

ПРИМЕНЕНИЕ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ РЕЗОНАТОРОВ ДЛЯ
ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЧМ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ

Ф.Ф. Менде, Н.Н. Пренцлау, О.П. Козловский, И.Н. Бондаренко

Описаны преобразователи, позволяющие осуществить перенос флуктуаций частоты СВЧ сигнала в область радиочастоты с коэффициентом преобразования порядка единицы в одном случае и порядка $10^2 - 10^3$ в другом.

Высокий коэффициент преобразования обеспечивается благодаря использованию сверхпроводящих резонаторов.

При решении ряда технических и физических задач приходится сталкиваться с вопросом высокочувствительного ЧМ детектирования. Такие вопросы, как исследование спектральных и частотных характеристик высокостабильных генераторов невозможно решить без создания высокочувствительных частотных детекторов.

Вопрос исследования частотных и фазовых флуктуаций в радиодиапазоне в настоящее время разработан в достаточной степени. Существуют серийно выпускаемые приборы, которые обеспечивают желаемую точность при определении спектральных и частотных характеристик [1,2].

В диапазоне СВЧ практически не существует достаточно надежных измерительных схем, которые бы обеспечивали уверенное обнаружение частотных и фазовых флуктуаций при относительной ширине спектра $\sim 10^{-7} - 10^{-10}$. Поэтому вопрос построения высокочувствительных ЧМ детекторов в диапазоне СВЧ приобретает особую важность. В настоящее время для такого детектирования используют в основном два метода.

Первый из них заключается в использовании специфических свойств высокодобротных резонансных систем или длинных линий, при этом используется тот факт, что такие устройства, при соответствующем выборе параметров, могут обеспечивать высокие значения $\frac{\partial U}{\partial f}$ или $\frac{\partial \varphi}{\partial f}$ [3]. Использование для этого сверхпроводящих резонаторов позволит значительно повысить крутизну преобразования, так как добротность последних может быть на несколько порядков выше, чем у обычных резонансных систем [4]. Второй способ основан на понижении частоты с последующим частотным детектированием в области низких частот.

Однако как первый, так и второй способы не лишены существенных недостатков. В случае использования резонансных систем амплитуда девиации частоты ограничена полосой пропускания резонатора и, таким образом, чем больше крутизна преобразования, тем меньше допустимая девиация. При использовании длинных линий для получения приемлемых значений $\partial \varphi / \partial f$ они должны быть очень большой длины. Второй способ является особо перспективным, однако для понижения частоты необходим высокостабильный гетеродинный СВЧ генератор, у которого абсолютная нестабильность частоты должна быть значительно ниже, чем измеряемая девиация.

В настоящей работе описан метод, который дает возможность существенно повысить чувствительность, а также расширить полосу измеряемых девиаций при ЧМ детектировании. При этом используется принцип переноса флуктуаций в область радиочастот, не требующий применения высокочастотного гетеродинного СВЧ генератора. Преобразование частоты осуществляется в преобразователе, пассивным эталон частоты в котором служит сверхпроводящий резонатор.

Блок-схема такого преобразователя изображена на рис.1. Цифрами на схеме обозначены: 1 - смеситель; 2 - амплитудный модулятор; 3 - объемный резонатор; 4 - усилитель радиочастоты.

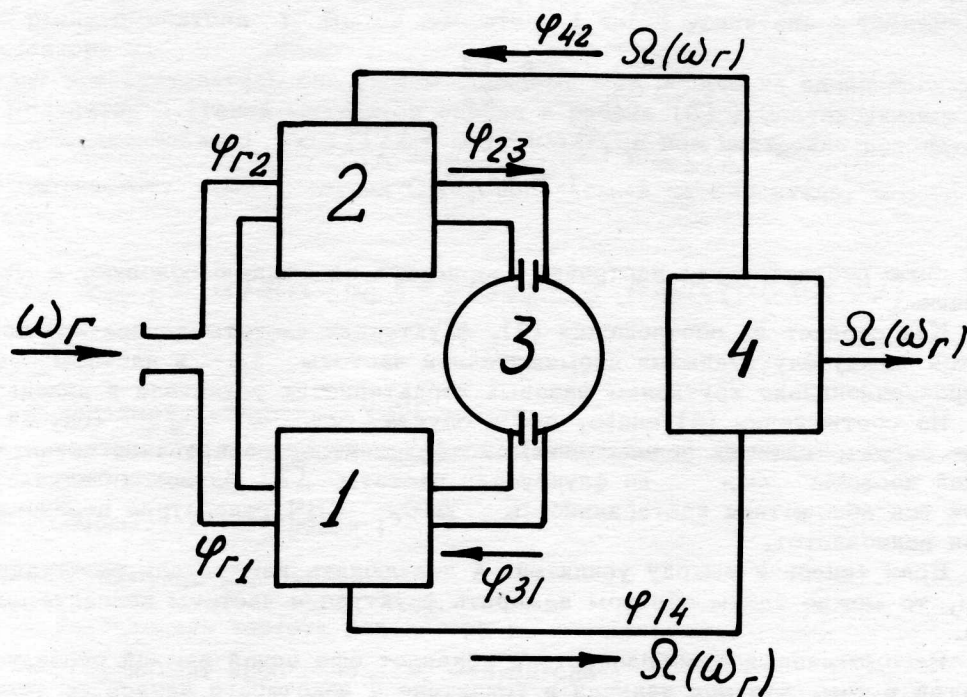


Рис. 1.

СВЧ сигнал с частотой ω_r подается на смеситель 1 и модулятор 2, между которыми включен резонатор 3, резонансная частота которого $\omega_p = \omega_r - \Omega$ или $\omega_p = \omega_r + \Omega$. Если к выходу смесителя подключить усилитель 4, настроенный на частоту Ω , а его выход соединить со входом модулятора, то в цепи смеситель-усилитель-модулятор-резонатор-смеситель можно добиться самовозбуждения и генерируемая радиочастота Ω будет функцией частоты СВЧ генератора ω_r .

Учитывая принцип переноса фаз, запишем фазовые соотношения, имеющие место в системе при самовозбуждении:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_{31} \pm \varphi_{14} = \varphi_{r1} \\ \varphi_{23} \pm \varphi_{31} = \varphi_{r2} \\ \varphi_{31} - \varphi_{23} = \tau_3 \Delta \omega_p \\ \varphi_{31} - \varphi_{14} = \tau_4 \Delta \Omega \\ \varphi_{r1} = \varphi_{r2} \\ \Delta \omega_p \pm \Delta \Omega = \Delta \omega_r, \end{array} \right. \quad (1)$$

где $\Delta \omega_p$, $\Delta \omega_r$, $\Delta \Omega$ - флуктуации соответствующих частот;
 τ_3 и τ_4 - крутизны фазовых характеристик резонатора и усилителя соответственно.

Буквами φ обозначены фазы соответствующих сигналов, причем, первый индекс показывает, от какого элемента поступает сигнал, а второй—куда он поступает. Обозначения фаз понятны также из блок-схемы рис.1.

Путем исключения фаз из системы уравнений (1) можно получить следующие соотношения :

$$\frac{\Delta\Omega}{\Delta\omega_r} = \pm \frac{\tau_3}{\tau_4}, \quad (2)$$

$$\Delta\Omega = \pm \frac{1}{1 + \tau_4/\tau_3} \Delta\omega_r. \quad (3)$$

Знак плюс соответствует настройке резонатора на нижнюю боковую, а минус — на верхнюю.

Как следует из соотношения (2), флуктуации частоты генератора перераспределяются между флуктуациями промежуточной частоты Ω и частоты ω_r обратно пропорционально крутизнам фазовых характеристик усилителя и резонатора.

Из соотношения (3) видно, что в случае $\tau_3 \gg \tau_4$ (случай использования сверхпроводящих резонаторов), коэффициент преобразования абсолютных флуктуаций частоты ω_r во флуктуации частоты Ω близок к единице, т.е. почти вся абсолютная нестабильность $\Delta\omega_r$ СВЧ генератора переносится в диапазон радиочастот.

Если теперь к выходу усилителя 4 подключить измеритель флуктуаций радиочастоты, то можно таким образом измерить флуктуации частоты исследуемого генератора.

Рассмотренный преобразователь обладает еще одной важной особенностью, состоящей в том, что при наличии в усилителе 4 некоторого запаса по усилению, устройство будет устойчиво работать до тех пор, пока частота Ω не выйдет за полосу пропускания усилителя 4, а так как при выполнении условия $\tau_3 \gg \tau_4$ имеется почти полное соответствие между изменениями Ω и ω_r , что следует из соотношения (3), то интервал допустимых изменений частоты ω_r определяется не полосой пропускания резонатора, а полосой пропускания усилителя 4.

Отсюда видно, что если вместо усилителя 4, настроенного на частоту Ω , между смесителем и модулятором включить широкополосный усилитель [5], то можно значительно увеличить диапазон измеряемых флуктуаций СВЧ генератора. Это дает возможность существенно расширить диапазон измеряемых флуктуаций без уменьшения крутизны преобразователя.

Из сказанного выше видно, что предлагаемый метод лишен тех недостатков, которые имеются при использовании в качестве частотного детектора сверхпроводящего резонатора.

Рассмотрим еще один преобразователь, позволяющий измерять с высокой чувствительностью флуктуации частоты и фазы высокостабильных СВЧ генераторов. Блок-схема преобразователя приведена на рис.2.

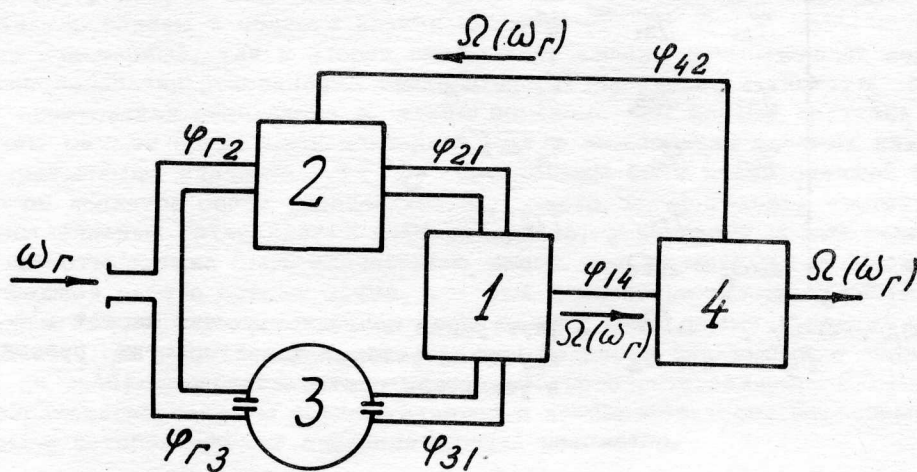


Рис. 2.

Цифрами на схеме обозначены: 1 - смеситель; 2 - однополосный балансный модулятор; 3 - объемный резонатор; 4 - усилитель.

Источник измеряемой частоты ω_r подключен ко входу эталонного резонатора 3 и однополосного модулятора 2. Выходы резонатора 3 и модулятора 2 подключены ко входу смесителя 1. Выход смесителя 1 через усилитель 4 соединен со входом модулятора 2.

Работает преобразователь следующим образом. При подаче на однополосный балансный модулятор 2 (такой модулятор описан в работе [6]) модулирующего напряжения, пропорционального $\cos(\Omega t + \varphi_0) = \cos \Theta$, и при настройке резонатора на измеряемую частоту ω_r , сигнал СВЧ, подаваемый на смеситель, может быть записан в виде

$$e(t, \alpha) = E_{or} \left\{ B(\alpha) \sin[\omega_r t + \eta(\alpha)] + \frac{m}{2} \beta \sin(\omega_r t \pm \Theta) \right\}, \quad (4)$$

где E_{or} - напряженность поля в СВЧ тракте;

$B(\alpha)$ и $\eta(\alpha)$ - соответственно модуль и фаза комплексного коэффициента передачи резонатора 3;

$\alpha = \frac{2Q_4 \Delta \omega_r}{\omega_r}$ - обобщенная расстройка;

$\Delta \omega_r = \omega_r - \omega_p$ - абсолютная расстройка;

ω_p - резонансная частота резонатора;

β - коэффициент преобразования модулятора;

m - коэффициент амплитудной модуляции.

Если считать детектор смесителя 1 квадратичным, то после преобразований можно получить на его выходе сигнал на частоте модуляции Ω

$$e_c(t, \alpha) = \alpha \cdot \beta \cdot \frac{m}{2} E_{or}^2 B(\alpha) \cos[\Theta \mp \eta(\alpha)], \quad (5)$$

где α - коэффициент преобразования смесителя.

Как видно из соотношения (5), фаза сигнала на частоте Ω зависит от расстройки α .

При выполнении амплитудных и фазовых условий самовозбуждения система возбуждается на частоте, лежащей в полосе пропускания усилителя 4. Частота $\Omega(\omega_r)$ будет функцией расстройки $\chi \sim \omega_r - \omega_p$, а при высокой эталонности резонатора ($\omega_p = \text{const}$) все флуктуации ω_r будут однозначно переноситься на частоту $\Omega(\omega_r)$. Учитывая принцип переноса фаз, рассмотрим фазовые соотношения в режиме самовозбуждения:

$$\begin{cases} \varphi_{31} - \varphi_{r3} = \tau_3 \Delta \omega_r \\ \varphi_{42} - \varphi_{r4} = \tau_4 \Delta \Omega \\ \varphi_{21} \pm \varphi_{r4} = \varphi_{31} \\ \varphi_{21} \pm \varphi_{42} = \varphi_{r2} \end{cases} \quad (6)$$

Все обозначения те же, что и в соотношениях (1). Обозначения фаз также понятны из блок-схемы (см. рис. 2). Знак плюс соответствует получению от модулятора одной нижней, а минус - верхней боковой.

Путем исключения фаз из системы уравнений (4) можно получить следующее соотношение

$$\Delta\Omega = \mp \frac{\tau_3}{\tau_4} \Delta\omega_r. \quad (7)$$

Из соотношения (5) следует, что коэффициент преобразования флуктуаций частоты генератора СВЧ $\Delta\omega_r$ в флуктуации радиочастоты $\Delta\Omega$ равен $\frac{\tau_3}{\tau_4}$. Реально крутизна фазовой характеристики резонатора τ_3 обычно всегда больше крутизны фазовой характеристики усилителя τ_4 , а при использовании сверхпроводящих резонаторов отношение $\frac{\tau_3}{\tau_4}$ может составлять два - три порядка.

Данный преобразователь позволяет осуществлять измерение очень малых флуктуаций частоты, но имеет малый диапазон измеряемых флуктуаций, определяемый полосой пропускания резонатора.

Таким образом, рассмотренные преобразователи позволяют значительно повысить чувствительность измерения флуктуаций частоты в области СВЧ диапазона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аппаратура для частотных и временных измерений, под ред. А.П. Горшкова, "Советское радио", 1971.
2. Г.Я. Мирский, Аппаратурное определение характеристик случайных процессов, "Энергия", 1967.
3. С.И. Бычков, Н.И. Буренин, Р.Т. Сафаров, Стабилизация частоты генераторов СВЧ, "Советское радио", 1962.
4. Ю.В. Дедик, К.П. Иваницкий, З.Ф. Каплун, Электронная техника, сер.1, Электроника СВЧ, вып. 10, стр.88, 1969.
5. Ф.Ф. Менде, И.Н. Бондаренко, И.Б. Иевенко, Высокостабильный перестраиваемый СВЧ генератор со сверхпроводящим резонатором (настоящий сборник).
6. Дж.Альтман, Устройства СВЧ, "Мир", М., 1968.

APPLICATIONS OF SUPERCONDUCTING RESONATORS FOR HIGHLY SENSITIVE FREQUENCY MODULATION DETECTION

F.F. Mende, N.N. Prentslau, O.P. Kozlovsky, I.N. Bondarenko

The description is given of transformers which can transfer the signal of ultra-high frequency oscillation to the rf region. The conversion ratio is of the unit order in one case and about 10^2 - 10^3 in the other.

A high conversion ratio has been achieved due to using superconducting resonators.

Получена редколлегией 16 ноября 1972 года.