

что на помехоустойчивость цифрового приемника существенно влияет количество отсчетов на значащем интервале ν . При $L \geq 4$ помехоустойчивость цифрового приемника практически совпадает с помехоустойчивостью аналогового ($L = \infty$).

Выводы

Задача цифровой фильтрации непрерывно-дискретного процесса решена для случая, когда в АЦП квантуется смесь сигнала с шумом непосредственно. Если эта смесь представляет собой высокочастотный процесс, то могут возникнуть технические трудности, связанные с необходимостью обеспечения высокого быстродействия устройств. В технике радиоприема для облегчения реализации приемного устройства используют различные способы. Среди них можно назвать синхронную дискретизацию (взятие отсчетов в моменты максимума высокочастотных колебаний), когерентную и некогерентную обработку низкочастотных синусной и косинусной составляющих смеси сигнала с шумом. Применительно к этим способам задача может быть решена изложенным выше методом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тихонов В. И., Харисов В. Н., Смирнов В. А. Оптимальная фильтрация дискретно-непрерывных процессов // Радиотехника и электроника.— 1978.— № 7.— С. 1441—1452.
2. Миронов М. А. Оптимальная комплексная дискретная обработка сигналов при частично окрашенных шумах наблюдения // Радиотехника и электроника.— 1985.— Т. 30, вып. 5.— С. 973—980.
3. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника.— М.: Радио и связь, 1982.— 624 с.
4. Ярлыков М. С. Статистическая теория радионавигации.— М.: Радио и связь, 1985.— 344 с.
5. Сугу Р. Е. Estimation and control with quantized measurements.— London: M. I. T. Press., 1970.— 262 p.
6. Тихонов В. И. Оптимальный прием сигналов.— М.: Радио и связь, 1983.— 320 с.
7. Величкин А. И. Передача аналоговых сообщений по цифровым каналам связи.— М.: Радио и связь, 1983.— 240 с.
8. Стратонович Р. Л. Условные марковские процессы и их применение к теории оптимального управления.— М.: МГУ, 1966.— 316 с.

Статья поступила 24 октября 1989 г.

УДК 621.313.029.6:621.38

И. А. Соколов

ФАЗОВЫЕ ШУМЫ СВЧ-ИСТОЧНИКОВ КОЛЕБАНИЙ, СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ РЕЗОНАТОРАМИ

Приведен сравнительный анализ источников СВЧ-колебаний, построенных на основе различных методов формирования частоты, по значению спектральной плотности мощности фазовых флуктуаций $S_{\varphi}(F)$. Показана целесообразность применения диэлектрических резонаторов для снижения уровня собственных фазовых шумов СВЧ-источников колебаний. Приведена методика расчета нагруженной добротности дискового диэлектрического резонатора (ДДР) по спектру флуктуаций фазы генератора на основе ДДР. Рассчитаны аппроксимационные характеристики экспериментальных зависимостей $S_{\varphi}(F)$ генераторов на основе ДДР при рабочих температурах резонаторов 77 и 300 К.

Создание источников колебаний (ИК) с малым уровнем собственных фазовых шумов приобретает важное значение. Наиболее распространенной оценкой уровня фазовых шумов является значение спектральной плотности мощности фазовых флуктуаций $S_{\varphi}(F)$ при определенной частоте отстройки F от несущей. О требованиях, предъявляемых к величине $S_{\varphi}(F)$ в современной СВЧ-аппаратуре, можно судить по шумовым характеристикам одного из лучших СВЧ-синтезаторов [1], значения $S_{\varphi}(F)$ которого на частоте $f_{сч} = 10$ ГГц следующие:

$$S_{\varphi}(0,01 \text{ кГц}) = -56 \text{ дБ/Гц};$$

$$S_{\varphi}(0,1 \text{ кГц}) = -66 \text{ дБ/Гц};$$

$$S_{\varphi}(1 \text{ кГц}) = -88 \text{ дБ/Гц};$$

$$S_{\varphi}(10 \text{ кГц}) = -102 \text{ дБ/Гц};$$

$$S_{\varphi}(100 \text{ кГц}) = -110 \text{ дБ/Гц};$$

$$S_{\varphi}(1000 \text{ кГц}) = -130 \text{ дБ/Гц}.$$

В дальнейшем приведенные данные значения $S_{\varphi}(F)$ принимаются за допустимый уровень собственных шумов ИК сантиметрового диапазона.

Применение диэлектрических резонаторов для снижения фазовых шумов

Наиболее распространенные методы формирования частот в СВЧ-диапазоне — прямой синтез, непосредственное генерирование СВЧ-автоколебаний, косвенный синтез. В первом методе СВЧ-частота формируется посредством умножения частоты кварцевого генератора (КГ). При умножении в N раз частоты КГ уровень шумов выходного СВЧ-колебания возрастает не менее чем на $20 \lg N$. Приведем значения выходных колебаний опорного КГ $f_{кг} = 5$ МГц, пересчитанные к частоте 10 ГГц ($N = 2000$):

$$S_{\varphi}(0,01 \text{ кГц}) = -58 \text{ дБ/Гц};$$

$$S_{\varphi}(0,1 \text{ кГц}) = -74 \text{ дБ/Гц};$$

$$S_{\varphi}(1 \text{ кГц}) = -82 \text{ дБ/Гц};$$

$$S_{\varphi}(10 \text{ кГц}) = -86 \text{ дБ/Гц};$$

$$S_{\varphi}(100 \text{ кГц}) = -86 \text{ дБ/Гц};$$

$$S_{\varphi}(1000 \text{ кГц}) = -86 \text{ дБ/Гц}.$$

Сравнивая данные значения $S_{\varphi}(F)$ с вышеприведенными, видно, что при использовании высококачественного 5 МГц КГ без учета собственных шумов умножителя уровень шумов превышает допустимый. Некоторого снижения шумов можно достичь путем применения более высокочастотных опорных КГ и соответственно путем уменьшения коэффициента умножения N . Представим экспериментальные значения $S_{\varphi}(F)$ на частоте ~ 10 ГГц выходного СВЧ-колебания, полученного умножением частоты КГ $f_{кг} \approx 60$ МГц в $N = 200$ раз, $P_{\text{вых}} \approx 1$ мВт:

$$S_{\varphi}(0,01 \text{ кГц}) = -50 \text{ дБ/Гц};$$

$$S_{\varphi}(0,1 \text{ кГц}) = -78 \text{ дБ/Гц};$$

$$S_{\varphi}(1 \text{ кГц}) = -108 \text{ дБ/Гц};$$

$$S_{\varphi}(10 \text{ кГц}) = -117 \text{ дБ/Гц};$$

$$S_{\varphi}(100 \text{ кГц}) = -120 \text{ дБ/Гц}.$$

В [2] получено выражение для частоты КГ, при которой величина $S_{\varphi}(F)$ выходного сигнала генератора с умножением частоты минимальна на заданной частоте отстройки от несущей.

Методом непосредственного генерирования колебаний СВЧ-автогенераторами (диодными и транзисторными) удается значительно снизить уровень фазовых шумов, применяя стабилизацию частоты высокодобротными резонансными системами, из которых наиболее перспективными являются диэлектрические резонаторы (ДР). Так, например, фазовые шумы генератора на диоде Ганна, стабилизированного высокодобротным цилиндрическим резонатором с основными колебаниями H_{011} , на частоте колебаний 35 ГГц при выходной мощности 96 мВт [3] составили:

$$\begin{aligned} S_{\varphi}(25 \text{ кГц}) &= -116,5 \text{ дБ/Гц}; \\ S_{\varphi}(50 \text{ кГц}) &= -126,0 \text{ дБ/Гц}; \\ S_{\varphi}(100 \text{ кГц}) &= -131,0 \text{ дБ/Гц}; \\ S_{\varphi}(200 \text{ кГц}) &= -137,0 \text{ дБ/Гц}. \end{aligned}$$

Значение допустимого уровня шумов на частоте отстройки $F = 100$ кГц, пересчитанное к частоте 35 ГГц, составляет $S_{\varphi}(100 \text{ кГц}) = -99$ дБ/Гц. Таким образом, в дальней зоне от несущей удается снизить уровень фазовых шумов приблизительно на 30 дБ/Гц.

Применение метода косвенного синтеза частот позволяет расширить диапазон частот отстроек от несущей, в котором достигается минимальный уровень шумов СВЧ-колебания. При этом ИК строят по схеме ФАПЧ, где в качестве опорного выбирается низкочастотный высокостабильный генератор, имеющий малый уровень шумов вблизи несущей. В полосе синхронизации шумы сформированного СВЧ-колебания определяются шумами опорного генератора, а вне этой полосы — собственными шумами синхронизируемого малошумящего СВЧ-автогенератора, поэтому, выбирая оптимальные полосы синхронизации, можно добиться минимального уровня шумов в широком диапазоне частот отстроек от несущей. В [4] описан автогенератор на частоте 1 ГГц на биполярном транзисторе, стабилизированный ДР с собственными добротностями $Q_0 = 7500, 14\,000$ (охваченный кольцом ФАПЧ по низкой частоте эталонного КГ), собственные шумы которого равны:

$$\begin{aligned} S_{\varphi}(0,1 \text{ кГц}) &= -96 \text{ дБ/Гц}; \\ S_{\varphi}(1 \text{ кГц}) &= -128 \text{ дБ/Гц}; \\ S_{\varphi}(10 \text{ кГц}) &= -150 \text{ дБ/Гц}; \\ S_{\varphi}(100 \text{ кГц}) &= -170 \text{ дБ/Гц}, \end{aligned}$$

шумы, пересчитанные к частоте 10 ГГц ($N=10$), —

$$\begin{aligned} S_{\varphi}(0,1 \text{ кГц}) &= -76 \text{ дБ/Гц}; \\ S_{\varphi}(1 \text{ кГц}) &= -108 \text{ дБ/Гц}; \\ S_{\varphi}(10 \text{ кГц}) &= -130 \text{ дБ/Гц}; \\ S_{\varphi}(100 \text{ кГц}) &= -150 \text{ дБ/Гц}. \end{aligned}$$

Таким образом, применение ДР в СВЧ — ИК позволяет удовлетворить требования, предъявляемые к шумам с определенным, необходимым для разработки сложных СВЧ-устройств запасом.

Оценка величины нагруженной добротности диэлектрических резонаторов по спектру флуктуаций фазы генераторов на их основе

В [5] получены экспериментальные зависимости $S_{\varphi}(F)$ генераторов на диоде Ганна трехсантиметрового диапазона, стабилизированных внешними ДДР из монокристаллического лейкосапфира, при рабочих температурах резонаторов 77 (ГДДР1) и 300 К (ГДДР2). Нагруженная добротность Q_n резонаторов, работающих на высших типах мод гибридных азимутальных колебаний, составляет порядка $10^5 - 10^6$ при комнатной температуре 300 К [5] и $\sim 10^7$ при температуре жидкого азота 77 К [6].

Кроме методики определения величины Q_{n2} ДДР при $T = 300$ К непосредственно по резонансной характеристике резонатора [5], можно оценить значение Q_{n2} по экспериментальным зависимостям $S_{\varphi}^{(1)}(F)$ и $S_{\varphi}^{(2)}(F)$ генераторов ГДДР1 и ГДДР2, соответственно, если известно значение Q_{n1} ДДР при $T = 77$ К. Для этого воспользуемся упрощенными аналитическими выражениями для шумовых характеристик для линейной модели транзисторного автогенератора с кварцевой стабилизацией частоты [2]. Применительно к ГДДР запишем

$$S_{\varphi}(F) \approx S_{\varphi_c}(F) \left[1 + \left(\frac{F Q_0}{F} \right)^2 \right], \quad (1)$$

где $S_{\varphi_c}(F)$ — спектральная плотность фазовых флуктуаций для генераторного каскада при разорванной цепи обратной связи; $2 F Q_0 = f_p / Q_n$ — полоса пропускания ДДР; β — коэффициент связи с ДДР; Q_0 — собственная добротность ДДР на резонансной моде; $Q_n = \beta Q_0$ — нагруженная добротность ДДР.

Спектральная плотность фазовых флуктуаций генераторного каскада при разорванной цепи обратной связи может быть приближенно представлена следующим образом:

$$S_{\varphi_c}(F) \approx S_0 + A/F^B, \quad (2)$$

где S_0 — спектральная плотность белого фазового шума; A — коэффициент, определяющий уровень фликкер-шума генератора; B — коэффициент, учитывающий частотную зависимость фликкер-шума диода Ганна.

Генераторы, исследуемые в [5], различались только рабочими температурами ДДР и соответственно величиной Q_n резонаторов; их конструктивное исполнение идентично: непосредственно генераторы на диодах Ганна («горячие» резонаторы) выполнены на отрезках прямоугольного волновода 10×23 мм; в качестве активных элементов применены диоды Ганна типа 3А703, 3А705. Таким образом, в первом приближении можно считать, что значения $S_{\varphi_c}(F)$ ГДДР1 и ГДДР2 совпадают, и, воспользовавшись соотношением (1), запишем:

при температуре ДДР 77 К

$$S_{\varphi}^{(1)}(F) \approx S_{\varphi_c}(F) \left[1 + \left(\frac{f_p / (2 Q_{n1})}{F} \right)^2 \right],$$

при температуре ДДР 300 К

$$S_{\varphi}^{(2)}(F) \approx S_{\varphi_c}(F) \left[1 + \left(\frac{f_p / (2 Q_{н2})}{F} \right)^2 \right].$$

Разделив одно равенство на другое, получим

$$S_{\varphi}^{(1)}(F) / S_{\varphi}^{(2)}(F) \approx \frac{1 + [f_p^2 / (4 Q_{н1}^2 F^2)]}{1 + [f_p^2 / (4 Q_{н2}^2 F^2)]}. \quad (3)$$

Из формулы (3), зная значения $S_{\varphi}^{(1)}(F)$, $S_{\varphi}^{(2)}(F)$ при определенной частоте отстройки F от несущей и величину $Q_{н1}$, можно найти значение $Q_{н2}$. Значения $S_{\varphi}^{(1)}(F)$ и $S_{\varphi}^{(2)}(F)$, определенные в [5], представлены в табл. 1. В табл. 2 приведены результа-

$f_p = 10^{10}$ Гц и $\frac{S_{\varphi}^{(1)}(0,5 \text{ кГц})}{S_{\varphi}^{(2)}(0,5 \text{ кГц})} = 10^{-1,3} \approx 0,05$ по формуле (3) получаем:

$$0,05 + 0,05 \frac{10^{20}}{4 \cdot 25 \cdot 10^4 \cdot Q_{н2}^2} = 1 + \frac{10^{20}}{4 \cdot 25 \cdot 10^4 \cdot 25 \cdot 10^{12}};$$

$$Q_{н2}^2 \approx 10^{12}; \quad Q_{н2} \approx 1,0 \cdot 10^6.$$

Далее определим, во сколько раз увеличивается значение нагруженной добротности при оптимизации ГДДР2 на максимум $Q_{н}$ модуляционным методом [5]. Найдем значение $Q_{н3}$ ДДР при $T = 300$ К до оптимизации ГДДР2 по известной за-

Таблица 1

Значения спектральной плотности фазовых флуктуаций ГДДР1 и ГДДР2 и их аппроксимационные характеристики

| F , кГц | $S_{\varphi}^{(1)}(F)$, дБ/Гц | $S_{\varphi}^{(2)}(F)$, дБ/Гц | $S_{\varphi}^{(3)}(F)$, дБ/Гц | $S_{\varphi_{АП}}^{(1)}(F)$, дБ/Гц | $S_{\varphi_{АП}}^{(2)}(F)$, дБ/Гц | $S_{\varphi_c}^{(1)}(F)$, дБ/Гц | $S_{\varphi_c}^{(2)}(F)$, дБ/Гц |
|-----------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 0,001 | | | | -49 | -41 | -115 | -115 |
| 0,01 | | | | -80 | -70 | -126 | -123 |
| 0,02 | -96 | -88 | | -89 | -78 | | |
| 0,03 | -98 | -90 | -77 | -94 | -83 | | |
| 0,05 | -103 | -92 | -83 | -101 | -90 | | |
| 0,1 | -110 | -98 | -88 | -111 | -98 | -136 | -132 |
| 0,2 | -118 | -103 | -95 | -120 | -107 | | |
| 0,3 | -123 | -110 | -105 | -125 | -112 | | |
| 0,5 | -131 | -118 | -110 | -132 | -118 | | |
| 1 | -140 | -125 | -120 | -140 | -127 | -147 | -141 |
| 2 | -145 | -128 | -124 | -147 | -135 | | |
| 3 | -148 | | | -150 | -139 | | |
| 5 | -153 | | | -154 | -144 | | |
| 10 | -160 | | | -157 | -148 | -157 | -149 |
| 20 | -161 | | | -159 | -152 | | |
| 30 | -162 | | | -160 | -153 | | |
| 50 | -163 | | | -161 | -155 | | |
| 70 | -163 | | | -162 | -156 | -162 | -156 |
| 100 | -163 | | | -162 | -157 | -162 | -157 |
| 1000 | -163 | | | -163 | -162 | -163 | -162 |

Примечание. $S_{\varphi}^{(1)}(F)$ — экспериментальная зависимость $S_{\varphi}(F)$ ГДДР1, $f_p \approx 9,6$ ГГц, $P_{вых} \approx 1 - 2$ мВт; предварительно генератор оптимизирован на максимум нагруженной добротности модуляционным методом [5]; $S_{\varphi}^{(2)}(F)$ — экспериментальная зависимость $S_{\varphi}(F)$ ГДДР2, $f_p \approx 9,6$ ГГц, $P_{вых} \approx 0,5 - 1$ мВт; предварительно генератор оптимизирован на максимум нагруженной добротности модуляционным методом [5]; $S_{\varphi}^{(3)}(F)$ — экспериментальная зависимость $S_{\varphi}(F)$ ГДДР2 до оптимизации модуляционным методом, $f_p \approx 9,6$ ГГц, $P_{вых} \approx 2 - 4$ мВт; $S_{\varphi_{АП}}^{(1)}(F)$, $S_{\varphi_{АП}}^{(2)}(F)$, $S_{\varphi_c}^{(1)}(F)$, $S_{\varphi_c}^{(2)}(F)$ — аппроксимационные характеристики, рассчитанные по формулам (6) при $F_{Q1} = 2 \cdot 10^3$ Гц, (7) при $F_{Q2} = 5 \cdot 10^3$ Гц, (8), (9), соответственно.

Таблица 2

Значения нагруженной добротности ДДР при $T = 300$ К, вычисленные по формуле (3)

| $Q_{н1}$ ($T = 77$ К) | $Q_{н2}$ ($T = 300$ К) | | | |
|---------------------------|-------------------------|------------------|------------------|------------------|
| | $F = 0,05$ кГц | $F = 0,1$ кГц | $F = 0,5$ кГц | $F = 1$ кГц |
| $2,0 \cdot 10^7$ | $5,5 \cdot 10^6$ | $4,6 \cdot 10^6$ | $2,0 \cdot 10^6$ | $8,7 \cdot 10^5$ |
| $1,0 \cdot 10^7$ | $2,8 \cdot 10^6$ | $2,4 \cdot 10^6$ | $1,6 \cdot 10^6$ | $7,8 \cdot 10^5$ |
| $5,0 \cdot 10^6$ | $1,4 \cdot 10^6$ | $1,2 \cdot 10^6$ | $1,0 \cdot 10^6$ | $6,2 \cdot 10^5$ |
| $2,0 \cdot 10^6$ | $5,7 \cdot 10^5$ | $4,9 \cdot 10^5$ | $4,4 \cdot 10^5$ | $3,2 \cdot 10^5$ |

ты расчета значений $Q_{н2}$ по формуле (3). Приведем пример расчета: при $Q_{н1} = 5,0 \cdot 10^6$, $F = 0,5$ кГц,

зависимости $S_{\varphi}^{(3)}(F)$ генератора до оптимизации. Из табл. 1 находим

$$\frac{S_{\varphi}^{(2)}(0,5 \text{ кГц})}{S_{\varphi}^{(3)}(0,5 \text{ кГц})} = 10^{-0,8} \approx 0,16.$$

Применяя формулу (1), получим при $Q_{н2} = 1,0 \cdot 10^6$ и $f_p = 10^{10}$ Гц:

$$S_{\varphi}^{(2)}(0,5 \text{ кГц}) / S_{\varphi}^{(3)}(0,5 \text{ кГц}) \approx \frac{1 + f_p^2 / (4 Q_{н2}^2 F^2)}{1 + f_p^2 / (4 Q_{н3}^2 F^2)},$$

$$Q_{н3}^2 \approx 0,16 \cdot 10^{12}; \quad Q_{н3} \approx 4 \cdot 10^5; \quad \frac{Q_{н2}}{Q_{н3}} = \frac{10}{4} = 2,5.$$

В среднем оптимизация модуляционным методом позволяет увеличить величину нагруженной добротности ДДР в 2 раза.

В заключение отметим, что предложенная методика определения величины нагруженной добротности ДДР может быть распространена на ДР произвольной формы.

Аппроксимация экспериментальных характеристик $S_{\varphi}(F)$ ГДДР

Подставляя (2) в (1), получаем

$$S_{\varphi}(F) \approx S_0 [1 + F_{a1} F^{-b_1} + F_{Q1}^2 F^{-2} + F_{a1} F_{Q1}^2 F^{-b_1-2}], \quad (4)$$

где $F_a = A/S_0$ — частота, на которой спектральная плотность фликкер-шума собственных фазовых флуктуаций генераторного каскада равна спектральной плотности аддитивного белого шума.

Выражение (2) переписем в виде

$$S_{\varphi_c}(F) \approx S_0 \left(1 + \frac{F_a}{F^b} \right). \quad (5)$$

Записав выражение (4) для двух различных значений $S_{\varphi}^{(1)}(F)$ при $F = 0,1; 0,5$ кГц, вычислим значения параметров F_{a1} и b_1 для ГДДР1 при

$$Q_{н1} = 2,5 \cdot 10^6 \left(F_{Q1} = \frac{f_p}{2 Q_{н1}} = \frac{10^{10}}{5 \cdot 10^6} = 2 \cdot 10^3 \text{ Гц} \right):$$

$$S_{\varphi}^{(1)}(0,5 \text{ кГц}) \approx S_0 \times$$

$$\times (1 + F_{a1} \cdot 5^{-b_1} \cdot 10^{-2b_1} + 16 + 16 F_{a1} \cdot 5^{-b_1} \cdot 10^{-2b_1});$$

$$S_{\varphi}^{(1)}(0,1 \text{ кГц}) \approx S_0 \times$$

$$\times (1 + F_{a1} \cdot 10^{-2b_1} + 400 + 400 \cdot F_{a1} \cdot 10^{-2b_1}).$$

С учетом значений $S_{\varphi}^{(1)}(0,1 \text{ кГц}) = 10^{-11,0}$, $S_{\varphi}^{(1)}(0,5 \text{ кГц}) = 10^{-13,1}$, $S_0 = S_{\varphi}^{(1)}(100 \text{ кГц}) = 10^{-16,3}$

(см. табл. 1) решаем совместно полученные уравнения и находим: $b_1 \approx 1,08$; $F_{a1} \approx 7,5 \cdot 10^4$ Гц. Для того чтобы убедиться в правильности вычисленных значений F_{a1} и b_1 , подставим их в (4) при $F = 1$ кГц ($S_{\varphi}^{(1)}(1 \text{ кГц}) = 10^{-14,0}$). Далее убеждаемся, что для большей точности необходимо принять $F_{a1} \approx 7,0 \cdot 10^4$ Гц. Прделав аналогичные выкладки, вычислим F_{a2} и b_2 для ГДДР2, считая $Q_{н2} = 1,0 \times 10^6$ ($F_{Q2} = 5 \cdot 10^3$ Гц). Из табл. 1 видно:

$$S_{\varphi}^{(2)}(0,5 \text{ кГц}) = 10^{-11,8}; \quad S_{\varphi}^{(2)}(0,1 \text{ кГц}) = 10^{-9,8};$$

$$S_{\varphi}^{(2)}(0,5 \text{ кГц}) \approx S_0 (1 + F_{a2} \cdot 5^{-b_2} \cdot 10^{-2b_2} + 10^2 + 10^2 F_{a2} \cdot 5^{-b_2} \cdot 10^{-2b_2});$$

$$S_{\varphi}^{(2)}(0,1 \text{ кГц}) \approx S_0 (1 + F_{a2} \cdot 10^{-2b_2} + 25 \cdot 10^2 + 25 \cdot 10^2 F_{a2} \cdot 10^{-2b_2}).$$

Находим $b_2 \approx 0,87$; $F_{a2} \approx 6,95 \cdot 10^4$ Гц;

$$F_a = F_{a1} = F_{a2} = 7,0 \cdot 10^4 \text{ Гц};$$

$$\Delta b = b_1 - b_2 \approx 1,08 - 0,87 \approx 0,2.$$

Запишем окончательные аппроксимационные характеристики с учетом выражения (4) и вычисленных значений F_a , b_1 и b_2 :

для ГДДР1

$$S_{\varphi_{АП}}^{(1)}(F) \approx S_0 [1 + 7 \cdot 10^4 \cdot F^{-1,08} + F_{Q1}^2 F^{-2} + 7 \cdot 10^4 \cdot F_{Q1}^2 F^{-3,08}], \quad (6)$$

для ГДДР2

$$S_{\varphi_{АП}}^{(2)}(F) \approx S_0 [1 + 7 \cdot 10^4 \cdot F^{-0,87} + F_{Q2}^2 F^{-2} + 7 \cdot 10^4 F_{Q2}^2 F^{-2,87}]. \quad (7)$$

По формуле (5) запишем выражения для $S_{\varphi_c}(F)$ генераторов:

для ГДДР1

$$S_{\varphi_c}^{(1)}(F) \approx S_0 \left(1 + \frac{7 \cdot 10^4}{F^{1,08}} \right), \quad (8)$$

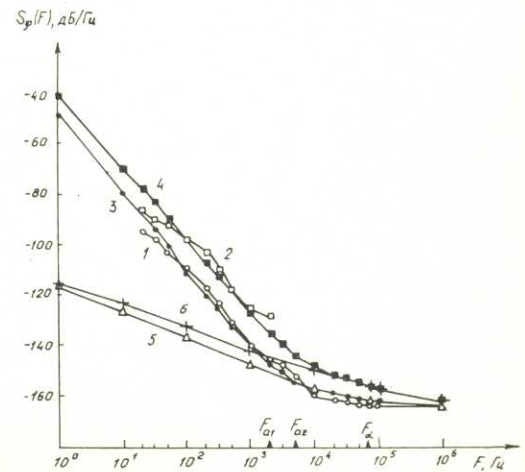
для ГДДР2

$$S_{\varphi_c}^{(2)}(F) \approx S_0 \left(1 + \frac{7 \cdot 10^4}{F^{0,87}} \right). \quad (9)$$

Вычисленные по формулам (6) — (9) значения

$$S_{\varphi_{АП}}^{(1)}(F), \quad S_{\varphi_{АП}}^{(2)}(F), \quad S_{\varphi_c}^{(1)}(F), \quad S_{\varphi_c}^{(2)}(F)$$

представлены в табл. 1, а сами характеристики приведены на рисунке.



Экспериментальные зависимости спектральной плотности фазовых флуктуаций ГДДР1 и ГДДР2 и их аппроксимационные характеристики:

- — $S_{\varphi}^{(1)}(F)$ ГДДР1 — экспериментальная [5]; □ — $S_{\varphi}^{(2)}(F)$ ГДДР2 — экспериментальная [5];
- — $S_{\varphi_{АП}}^{(1)}(F)$ — аппроксимация экспериментальной зависимости $S_{\varphi}^{(1)}(F)$ по формуле (6) при $F_{Q1} = 2 \cdot 10^3$ Гц; ■ — $S_{\varphi_{АП}}^{(2)}(F)$ — аппроксимация экспериментальной зависимости $S_{\varphi}^{(2)}(F)$ по формуле (7) при $F_{Q2} = 5 \cdot 10^3$ Гц; △ — зависимость $S_{\varphi_c}^{(1)}(F)$, построенная по формуле (8); + — зависимость $S_{\varphi_c}^{(2)}(F)$, построенная по формуле (9)

Обсуждение результатов

Из анализа значений $S_{\varphi}(F)$ различных генераторов СВЧ-диапазона следует вывод о перспективности применения ДР в качестве стабилизирующих резонансных систем при создании малощумящих источников СВЧ-колебаний. Метрология таких ИК затрудняется отсутствием промышленной измерительной техники с высокой разрешающей способностью и чувствительностью, и, в частности, возникает проблема измерения нагруженной добротности ДР и фазовых шумов генераторов на основе ДР вблизи несущей и вдали от неё.

В табл. 2 приведены результаты расчёта нагруженной добротности $Q_{н2}$ ДДР при $T = 300$ К по формуле (3) при различных частотах отстроек F от несущей и различных значениях $Q_{н1}$ ДДР при $T = 77$ К. Значения $Q_{н1}$ точно неизвестны и по различным источникам литературы (например, [6, 7]) с учётом коэффициента связи β выбраны в диапазоне $2 \cdot 10^6 - 2 \cdot 10^7$.

Наиболее достоверными следует считать результаты при $F = 0,1; 0,5$ кГц. При $F \leq 0,05$ кГц и $F \geq 1$ кГц результаты измерения $S_{\varphi}^{(1)}(F)$ и $S_{\varphi}^{(2)}(F)$ граничат с уровнем собственных шумов измерителя [5]. Следует также считать, что значения $S_{\varphi}^{(1)}(F)$ более достоверны, чем значения $S_{\varphi}^{(2)}(F)$, так как экспериментальная зависимость $S_{\varphi}^{(1)}(F)$ получена двухканальным разностным методом, при котором собственные шумы измерителя ниже, а достоверность результатов измерений выше, чем при измерении $S_{\varphi}^{(2)}(F)$ одиночного ГДДР2 [5].

Судя по экспериментальной зависимости $S_{\varphi}^{(1)}(F)$ (см. рисунок), начиная с частоты отстройки от несущей $F = F_{Q1} = 10^3 - 2 \cdot 10^3$ Гц, происходит отклонение характеристики от первоначального хода кривой, поэтому при построении аппроксимационных характеристик значения $Q_{н1}$ выбирались из диапазона $Q_{н1} = f_p/2F_{Q1} = (2 - 5) \cdot 10^6$ при $f_p = 10^{10}$ Гц. Невысокие значения $Q_{н1}$ объясняются, вероятно, несовершенством криогенной системы ГДДР1, вследствие чего не достигается требуемый уровень охлаждения до $T = 77$ К. Поэтому из табл. 2 выбираем наиболее достоверные значения $Q_{н2} = (4 - 12) \cdot 10^5$. В [5] значения $Q_{н2}$, измеренные непосредственно по резонансной характеристике ДДР при $T = 300$ К, составили $(5 - 10) \cdot 10^5$, и был получен максимальный результат $2,0 \cdot 10^6$. Таким образом, обнаруживается хорошее соответствие двух независимых методов оценки нагруженной добротности ДДР при $T = 300$ К — прямого и косвенного.

Аппроксимационные характеристики, рассчитанные по формулам (6) — (9), приведены на рисунке. Все параметры аппроксимации рассчитаны при частотах отстроек $F = 0,1; 0,5$ кГц и при $Q_{н1} = 2,5 \cdot 10^6$ ($F_{Q1} = 10^3$ Гц), $Q_{н2} = 1,0 \cdot 10^6$ ($F_{Q2} = 5 \cdot 10^3$ Гц). Отметим, что значение вычисленного параметра $F_{\alpha} = 7,0 \cdot 10^4$ Гц одинаково для ГДДР1 и ГДДР2, а параметр b одинаков для этих генераторов. Разница $\Delta b = 0,2$ объясняется тем, что частотные зависимости фликкер-шума диода Ганна в ГДДР1 и ГДДР2 несколько различны, что связано

с разными режимами работы диодов Ганна в генераторах.

Значения фазовых шумов на частоте отстройки от несущей 1 Гц, вычисленные по аппроксимационным характеристикам, составили -49 и -41 дБ/Гц для ГДДР1 и ГДДР2, соответственно. Однако значения $S_{\varphi}(1$ Гц) ГДДР можно считать достоверными в случае, если вблизи несущей ($F = 1 - 10$ Гц) зависимости $S_{\varphi}(F)$ ГДДР носят характер частотного фликкер-шума (изменяются по закону $\sim F^{-3}$). Не исключено, что в указанном диапазоне преобладают броуновские флуктуации частоты (закон изменения $S_{\varphi}(F) \sim F^{-4}$).

В целом полученные аппроксимационные характеристики хорошо согласуются с экспериментальными и позволяют прогнозировать значения на тех частотах отстроек F от несущей, на которых недостаточно чувствительности измерителя флуктуации.

Выводы

На конкретных примерах обоснована целесообразность использования ДР в качестве стабилизирующих резонаторов для снижения уровня собственных фазовых шумов источников СВЧ-колебаний.

Полученные аппроксимационные характеристики экспериментальных зависимостей $S_{\varphi}(F)$ ГДДР позволяют оценивать значения фазовых шумов в широком диапазоне частот отстроек от несущей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tiron P. G. The Microwave frequency synthesizer that exhibit broader bandwidths and increased spectral purity//IEEE Trans.— 1974.— Vol. MTT-22, № 12.— P. 1246 — 1254.
2. Иноземцев И. М., Гаврилюк Я. Д. Спектры флуктуаций фазы транзисторных автогенераторов с кварцевой стабилизацией частоты//Труды МИРЭА. Сер. Радиопередающие устройства.— 1975.— Вып. 79.— С. 43 — 54.
3. Strangeway R. A., Ishii T. K., Hyde J. S. Design and fabrication of a 35 GHz, 100 mW low phase noise Gunn diode oscillator//Microwave J.— 1988.— Vol. 31, № 7.— P. 107 — 108, 110 — 111.
4. Plourde J. K., Ren C. L. Application of dielectric resonators in microwave components//IEEE Trans.— 1981.— Vol. MTT-29, № 8.— P. 754 — 770.
5. Волков П. В., Матвеев В. В., Соколов И. А. Исследование генераторов, стабилизированных дисковыми диэлектрическими резонаторами//Электронная техника. Сер. 10, Микроэлектронные устройства.— 1989.— Вып. 4(76).— С. 10 — 14.
6. Охлаждаемые диэлектрические резонаторы для стабилизации частоты/С. Н. Буньков, Б. А. Вторушин, В. Н. Егоров и др.//Радиотехника и электроника.— 1987.— Вып. 5.— С. 1071 — 1079.
7. Брагинский В. Б., Панов В. И., Тимашов А. В. Аномально малая диссипация электромагнитных волн в ионном кристалле//Докл. АН СССР. Сер. Физика.— 1982.— Т. 267, № 1.— С. 74 — 75.

Статья поступила 28 ноября 1989 г.