

УДК 621.373.1

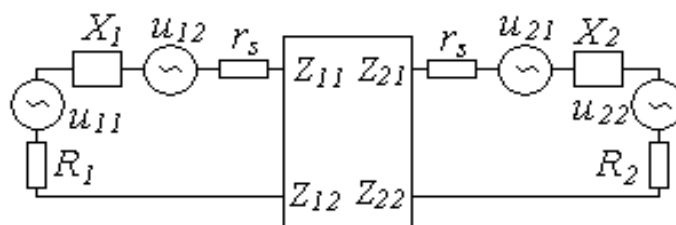
Н.Н. Ворсин

ГЕНЕРАЦИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ШУМА НА ОСНОВЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

Приводятся результаты исследований параметрических генераторов шума, представляющих собой параметрические преобразователи частоты вверх. Эквивалентная шумовая температура сигнала таких генераторов шума может быть сделана в несколько раз меньше их физической температуры, что позволяет заменить ими в ограниченном частотном диапазоне криогенные генераторы шума.

К настоящему времени известны СВЧ-устройства [1], построенные на нелинейных или невзаимных элементах (диодах, транзисторах), которые представляют собой радиационный холодильник и способны выполнять функцию генератора шума (ГШ), у которого шумовая температура сигнала оказывается существенно ниже физической температуры генерирующего элемента. Эффект радиационного холодильника на основе нелинейного резистора не является удивительным, и для него существуют термодинамическая [2] и статистическая [3] теории. Ниже приведено описание еще одного прибора, обладающего свойством радиационного холодильника, действующего на основе параметрического эффекта.

Основой для построения параметрического ГШ является параметрический преобразователь частоты вверх (ППВ), который является невзаимным устройством. Сигнал низкой частоты, поступающий в низкочастотный порт ППВ, передается в высокочастотный порт с усилением мощности, а передача сигнала в обратном направлении сопровождается ослаблением мощности. Благодаря данному свойству невзаимности, существует возможность создать однонаправленный поток мощности теплового шума от цепи с меньшей физической температурой в цепь с большей физической температурой, где эта мощность рассеивается в окружающую среду. Для определения условий функционирования этого механизма выразим эквивалентную шумовую температуру выходного сигнала параметрического ГШ через параметры его эквивалентной цепи, показанной на рисунке 1.



Элементы НЧ-резонатора имеют первый индекс 1, элементы ВЧ-резонатора – первый индекс 2. Каждый из резонаторов включает в себя импеданс варактора, сопротивление потерь варактора r_s с его источником шума u_{12} , u_{21} , индуктивный реактианс X , сопротивление нагрузки R с источником шума u_{11} , u_{22}

Рисунок 1 – Эквивалентная схема ППВ

На данном рисунке параметрический диод-варактор представлен в виде эквивалентного четырехполюсника [4] с z-параметрами:

$$\begin{aligned} z_{11} &= \frac{1}{j\omega_1 C_0}; z_{12} = \frac{m}{2j\omega_1 C_0}; \\ z_{21} &= \frac{m}{2j\omega_2 C_0}; z_{22} = \frac{1}{j\omega_2 C_0}; \end{aligned} \quad (1)$$

Тепловые шумы, порождаемые сопротивлениями низкочастотного – (R_1) и высокочастотного (R_2) резонаторов, а также сопротивлениями потерь варактора (r_s) в этих резонаторах, обозначены соответственно u_{11} , u_{12} , u_{21} , u_{22} .

Средние квадраты этих напряжений определяются формулой Найквиста [2, 3]. При данных обозначениях мощность, идущая от R_1 в цепь ППВ в окрестности частоты ω_1 , выразится следующей формулой:

$$P_1 = u_{11}^2 \frac{|z_{22} + r_s + X_2 + R_2|^2 r_s - \frac{m^2 (R_2 + r_s)}{\omega_1 \omega_2 C_0^2}}{|\Delta|^2}, \quad (2)$$

где $\Delta = z_{11}z_{22} - z_{12}z_{21}$, $\omega_2 = \omega_1 + \omega_n$ (ω_n – частота изменения емкости варактора – частота накачки).

Шумовая мощность, идущая в том же частотном диапазоне в обратном направлении (от ППВ к R_1), определится аналогичной формулой:

$$P_2 = R_1 \frac{\overline{u_{12}^2} |z_{22} + r_s + X_2 + R_2|^2 + |z_{12}^2|^2 (\overline{u_{21}^2} + \overline{u_{22}^2})}{|\Delta|^2}. \quad (3)$$

Полагая для наглядности одинаковой физическую температуру T_ϕ всех элементов цепи, определим отношение P_2/P_1 , которое при этом условии совпадает с отношением шумовой температуры сигнала ППВ к его физической температуре. После некоторых преобразований это отношение принимает следующий вид:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{T_u}{T_\phi} = \frac{1 + d \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^2}{1 + d \frac{\omega_1}{\omega_2}}. \quad (4)$$

В (4) через d обозначена величина

$$d = \frac{m^2}{4\omega_1^2 C_0^2 r_s^2} \cdot \frac{r_s (r_s + R_2)}{|z_{22} + r_s + X_2 + R_2|^2}, \quad (5)$$

вбирающая в себя громоздкость формулы.

Минимизация величины шумовой температуры T_u требует максимально возможного значения параметра d . Согласно (5) это реализуется при настройке ВЧ-резонатора на частоту ω_2 , и равенстве нулю сопротивления нагрузки этого резонатора ($R_2 = 0$). Последнее означает, что электромагнитная шумовая мощность, передаваемая из НЧ-резонатора в ВЧ-резонатор, будет рассеиваться там только в сопротивлении потерь варактора. Поскольку ВЧ-резонатор в этом случае оказывается ненагруженным,

его можно назвать холостым резонатором по аналогии с ВЧ-резонатором регенеративного параметрического усилителя.

Если условия резонанса и ненагруженности ВЧ-резонатора выполнены, то параметр d представляет собой квадрат т.н. динамической добротности варактора на частоте ω_1 :

$$d = \tilde{Q}^2 = \frac{m^2}{4\omega_1^2 C_0^2 r_s^2}. \quad (6)$$

Данная величина в качественном параметрическом элементе на умеренных частотах может достигать нескольких сотен.

Оптимальное значение отношения ω_1/ω_2 , обеспечивающее минимум величины шумовой температуры, выражается простой формулой:

$$\left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)_{\text{опт}} = \frac{\sqrt{1+d}-1}{d}, \quad (7)$$

которая на практике играет лишь оценочную роль, поскольку минимум $T_{ш}$ тупой и уменьшение ω_2 по отношению к оптимальному значению в 2-3 раза приводит к небольшому увеличению $T_{ш}$. Достижимая при оптимальном значении холостой частоты величина шумовой температуры равна

$$T_{ш} = T_{\phi} \frac{2(\sqrt{1+d}-1)}{d}. \quad (8)$$

Данная формула позволяет оценить предельные возможности достижения низких шумовых температур в параметрических ГШ. Например, для $d > 100$ и $T_{\phi} = 300$ К получим $T_{ш} < 60$ К. Реализация таких значений $T_{ш}$ в транзисторных ГШ на частотах в десятки ГГц является проблематичной.

Существенным достоинством параметрического ГШ является его широкополосность, обусловленная тем, что параметрическое взаимодействие колебаний НЧ- и ВЧ-резонаторов приводит к взаимной компенсации их реактансов вблизи резонансной частоты. Выходной импеданс низкочастотного резонатора, который должен быть согласован с нагрузкой R_1 , равен

$$z_{\text{вых}} = r_s + z_{11} + X_1 + \frac{m^2}{4\omega_1\omega_2 C_0^2 (z_{22} + r_s + R_2 + X_2)}. \quad (9)$$

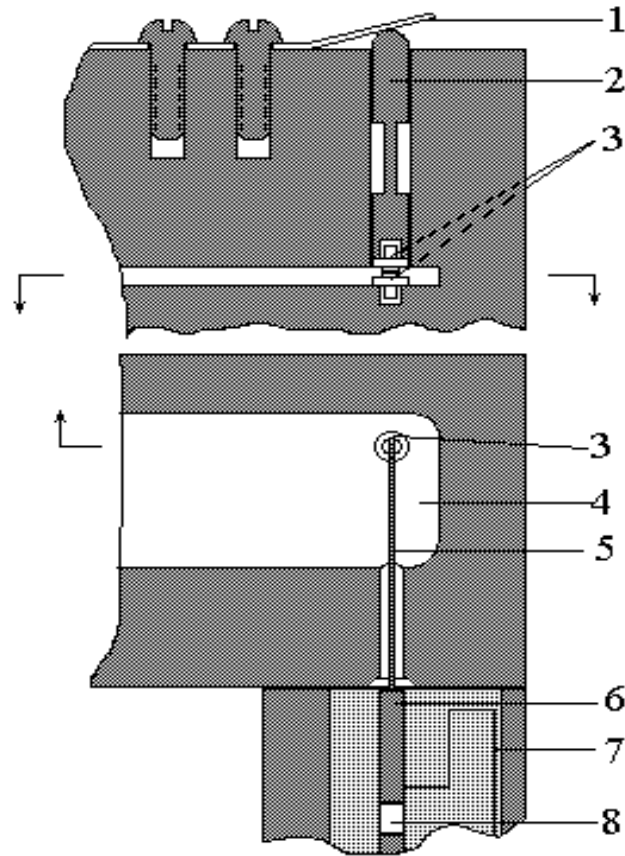
Условие согласования на центральной частоте рабочего диапазона ω_{10} при $R_2 = 0$ выражается равенством

$$R_1 = r_s \left(1 + d \frac{\omega_{10}}{\omega_{20}} \right), \quad (10)$$

а условие реализации максимально плоской АЧХ согласования имеет при этом следующий вид:

$$\omega_{20} = \omega_{10} \sqrt[3]{d}. \quad (11)$$

Заметим, что условие широкополосности согласования (11) не совпадает с условием получения минимальной шумовой температуры на центральной частоте (7). На практике, видимо, следует отдавать предпочтение условию (11), что означает более низкое значение холостой частоты, большую широкополосность генерируемого шума при некотором увеличении его шумовой температуры.



- 1 – прижимная пружина; 2 – дроссельный держатель диода;
 3 – варакторные диоды; 5 – индуктивность НЧ резонатора;
 6 – выходная микрополосковая линия;
 7 – дроссель подачи смещения на диоды;
 8 – разделительный конденсатор

Рисунок 2 – Конструкция макета параметрического ГШ

Результаты экспериментов

Экспериментальный макет параметрического ГШ был построен на основе варакторов ЗА410Г, имеющих емкость перехода 0,5 пф, емкость корпуса 0,25 пф, индуктивность выводов 0,2 нГн. Макет представляет собой балансный преобразователь вверх, с параллельным включением диодов по низкой и последовательным по высокой частоте. Конструкция макета показана на рисунке 2. Частоты настроек сигнального и холостого резонаторов составляют соответственно 1,65 и 16,68 ГГц. Частота накачки равна 15,03 ГГц. Низкочастотный резонатор образован емкостями варакторов и отрезком высокоомной коаксиальной линии 5. Холостой резонатор – импедансом варакторов и коротким отрезком низкоомной волноводной линии. Волновод холостого резонатора имеет ширину 9,7 мм, т.е. является запредельным для разностной частоты, что упрощает реализацию высокого импеданса по данной частоте в контуре варакторов. Мощность накачки на варакторы подается через фильтр в виде двух резонансных стержней, запирающий резонатор на холостой частоте. Для обеспечения возможности настройки и измерения параметров холостого резонатора данный фильтр сделан съемным.

Величина шумовой температуры сигнала ГШ измерялась в диапазоне 1–2 ГГц приемником П5-4, снабженным малошумящим транзисторным УВЧ. Первоначально проводилась калибровка приемника по криогенному генератору Г2-5, обеспечивающему $T_{ш} = 80–85$ К. После этого вход приемника подключался к параметрическому ГШ и измерялась шумовая температура его сигнала. Погрешность таких измерений, видимо, составляет 15–20%, однако несомненно, что во всем диапазоне параметрический ГШ имеет меньшую, чем криогенный шумовую температуру. На рисунке 3 показан график частотной зависимости $T_{ш}$, в котором положение точек определено путем осреднения результатов нескольких циклов калибровка – измерение.

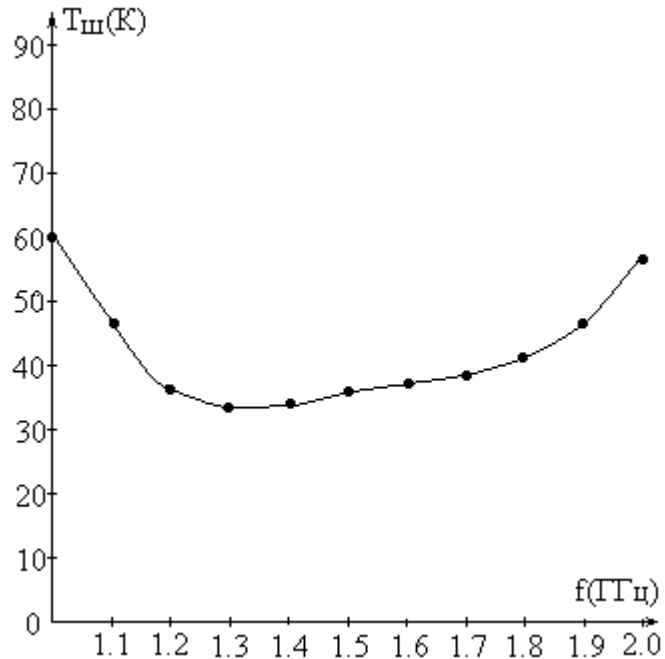


Рисунок 3

В заключение можно отметить следующее. По достижимым величинам шумовой температуры генерируемого сигнала параметрические ГШ и генераторы на ПТШ типа «colfet» [1] приблизительно эквивалентны при существенно большей сложности первых. Однако это не означает прикладную бесперспективность параметрических ГШ, поскольку ряд их параметров: широкополосность, устойчивость, практически полное отсутствие не теплового шума в генераторах на ПТШ недостижимы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Frater, R. Active «cold» source of noise / R. Frater, D. Williams // IEEE Trans. – 1981. – Vol. MTT-29, № 4. – P. 344.
2. Гупта, М.С. Тепловой шум в нелинейных резистивных приборах и его эквивалентное схемное представление / М.С. Гупта // ТИИЭР. – 1982. – Т.70, № 8. – С. 5–25.
3. Стратонович, Р.Л. Флуктуационно-диссипационные модели нелинейного резистора и формулы Гупта / Р.Л. Стратонович // Радиофизика – 1988. – № 2. – С. 222–230.
4. Блэкуэл, Л. Параметрические усилители на полупроводниковых диодах / Л. Блэкуэл, К. Коцебу. – М. : Мир, 1964.

N.N. Vorsin. Generation of Cold Noise on the Basis of Parametrical Effect

Results of researches of parametrical noise Generators representing parametrical converters of frequency upwards, are described. The equivalent noise temperature of a signal, such ГШ can be made several times less than their physical temperature. It allows replacing with data ГШ in the limited frequency range cryogenic ГШ