяется по формуле/4/

$$\Delta f_J = 4 \pi k_{BT} R / \Phi_0^2$$

где k_B - постоянная Больцмана, T - температура ресквида. Для нашего ресквида имеем $\Delta f_J \sim 9$ Гц, если температуру ресквида принять равной $T = 4,2$ К. Эта частота ограничивает снизу диапазон возможных промежуточных частот ^{/2/}. Минимальная мощность сигнала P_S , равная мощности шумов гетеродина, определяет предельную чувствительность смесителя и может быть найдена умножением Δf_J на $\approx k_B T$ ^{/2/}. В нашем случае расчет дает $P_S \approx 5 \cdot 10^{-22}$ Вт.

Мы определили экспериментально ширину линии гетеродина посредством статистического измерения дисперсии показаний частотомера, включенного на выходе УПЧ, когда $f_J \approx f_{im}$ /считая априори, что закон распределения частоты гетеродина нормальный/. С учетом дисперсии показаний частотомера была определена шумовая температура гетеродина T_n по формуле ^{/1/}

$$T_n = \tau S \Phi_0^2 / 2 k_B R, \quad /3/$$

где τ - время измерения частотомера, S - дисперсия показаний частотомера.

В результате температура T_n для двух выборок объемом 90 и 60 измерений частоты составила соответственно 11,2 и 8,4 К. Подставив эти значения T_n в формулу ^{/2/}, мы определили ширину линии гетеродина, которая составила соответственно ~ 24 и ~ 18 Гц. Эти значения ширины линии гетеродина дают, соответственно, минимальную мощность сигнала $P_S \sim 3,7 \cdot 10^{-21}$ и $\sim 2,1 \cdot 10^{-21}$ Вт, что примерно в 5 раз больше расчетной величины для $T = 4,2$ К. Такое превышение шумовой температуры ресквида над его физической температурой объясняется, вероятно, существованием в ресквиде флуктуирующей термо-э.д.с., которая появляется из-за наличия в ресквиде градиентов температуры и флуктуирует вследствие колебаний температуры гелиевой ванны.

Кроме этого косвенного метода определения чувствительности смесителя мы применяли и метод непосредственного измерения напряжения шумов, приведенного ко входной цепи смесителя, в качестве которой использовалась катушка $L1$ колебательного контура.

Для этой цели в цепи генератора сигнала измерялся ток I_S , когда на выходе УПЧ достигалось необходимое соотношение сигнал/шум. Затем по известной индуктивности катушки $L1$ и частоте сигнала было определено напряжение сигнала U_S на катушке $L1$. Так, при отношении сигнал/шум, равном двум, мы получили спектральную плотность напряжения шумов, приведенную к катушке $L1$, равную $\sim 5 \cdot 10^{-12}$ В·Гц^{-1/2} для частоты сигнала 10 кГц. Приведенная ко входной цепи мощность шумов, которая соответствует этому напряжению шумов, равна $\sim 8,8 \cdot 10^{-19}$ Вт. Следует отметить, что в этом эксперименте коэффициент связи катушки $L1$ с ресквидом составлял $\sim 0,4$. Малый по сравнению с единицей коэффициент связи приводит к уменьшению отношения сигнал/шум. Однако здесь, по-видимому, есть оптимальное соотношение для коэффициента связи с точки зрения получения максимальной чувствительности смесителя.

Таким образом, рассмотренный смеситель обладает по сравнению с описанным ^{/3/} тем преимуществом, что при смешении сигналов в диапазоне нескольких кГц частота гетеродина находится за полосой канала усиления и не проходит на выход УПЧ. Смеситель имеет на частоте 10 кГц приведенную ко входу спектральную плотность напряжения шумов $\sim 5 \cdot 10^{-12}$ В·Гц^{-1/2}, что позволяет использовать его для усиления слабых низкочастотных сигналов в указанном диапазоне. Анализ результатов эксперимента показывает, что чувствительность, предсказываемая теорией ^{/2/}, в нашем эксперименте не достигнута. Одной из причин понижения чувствительности является, на наш взгляд, потеря сигнала во входной цепи смесителя из-за возможной неоптимальной связи входной катушки с ресквидом. Перспективным в смысле повышения чувствительности может быть непосредственное включение ресквида в добротную избирательную цепь, настраиваемую на частоту сигнала.

Литература

1. Васильев Б.В., Кривой Г.С. ОИЯИ, Р13-10941, Дубна, 1977.
Васильев Б.В., Кривой Г.С. ОИЯИ, Р13-10957, Дубна, 1977.
2. Ричардс П.Л., Аурахер Ф., Ван Дузер Т. ТИИЭР, 1973, п.61, с.44.
3. Zimmerman J.E. J.Appl.Phys., 1970, v.41, p.1589.
4. Burgess R.E. In: Proc.Symp.Phys. of Supercond. Devices, Charlottesville, Va., Paper H1-H16, 1967.

*Рукопись поступила в издательский отдел
13 сентября 1977 года.*