

## **Влияние значения частоты опорного сигнала на величину паразитного набега фазы кварцованного гетеродина**

**Д.С. Очков, Е.А. Силаев, И.С. Формальнов**

*Получены формулы для суммарного паразитного набега фазы кварцованного гетеродина. Представлены и проанализированы результаты расчета зависимости паразитного набега фазы гетеродина от интервала когерентности для широкого диапазона частот опорных кварцевых генераторов.*

## **Influence of frequency sense of supporting signal on value of parasitic phase incursion of quartzing local oscillator**

**D.S. Ochkov, E.A.Silaev, I.S.Formalnov**

*Formulas for calculation of parasitic phase incursion of quartzing local oscillator are proposed. Calculation results of parasitic phase incursion versus oscillator coherence interval for wide frequency range of quartz crystal oscillators are presented.*

### **Введение**

Получение спектрально-чистого опорного сигнала с низким уровнем фазовых шумов в диапазоне миллиметровых волн является сложной технической задачей [1, 2, 3]. Проектирование современных РЛС радиовидения [4], работающих в широком диапазоне дальностей, и дальнего обнаружения [5], применяемых в астрономии [6], требует от разработчиков гетеродинов создания источников опорных сигналов со все более низкой спектральной плотностью мощности фазовых шумов [7].

Интегральной оценкой величины спектральной плотности мощности фазовых шумов опорного сигнала гетеродина является его паразитный (случайный) набег фазы на некотором временном отрезке (интервале когерентности) [8]. Только после анализа зависимости суммарного паразитного набега фазы гетеродина от интервала когерентности для широкого диапазона частот опорных колебаний возможен выбор оптимальной структурной схемы гетеродина и возможно предъявление технических требований к частоте и качеству опорного генератора [7, 9].

## Основные результаты

В [10] было получено выражение (6.135) для флуктуаций фазы в одноконтурном транзисторном автогенераторе с кварцевым резонатором, включенным между стоком и затвором. Из-за сложности его анализа в [10] были рассмотрены два частных случая выражения (6.135):

1)  $wt_{\varrho} \ll 1$ , где  $t_{\varrho} = \frac{2Q'_{KB}}{W}$ ,  $Q'_{KB}$  – приведенная добротность кварцевого

автогенератора; при этом условии выражение (6.135) описывает фазовые флуктуации в окрестности пика спектральной линии кварцевого генератора;

2)  $wt_{\varrho} \gg 1$  – выражение (6.135) упрощается и позволяет рассмотреть фазовые флуктуации автогенератора в области частот за пределами полосы кварцевого резонатора.

Эти упрощения являются асимптотическими и хорошо описывают поведение флуктуаций фазы на малых и больших частотах отстройки от частоты последовательного резонанса кварцевого резонатора.

Но, вообще говоря, интересно рассчитать фазовые флуктуации реального автогенератора, не прибегая к сделанным в [10] упрощениям. Выражение, полученное для флуктуаций фазы кварцевого автогенератора [9], разработанного авторами для гетеродинов миллиметрового диапазона, имеет вид

$$\Psi_U = \frac{(2 + pd_{\varrho})z}{(1 - z^2)[1 - s(p)] + [1 + z^2 s(p)]pt_{\varrho}} m_{11E} +$$

$$+ \frac{1}{pt_{\varrho}} \times \frac{(1 + z^2)[1 - s(p)] + \{1 + z^2[1 - 2s(p)]\}pt_{\varrho} - z^2 p^2 t_{\varrho}^2 s(p)}{(1 + z^2)[1 - s(p)] + [1 + z^2 s(p)]pt_{\varrho}} m_{\perp} \quad (1)$$

Здесь  $z = \Delta w d_{\varrho}$ ,  $\Delta w = w - w_0$ ,  $t_{\varrho} = \frac{2Q'_{KB}}{W_0}$ ,

$$w_0 = \sqrt{(C'_{KB} + C_1{}^{-1} + C_2{}^{-1})/L_{KB}},$$

где  $C_{KB}, L_{KB}$  – ёмкость и индуктивность последовательной резонансной ветви эквивалентной схемы кварцевого резонатора с добротностью  $Q_{KB}, C_1', C_2', C_3'$ , –

ёмкости трехточечной схемы автогенератора, преобразованные из треугольника емкостей  $C_1, C_2, C_3$  в звезду емкостей

$$C'_1 = C_1 + C_3 + \frac{C_1 C_3}{C_2}; \quad C'_2 = C_2 + C_3 + \frac{C_2 C_3}{C_1}; \quad C'_3 = C_1 + C_2 + \frac{C_1 C_2}{C_3};$$

$$S(p) = S_V^1 + \frac{S_V^0 S_V^1}{p t_E + 1 - S_V^0} \text{ – операторная характеристика цепи смещения;}$$

$$m_{11E}(t, j\omega) = m_{11} + \frac{S_n^1}{1 - S_n^0 + j\omega d_E} m_E \text{ – синфазная шумовая составляющая с}$$

учетом цепи смещения;

$$m_E = \left(1 - \frac{E_a}{n_a^0}\right) \frac{I_{nb}}{I_b^0}; \quad S_u^0 = \left(1 - \frac{E_a}{n_a^0}\right) S_{bu}^0; \quad S_n^0 = \left(1 - \frac{E_a}{n_a^0}\right) S_{bn}^0; \quad m_{11} = \frac{I_{T11} + I_{b11}}{I_b^0}; \quad m_{\perp} = \frac{I_{T\perp} + I_{b\perp}}{I_b^0}; \quad (2)$$

$I_{T11}, I_{T\perp}$  – соответственно синфазная и квадратурная компоненты тока теплового шума четырехполюсника обратной связи;

$I_{b11}, I_{b\perp}$  – соответственно синфазная и квадратурная компоненты шумового тока транзистора, приведенного к его входу;

$t_E = C_E R_E$  – постоянные времени цепи автосмещения в цепи истока транзистора;

$E_a$  – начальное смещение на затворе транзистора;

$n_a$  – полное смещение на затворе транзистора;

$I_b$  – постоянная составляющая тока стока транзистора.

Принципиальной особенностью автогенератора является отсутствие силы, восстанавливающей величину фазы автоколебаний при отклонении от “правильной”, детерминированной фазы  $\omega_0 + \Psi_0$  из-за многочисленных шумовых процессов, как внутренних, так и внешних (в частности, так называемых “технических”) по отношению к автогенератору. Фаза автогенератора под действием таких шумов меняется по тому же закону, по которому меняются координаты частицы в броуновском движении [11].

Рассмотрим приращение фазы флуктуаций кварцевого автогенератора, воспользовавшись приращением (1) за время  $\tau$

$$\Delta\Psi(t,t) = \Psi_U(t) - \Psi_U(t,t) \quad (3)$$

Запишем выражение для спектра фазового шума, соответствующее (1)

$$S_y(w) = \left| \frac{2 + j\omega t_0}{1 + j\omega t_0} \right|^2 Z^2 S_m''(w) + \left| \frac{1}{j\omega t_0 |1 + j\omega t_0|} \right|^2 S_m^\perp(w), \quad (4)$$

где  $S_m''(w) = S_m^E(w) + \frac{S_n'}{(1 - S_n^0)^2 + \omega^2 t_E^2} S_m^E(w)$

В [10] показано, что

$$S_{\Delta\Psi}(w) = 2(1 - \cos\omega t) S_y(w) \quad (5)$$

Тогда

$$S_{\Delta\Psi}(w,t) = 2(1 - \cos\omega t) \left\{ \frac{4 + \omega^2 t_0^2}{1 + \omega^2 t_0^2} Z^2 \left[ S_m''(w) + \frac{S_n'}{(1 - S_n^0)^2 + \omega^2 t_E^2} S_m^E(w) \right] + \frac{S_m^2(w)}{\omega^2 t_0^2 (1 + \omega^2 t_0^2)} \right\} \quad (6)$$

Предположим, что спектры  $S_m'(w)$ ,  $S_m^E(w)$ ,  $S_m^\perp(w)$  известны. Для стационарного процесса

$$\Delta\Psi_U(t,t) = \Delta\Psi_U(t) \quad (7)$$

Пусть  $\overline{\Delta\Psi_U^2(t)} = \overline{\Delta\Psi_{U1}^2(t)} + \overline{\Delta\Psi_{U2}^2(t)} + \overline{\Delta\Psi_{U3}^2(t)}$  (8)

Тогда  $\overline{\Delta\Psi_{U1}^2(t)} = \frac{Z^2}{p} \int_0^\infty \frac{4 + \omega^2 t_0^2}{1 + \omega^2 t_0^2} S_m''(w) (1 - \cos\omega t) d\omega$

$$\overline{\Delta\Psi_{U1}^2(t)} = \frac{Z^2}{p} \int_0^\infty \frac{4 + \omega^2 t_0^2}{1 + \omega^2 t_0^2} \frac{S_n'}{(1 - S_n^0)^2 + \omega^2 t_E^2} S_m^E(w) (1 - \cos\omega t) d\omega \quad (9)$$

$$\overline{\Delta\Psi_{U3}^2(t)} = \int_0^{\infty} S_m^{\perp}(w) \frac{1 - \cos wt}{w^2 t_Q^2 (1 + w^2 t_Q^2)} dw$$

Рассмотрим классический случай, когда

$$S_m''(w) = S_m''(0) \quad S_m^E(w) = S_m^E(w) \quad S_m'^{\perp}(w) = S_m'^{\perp}(w) \quad (10)$$

Тогда

$$\overline{\Delta\Psi_{U1}^2(t)} = \frac{S_m''(0)}{\rho} Z^2 \int_0^{\infty} \frac{4 + w^2 t_Q^2}{1 + w^2 t_Q^2} (1 - \cos wt) dw \quad (11.1)$$

$$\overline{\Delta\Psi_{U2}^2(t)} = \frac{S_n' S_m^E(0)}{\rho} Z^2 \int_0^{\infty} \frac{4 + w^2 t_Q^2}{1 + w^2 t_Q^2} \frac{1 - \cos wt}{(1 - S_n^0)^2 + w^2 t_E^2} dw \quad (11.2)$$

$$\overline{\Delta\Psi_{U3}^2(t)} = \frac{S'^{\perp}(0)}{\rho t_Q^2} \int_0^{\infty} \frac{1 - \cos wt}{w^2 (1 + w^2 t_Q^2)} dw \quad (11.3)$$

Рассмотрим выражение (11.1). Запишем

$$\begin{aligned} \frac{\rho}{S_m''(0) Z^2} \overline{\Delta\Psi_{U1}^2(t)} &= 4 \int_0^{\infty} \frac{dw}{1 + w^2 t_Q^2} + \int_0^{\infty} \frac{w^2 t_Q^2}{1 + w^2 t_Q^2} dw - 4 \int_0^{\infty} \frac{\cos wt}{1 + w^2 t_Q^2} dw - \int_0^{\infty} \frac{w^2 t_Q^2}{1 + w^2 t_Q^2} \cos wt dw = \\ &= \frac{4}{t_Q} \int_0^{\infty} \frac{dx}{1 + x^2} + \frac{1}{t_Q} \int_0^{\infty} \frac{x^2}{1 + x^2} dx - \frac{4}{t_Q} \int_0^{\infty} \frac{\cos at}{1 + x^2} dx - \frac{1}{t_Q} \int_0^{\infty} \frac{x^2}{1 + x^2} \cos ax dx = \\ &= \frac{4}{t_Q} \arctg x \Big|_0^{\infty} + \frac{1}{t_Q} x \Big|_0^{\infty} - \frac{1}{t_Q} \arctg x \Big|_0^{\infty} - \frac{4}{t_Q} \frac{\rho}{2} e^{-|a|} - \frac{1}{t_Q} \int_0^{\infty} \frac{x^2}{1 + x^2} \cos ax dx, \end{aligned}$$

где  $a = \frac{t}{t_Q}$

Ограничиваясь реальной частотой  $w_B$  и учитывая, что

$$\int_0^{\infty} \frac{x^2}{1 + x^2} \cos ax dx \approx 0, \text{ имеем}$$

$$\overline{\Delta\Psi_{U1}^2(t)} = \left( \frac{w_B}{\rho} + \frac{3}{2t_Q} - \frac{2}{t_Q} e^{-t/t_Q} \right) Z^2 S_m''(0) \quad (12.1)$$

Аналогично

$$\overline{\Delta\Psi_{U_2}^2}(t) = \frac{1}{2} \left( \frac{w_B}{1-s_v} - \frac{1}{t_E} e^{-t/t_E} \right) S_n' z^2 S_m^E(0) \quad (12.2)$$

$$\overline{\Delta\Psi_{U_3}^2}(t) = \frac{1}{8Q_{KB}^2} \left( \frac{1+z^2}{1-z^2} \right)^2 t w_B^2 S_m^\perp(0) \quad (12.3)$$

Прежде, чем привести результаты расчёта зависимости суммарного паразитного набега фазы  $\sqrt{\overline{\Delta\Upsilon_U^2}} = \sqrt{\overline{\Delta\Upsilon_{U_1}^2}(t) + \overline{\Delta\Upsilon_{U_2}^2} + \overline{\Delta\Psi_{U_3}^2}(t)}$  от интервала когерентности  $t$ , попробуем сделать некоторые качественные выводы, следующие из (12.1), (12.2), (12.3):

1) синфазная компонента (12.1) и компонента, вызванная инерционностью смещения (12.2) пропорциональны квадрату расстройки частоты кварцевого генератора относительно частоты последовательного резонанса кварцевого резонатора, следовательно, для уменьшения фазовых флуктуаций генератора очень важно работать как можно ближе к частоте последовательного резонанса кварцевого резонатора, а "не тянуть" частоту кварцевого генератора к номинальной;

2) квадратурная компонента фазовых флуктуаций (12.3) мало зависит от расстройки ( $z^2 \ll 1$ ), но пропорциональна интервалу когерентности  $t$  и обратно пропорциональна квадрату добротности  $Q_{KB}$ , следовательно, основной инструмент её снижения – это разработка кварцевых генераторов с возможно большей добротностью;

3) исключительно весом вклад полосы пропускания буферного усилителя, входящего в состав кварцевого генератора, и характеризуемой частотой  $w_B$  (в квадратурной компоненте (12.3) квадратично); эффективный путь снижения этого влияния – применение высокодобротных, в том числе кварцевых, фильтров на выходе кварцевых генераторов;

4) уменьшение суммарного паразитного набега фазы возможно за счет снижения уровней шумовых спектров  $S_m^E$ ,  $S_m^\perp$ ,  $S_m''$ . Их уровень определяется качеством компонентов, из которых построен опорный генератор. Уровень шума генератора, собранного на малошумящих компонентах, при прочих равных условиях, может быть ниже уровня шума генератора, собранного на компонентах, не предназначенных для малошумящих устройств, на 20 и более дБ.

## Результаты расчёта

Для выяснения достоверности полученных выражений было проведено сравнение расчетных и экспериментальных результатов паразитного набега фазы сигнала гетеродина миллиметрового диапазона (34 ГГц) РЛС «Руза» [12], у которого частота опорного кварцевого генератора равна 80 МГц. По результатам измерений набег фазы на интервале 1 – 5 мс составил от 6 до 7 градусов. Результаты расчета по формулам (12.1) – (12.3) в широком диапазоне интервалов когерентности и для различных значений опорной частоты приведены в табл.1 и на рис.1. Отметим, что значения набега фазы автогенератора пересчитывались в миллиметровый диапазон путем умножения на отношение частот гетеродина и кварцевого генератора. На интервалах наблюдения 1 – 5 мс рассчитанный по формулам (12.1) – (12.3) суммарный паразитный набег фазы составляет 3,1 – 3,4 градуса. Учитывая, что технический паразитный набег фазы (“шумовая дорожка”) умножителей частоты высокой кратности, смесителей и усилителей тракта гетеродина “Руза” составлял примерно 4 градуса, результаты расчёта представляются весьма точными. Из табл.1 также следует, что частота опорного генератора 80 МГц была выбрана наилучшим образом: на интервале измерения 5 мсек и генератор 40 МГц и генератор 160 МГц с аналогичными параметрами демонстрируют суммарный паразитный набег фазы худший, чем генератор 80 МГц. При этом любая из частот в интервалах (40...80) МГц и (80...160) МГц не проходит в качестве опорной из условия кратности частоте первого гетеродина, равной 3,2 ГГц.

Интересно просчитать зависимости паразитного набега фазы от интервала когерентности для ряда перспективных частот гетеродина миллиметрового диапазона таким образом, чтобы второй переменной являлась опорная частота, а исходными данными расчета были параметры кварцевого генератора, разработанного в ОАО “Радиофизика” [7, 8, 9]. Результаты такого расчёта представлены в табл.2 и на рис.2 ( $f_{\text{гет}}=30$  ГГц), в табл.3 и на рис.3 ( $f_{\text{гет}}=60$  ГГц), в табл.4 и на рис.4 ( $f_{\text{гет}}=90$  ГГц), в табл.5 и на рис.5 ( $f_{\text{гет}}=120$  ГГц).

В частности, результаты расчета паразитного фазового набега на интервале когерентности 1 мсек для  $f_{\text{гет}}=30$  ГГц (табл. 2) подтверждают правильность выбора частоты опорного кварцевого генератора равной 160 МГц [9].

## Выводы

Получены аналитические выражения для трех составляющих фазовых флуктуаций в транзисторном кварцевом генераторе, разработанном в ОАО “Радиофизика”. Рассчитаны зависимости паразитного набега фазы кварцованного гетеродина от интервала когерентности для широкого диапазона частот опорного кварцевого генератора. По результатам расчетов могут быть предложены следующие рекомендации по структуре построения кварцованных гетеродинов с малым суммарным паразитным набегом фазы:

1) на пикосекундных и микросекундных интервалах когерентности (интересны, в частности, для создания детальных радиопортретов целей) необходимо использование как можно более высокочастотного генератора, стабилизированного кварцем [3,7], либо генератора с, по крайней мере, не худшей добротностью и не меньшим уровнем выходной мощности;

2) на миллисекундных интервалах наиболее оптимальным представляется кварцевый генератор, разработанный в ОАО “Радиофизика” для РЛС “Лама – М” [9].

3) необходимую когерентность на секундных интервалах измерения может обеспечить прецизионный низкочастотный кварцевый генератор, работающий на некоторой частоте, лежащей в диапазоне частот (2,5...4) МГц, где добротность кварцевых резонаторов достигает своего абсолютного максимума ( $>2 \cdot 10^6$ ) [7].

Авторы полагают, что моделью опорного генератора, наиболее близкого к идеальному, является устройство, содержащее, по крайней мере, два кварцевых генератора с одним или несколькими кольцами фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), каждое из которых обеспечивает стабилизацию частоты более высокочастотного генератора сигналом более низкочастотного. При выборе оптимальных фильтров в каждом из колец ФАПЧ результирующее распределение паразитного набега фазы по оси интервала когерентности позволит обеспечить максимально возможную когерентность гетеродина, и, соответственно, РЛС во всем заданном диапазоне интервалов когерентности.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований на тему “Повышение энергетического потенциала и точностных характеристик радиолокаторов путем расширения интервалов когерентности их радиотрактов”.



Таблица 1

Fo, MHz	tau									
	1ps	1ns	100ns	10mks	1ms	5ms	10ms	100ms	1s	10s
8	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	9.9	12
20	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1	6.4	8.3	19
40	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.4	4.5	5.6	12	35
80	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.4	3.8	7.7	22	70
160	2.2	2.2	2.2	2.2	2.6	3.8	4.9	14	44	140

Таблица 2

Fo, MHz	tau									
	1ps	1ns	100ns	10mks	1ms	10ms	100ms	1s	10s	100s
2	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.6
3	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.3	5.9
4	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.7	5.8
5	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.1	4.3	6.1
8	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.3	3.9	8.0
10	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	3.0	4.1	9.6
20	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.1	2.7	6.1	18
30	1.6	1.6	1.6	1.6	1.7	1.7	1.9	3.2	8.8	28
60	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.3	2.1	5.6	17	55
80	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.2	2.5	7.4	23	73
120	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	1.4	3.6	11	35	110
160	0.7	0.7	0.7	0.7	0.9	1.6	4.7	15	46	146
240	0.6	0.6	0.6	0.6	0.9	2.3	7.0	22	69	220
320	0.5	0.5	0.5	0.5	1.1	3.0	9.3	29	93	293
480	0.4	0.4	0.4	0.4	1.4	4.4	14	44	139	439
640	0.4	0.4	0.4	0.4	1.9	5.9	19	59	185	586
960	0.3	0.3	0.3	0.4	2.8	8.8	28	88	278	879
1280	0.3	0.3	0.3	0.4	3.7	12	37	117	371	1172

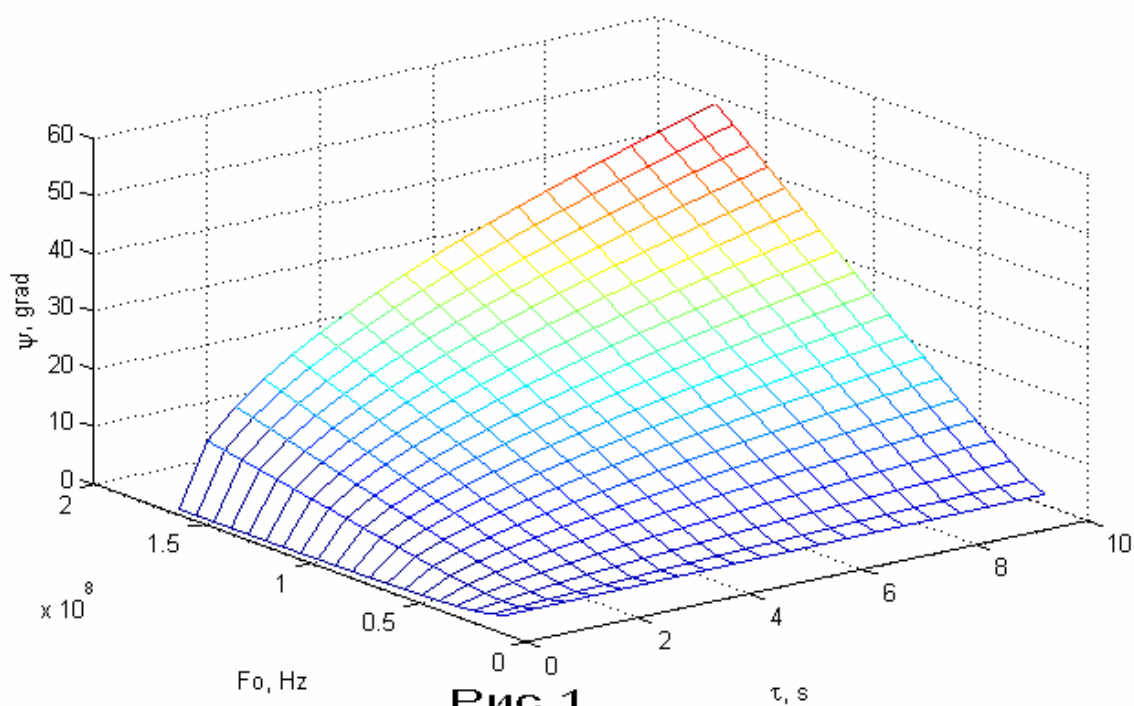
Таблица 3

Fo, MHz	tau									
	1ps	1ns	100ns	10mks	1ms	10ms	100ms	1s	10s	100s
2	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
3	10	10	10	10	10	10	10	10	11	12
4	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.1	9.3	12
5	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.6	12
8	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.6	7.9	16
10	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7		5.7	6.0	8.1	19
20	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.1	4.2	5.5	12	37
30	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.7	6.4	18	55
60	2.3	2.3	2.3	2.3	2.4	2.6	4.2	11	35	110
80	2.0	2.0	2.0	2.0	2.1	2.5	5.1	15	46	146
120	1.6	1.6	1.6	1.7	1.8	2.7	7.1	22	70	220
160	1.4	1.4	1.4	1.4	1.7	3.3	9.4	29	93	293
240	1.2	1.2	1.2	1.2	1.8	4.5	14	44	139	439
320	1.0	1.0	1.0	1.0	2.1	5.9	19	59	185	586
480	0.8	0.8	0.8	0.9	2.9	8.8	28	88	278	879
640	0.7	0.7	0.7	0.8	3.8	12	37	117	371	1172
960	0.6	0.6	0.6	0.8	5.6	18	56	176	556	1758
1280	0.5	0.5	0.5	0.9	7.4	234	74	234	741	2344

Таблица 4

Fo, MHz	tau									
	1ps	1ns	100ns	10mks	1ms	10ms	100ms	1s	10s	100s
2	19	19	19	19	19	19	19	19	19	20
3	16	16	16	16	16	16	16	16	16	18
4	14	14	14	14	14	14	14	14	14	17
5	12	12	12	12	12	12	12	12	13	18
8	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.8	12	24
10	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	9.0	12	29
20	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1	6.3	8.2	18	55
30	4.9	4.9	4.9	4.9	5.0	5.0	5.6	9.6	27	83
60	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.9	6.3	17	52	165
80	3.0	3.0	3.0	3.0	3.1	3.7	7.6	22	70	220
120	2.5	2.5	2.5	2.5	2.7	4.1	11	33	104	330
160	2.1	2.1	2.1	2.1	2.6	4.9	14	44	139	439
240	1.7	1.7	1.7	1.8	2.7	6.8	21	66	208	659
320	1.5	1.5	1.5	1.5	3.2	8.9	28	88	278	879
480	1.2	1.2	1.2	1.3	4.3	13	42	132	417	1318
640	1.1	1.1	1.1	1.2	5.7	18	56	176	556	1758
960	0.9	0.9	0.9	1.2	8.4	26	83	264	834	2637
1280	0.8	0.8	0.8	1.3	11	35	111	352	1112	3516

Fo, MHz	tau									
	1ps	1ns	100ns	10mks	1ms	10ms	100ms	1s	10s	100s
2	26	26	26	26	26	26	26	26	26	27
3	21	21	21	21	21	21	21	21	21	24
4	18	18	18	18	18	18	18	18	19	23
5	16	16	16	16	16	16	16	16	17	24
8	13	13	13	13	13	13	13	13	16	32
10	11	11	11	11	11	11	11	12	16	38
20	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.4	11	25	74
30	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6	6.7	7.5	13	35	110
60	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	5.2	8.4	22	70	220
80	4.0	4.0	4.0	4.0	4.1	5.0	10	30	93	293
120	3.3	3.3	3.3	3.3	3.6	5.5	14	44	139	439
160	2.9	2.9	2.9	2.9	3.4	6.5	19	59	185	586
240	2.3	2.3	2.3	2.3	3.6	9.1	28	88	278	879
320	2.0	2.0	2.0	2.1	4.2	12	37	117	371	1172
480	1.6	1.6	1.7	1.7	5.8	18	56	176	556	1758
640	1.4	1.4	1.4	1.6	7.5	23	74	234	741	2344
960	1.2	1.2	1.2	1.6	11	35	111	352	1112	3516
1280	1.0	1.0	1.0	1.8	15	47	148	469	1482	4687



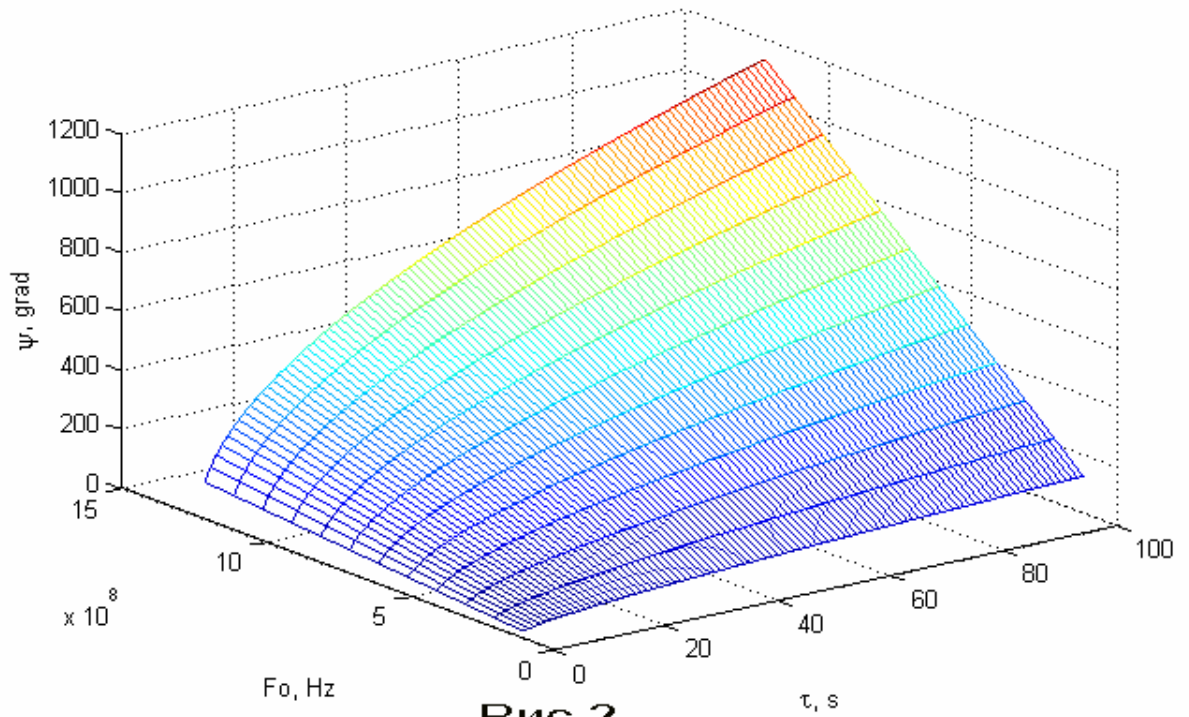


Рис.2

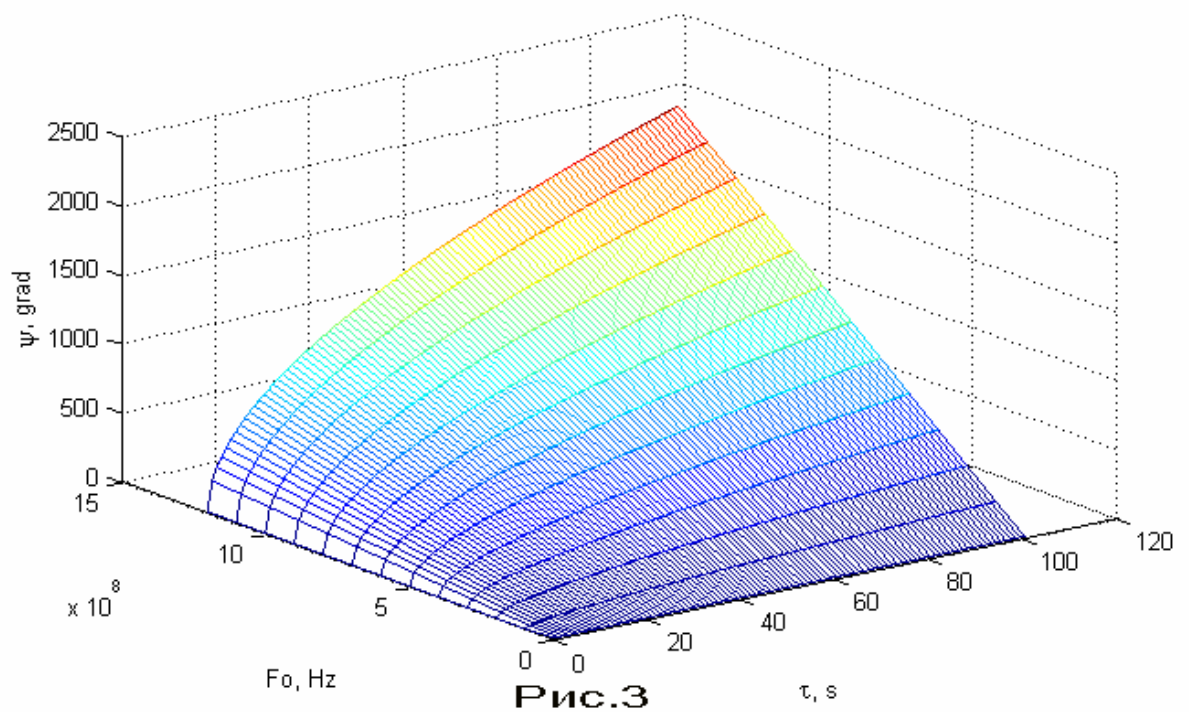
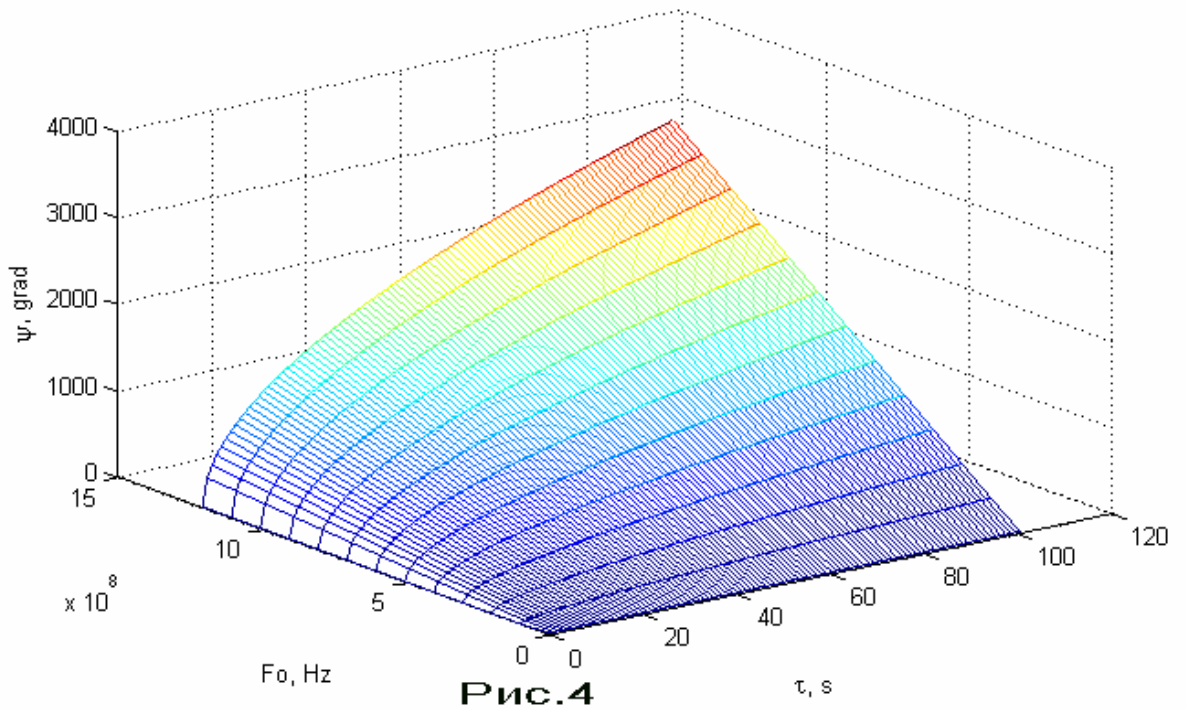
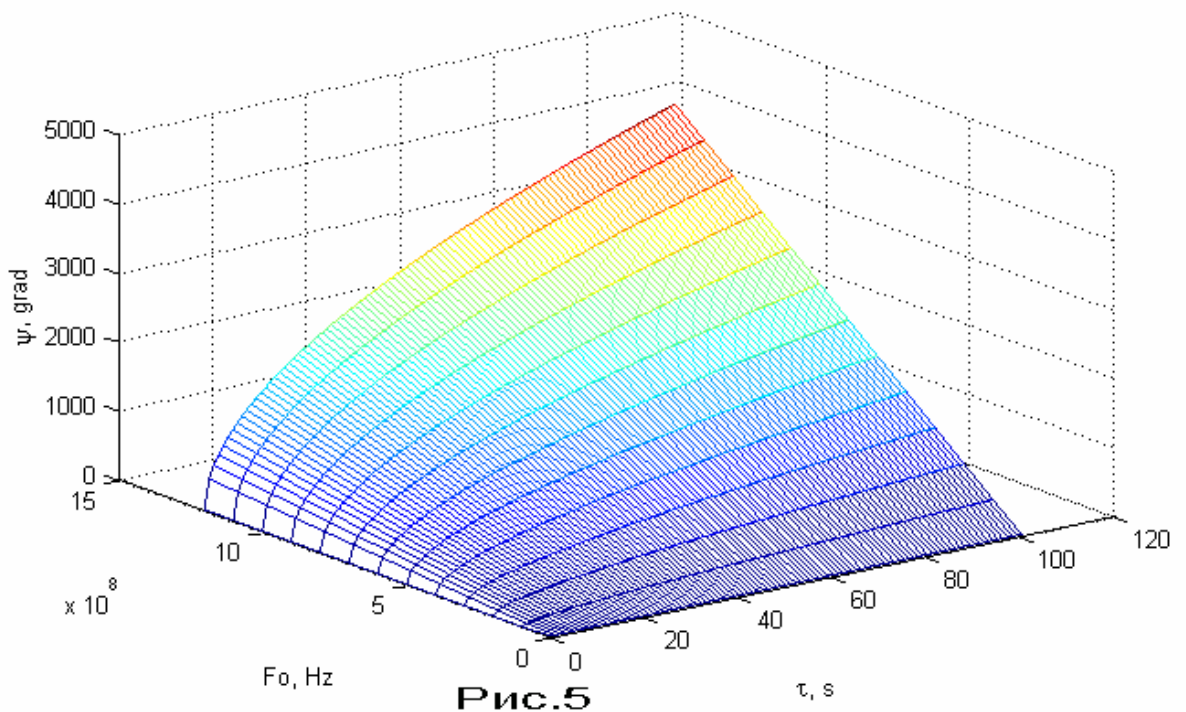


Рис.3



**Рис.4**



**Рис.5**

## Литература

1. Kuleshov V.N. Yanushevsky G.D.  $1/f$  frequency fluctuations and nonlinearity of quartz resonators and quartz crystal oscillators. – Proc. 48 th Frequency Control Symposium, May 1994.
2. Gallion S., Mourey M., Sthal F. New phase-noise model for crystal oscillators: application to the Clapp oscillator. – IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics, and Frequency Control, November 2003, vol. 50, no. 11.
3. Oita T. High frequency crystal oscillator and high, frequency signal generating method. – Patent US 6,762,651 B2, July 13, 2004.
4. Кобельков Г.П., Курикша В.А., Левитан Б.А., Очков Д.С., Соловьев Г.К., Толкачев А.А., Топчиев С.А., Фарбер В.Е. Создание РЛС радиовидения в миллиметровом диапазоне волн. – Радиолокация и связь, 2006, №2.
5. Курикша В.А. Возможность быстрого обзора пространства в радиолокаторах с цифровой ФАР. – Радиолокация и связь, 2006, №1.
6. Tan G.H. A highly stable, phase coherent, wideband microwave synthesizer for radio astronomy applications. – Proc. 53 th Int. Freq. Contr. Symp., May 1999.
7. Молчанов Е.Г., Очков Д.С., Силаев Е.А., Формальнов И.С., Чубаров Д.В.
8. Гетеродины СМ-диапазона с низким уровнем фазовых шумов. – Радиотехника (Журнал в журнале), 2006, №10.
9. Очков Д.С., Силаев Е.А., Формальнов И.С. Оценка интервалов когерентности радиотракта РЛС. – Радиотехника (Журнал в журнале), 2006, №4.
10. Кусов Г.А., Очков Д.С., Ратцева Л.В., Силаев Е.А., Сударенко А.А., Терехин М.Я., Формальнов И.С., Шилов В.П. Формирование высокостабильных сигналов миллиметрового диапазона для радиолокационных устройств. – Радиолокация и связь, 2006, №1.
11. Жалуд В., Кулешов В.Н. Шумы в полупроводниковых устройствах. – М.: Сов. радио, 1977.
12. Горелик Г.С. К вопросу о технической и естественной ширине линии лампового генератора. – ЖЭТВ, 1950, т. 20, вып. 4.
13. Tolkachev A.A., Levitan B.A., Solovjev G.K. et al. A Megawatt Power Millimeter-Wave Phased-array Radar. – IEEE AES Systems Magazine, July 2000.