

УДК 621.3

## МЕТОД СТАБИЛИЗАЦИИ ГАРМОНИЧЕСКОГО СИГНАЛА ЧАСТОТЫ УПРАВЛЯЕМОГО ГЕНЕРАТОРА В УСЛОВИЯХ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЧАСТОТНЫХ АНОМАЛИЙ

Лисицын Л.А., Крохина Е.В.

*Представлен метод стабилизации частоты подстраиваемого генератора, основанный на функциональной схеме «треугольник», включающей в себя два квантовых стандарта частоты и кварцевый генератор. Задачей исследования является достижение стабильного синусоидального сигнала с кратковременной нестабильностью частоты  $3 \cdot 10^{-13}$ . Показано, что в ходе решения поставленной задачи были учтены физические свойства и характеристики каждого из источников синусоидального гармонического сигнала. Приведены результаты моделирования в САПР Matlab, демонстрирующие возможные состояния системы и работу представленного метода.*

### Введение

В настоящее время при разработке радиотехнических устройств и комплексов космического назначения важной задачей является обеспечение требуемого уровня стабильности частоты гармонического сигнала. Варианты решения данной задачи представлены в работах исследователей навигационных систем [1, 2]. Однако, многие из них представляют собой классическую систему фазовой автоподстройки частоты, в которой стабилизация осуществляется с помощью сигнала-поправки. Обеспечение требований по стабильности сигнала представляет собой сложную задачу, поскольку уровень стабильности частоты квантовых генераторов – величина непрогнозируемая и случайная, значение которой зависит от многих факторов. Поэтому при разработке радиотехнических устройств необходимо учитывать физические свойства всех источников гармонических синусоидальных сигналов системы, т.е. возможность пропадания и возникновения флуктуаций сигнала.

Классической схемой стабилизации частоты подстраиваемого генератора является одноконтурная схема с фазовой автоподстройкой частоты. В ее состав входят: опорный генератор, подстраиваемый генератор, фазовый детектор и фильтрующий блок, выход которого соединен с входом управления подстраиваемого генератора [3]. Фазовый детектор формирует сигнал ошибки  $\Delta f$  (сигнал рассогласования)

$$\Delta f = f_n - f_i,$$

где  $f_i$  – опорная частота, Гц;  
 $f_n$  – частота подстраиваемого генератора.

Этот сигнал  $\Delta f$  проходит через фильтрующий блок, который подавляет входные частоты  $f_i$  и  $f_n$ , а также их суммарную частоту  $f_o = f_n + f_i$  и поступает на вход управления подстраиваемого генератора.

В таких устройствах существуют проблемы стабилизации частоты выходного сигнала подстраиваемого генератора в условиях кратковременного пропадания опорного сигнала или возникновения в нем частотных флуктуаций в виде аддитивного белого шума, математической моделью которого служит случайный процесс  $\underline{z}(t)$ , такой что  $[\underline{z}(t)] = 0$ , с корреляционной функцией

$$\Gamma(t, \tau) = [\underline{z}(t + \tau)\underline{z}(t)] = \sigma^2(t)\delta(\tau),$$

где  $\delta(\tau)$  – дельта функция Дирака;  
 $\sigma^2(t)$  – интенсивность белого шума.

### 1 Основной принцип реализации стабилизации частоты подстраиваемого генератора

В представленной схеме задача стабилизации частоты решается следующим образом: в кольцо автоподстройки введен второй опорный сигнал, блок обработки сигнала управления, а также первый, второй и третий аналого-цифровые преобразователи (АЦП). Структурная схема устройства, построенного по данному методу, включает в себя два квантовых стандарта частоты и один кварцевый генератор, аналого-цифровые преобразователи, фазовый детектор и блок формирования управляющего сигнала и представлена на рисунке 1.

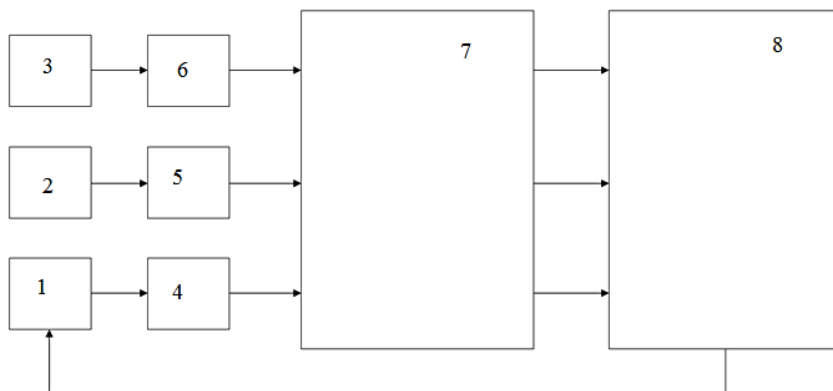


Рисунок 1 – Структурная схема устройства фазовой автоподстройки частоты

Источниками опорного сигнала являются квантовый стандарт частоты 2 и квантовый стандарт частоты 3 с долговременной стабильностью выходной частоты. Источником выходного сигнала устройства является управляемый кварцевый генератор 1 с высокой стабильностью частоты на малых промежутках времени. Для преобразования аналоговых сигналов в цифровые устройство содержит три аналого-цифровых преобразователя 4,5,6. Отчеты оцифрованных

сигналов генераторов с выходов АЦП поступают на входы фазового детектора 7, где определяется разность фаз сигналов по схеме «треугольник». Первые два фазоразностных сигнала используются для контроля стабильности квантовых стандартов частоты, а третий – для контроля работы управляемого кварцевого генератора. С выхода измерителя разности фаз сигналы поступают на блок формирования сигнала управления 8, алгоритм работы которого способен анализировать возникающие флуктуации частоты от трех источников сигнала, проводить оценку и формировать сигнал ошибки, характеризующий разницу фаз этих входных сигналов. С выхода блока 8 в виде обратной связи поступает на вход управляемого кварцевого генератора 3, корректируя его выходную частоту. В фазовом детекторе 7 входные аналоговые сигналы, поступающие с генераторов, дискретизируются с помощью быстродействующих АЦП и в виде цифрового кода поступают на вход измерителя. В измерителе разности фаз цифровые сигналы с помощью фильтра Гильберта преобразуются в аналитические сигналы.

Расчет фазы в момент времени  $t$  реализует алгоритм CORDIC, в котором некий произвольный угол можно представить в виде суммы углов

$$\varphi_i = \pm \operatorname{atan}(2^{-i}),$$

где  $\varphi_i$  – угол поворота вектора;

$i = 0, 1, 2$  и т.д. – номер итерации поворота вектора.

Полученные значения фаз сигналов поступают на вход вычитателя. Разностный сигнал фаз с выхода вычитателя проходит через децимирующие фильтры и поступает на выход фазового детектора.

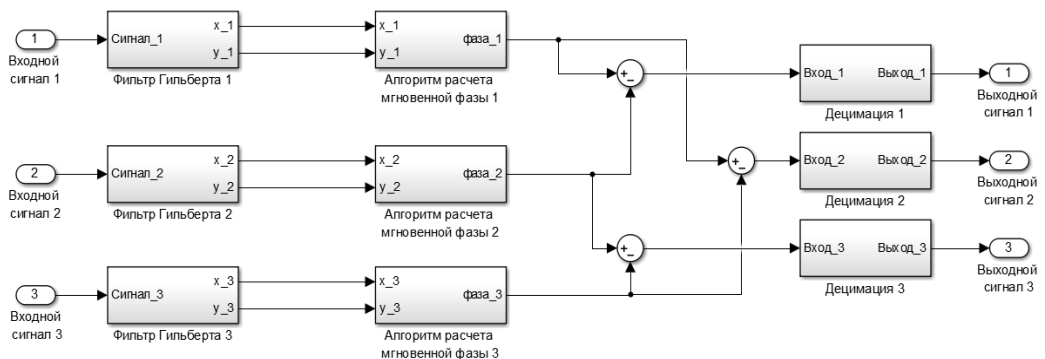


Рисунок 2 – Структурная схема фазового детектора

Блок 8 обработки сигнала управления содержит электронно-вычислительные средства, например процессор с записанной в нем программой обработки, в соответствии с которой осуществляется анализ временных интервалов выходных сигналов фазового детектора 7 и формирование сигнала ошибки, который используется в качестве управляющего для кварцевого генератора 1.

В результате оцифровки, фильтрации и нахождения фазы входных гармонических сигналов от квантовых стандартов частоты и управляемого кварцевого генератора с выходов фазового детектора на входы блока обработки сигнала управления поступают значения следующих разностей фаз:

- разность фаз  $\Delta\varphi_1$  управляемого кварцевого генератора 1 и квантового стандарта частоты 2;
- разность фаз  $\Delta\varphi_2$  управляемого кварцевого генератора 1 и квантового стандарта частоты 3;
- разность фаз  $\Delta\varphi_3$  квантового стандарта частоты 2 и квантового стандарта частоты 3.

Первые два сигнала разности фаз используются для контроля стабильности квантового стандарта частоты, а третий – для контроля работы управляемого кварцевого генератора.

Алгоритм принятия решения в блоке формирования сигнала управления основан на сравнительном анализе математического ожидания  $m_{\Delta y_k}$  и среднеквадратического отклонения  $\sigma_{\Delta y_k}$  сигналов разности фаз и последующем выборе более стабильного опорного сигнала. Определение момента возникновения флуктуаций осуществляется путем сравнения текущих изменений разности фаз сигналов. По результатам анализа формируется сигнал ошибки, который поступает с выхода блока 8 в виде обратной связи на вход управляемого кварцевого генератора 1.

Формирование сигнала ошибки в блоке обработки сигнала управления осуществляется алгоритмом обработки, принцип которого заключается в следующем.

Полученные в фазовом детекторе 7 значения разностей фаз представляют собой случайные величины  $y_1, y_2, y_3$ , которые подвержены воздействию различных факторов (ошибка измерения, тренд заданного уровня, постоянные смещения), что позволяет применить вероятностный критерий оценки точности при решении статистической матричной игры. В ходе игры формируется платежная матрица, в которой величина платежа  $\beta_{ij}$  основана на нормальном законе распределения

$$\beta_{ij} = P(A) = P\{y_k \in [-R, R]\} = P\{-R < y_k < R\} = \Phi(\alpha_2) - \Phi(\alpha_1), \quad (1)$$

где  $A$  – событие, заключающееся в том, что сигнал находится в области  $[-R, R]$  допустимых значений;

$R$  – пороговое значение нестабильности частоты;

$y_k$  – случайные величины, т.е. значения разностных сигналов квантовых стандартов частоты 2, 3 и управляемого кварцевого генератора 1;

$\Phi(\alpha_2)$  и  $\Phi(\alpha_1)$  – функции нормального распределения, значения которых определяются с помощью функции Лапласа;

$\alpha_1, \alpha_2$  – нормированные, безразмерные габариты области значений разностных сигналов генераторов, рассчитываемых по формулам:

$$\alpha_1 = \frac{-R - m_{\Delta y_k}}{\sigma_{\Delta y_k}}, \alpha_2 = \frac{R - m_{\Delta y_k}}{\sigma_{\Delta y_k}}. \quad (2)$$

Далее определяются статистические характеристики разностей, в качестве которых рассматриваются математическое ожидание  $m_{\Delta y}$  и среднеквадратическое отклонение  $\sigma_{\Delta y}$

$$m_{\Delta y} = \sum_{i=1}^n y_i \cdot p_i,$$

$$\sigma_{\Delta y} = \sqrt{\sum_{i=1}^n y_i^2 \cdot p_i - m_{\Delta y}^2},$$

где  $y_i$  – случайная величина;  
 $p_i$  – вероятность события.

По результатам оценивания каждой из разностей соответствует по три величины платежа  $\beta_{ij}$ , из которых формируется матрица размерностью «3×3» (таблица 1), где индекс  $i$  – строка,  $j$  – столбец.

Т а б л и ц а 1 – Статистическая матрица

| $V_i \Pi_j$ | $\Pi_1$      | $\Pi_2$      | $\Pi_3$      |
|-------------|--------------|--------------|--------------|
| $V_1$       | $\beta_{11}$ | $\beta_{12}$ | $\beta_{13}$ |
| $V_2$       | $\beta_{21}$ | $\beta_{22}$ | $\beta_{23}$ |
| $V_3$       | $\beta_{31}$ | $\beta_{32}$ | $\beta_{33}$ |

Для дальнейшего выбора используется вероятностный критерий точности – правило, по которому принимается решение

$$V^* = \max_i \min_j \beta_{ij}. \quad (3)$$

Он основан на том, что оптимальной принимается та стратегия, которая в наихудших условиях гарантирует максимальный выигрыш. Процесс принятия решения осуществляется следующим образом. В рассматриваемом случае примем сторону « $V_i$ » (разностные сигналы генераторов) как максимизирующую, а « $\Pi_j$ » (типовые ситуации оценки) как нейтральную. Целью решения игры является обоснование оптимального выбора стратегии для максимизирующей стороны, а вторая сторона играет роль нейтральной. В этом случае для стороны « $V$ » выбирается максиминная стратегия, т.е. наиболее стабильный сигнал.

В результате матрица имеет три решения:

1) При решении  $V_1$  можно сделать вывод о том, относительно более стабильный опорный сигнал  $f_{\text{опт}}$  формирует квантовый стандарт частоты  $f_2$ , поэтому в качестве управляющего сигнала необходимо использовать сигнал ошибки разности фаз между квантовым стандартом частоты  $f_2$  и управляемым кварцевым генератором  $f_1$ .

2) При решении  $B_2$  можно сделать вывод о том, относительно более стабильный опорный сигнал  $f_{\text{опт}}$  формирует квантовый стандарт частоты  $f_3$ , поэтому в качестве управляющего сигнала необходимо использовать сигнал ошибки разности фаз между квантовым стандартом частоты  $f_3$  и управляемым кварцевым генератором  $f_1$ .

3) При решении  $B_3$  можно сделать вывод о том, что частота управляемого кварцевого генератора  $f_1$  самопроизвольно варьируется, либо он вышел из строя, поэтому блоку обработки сигнала управления 8 необходимо выдать сигнал аварии.

## 2 Результаты моделирования

Проверка работоспособности метода была проведена посредством моделирования с помощью пакета прикладных программ Matlab при выбранном интервале времени оценки 900 с.

В качестве примера были созданы по закону нормального распределения в диапазоне от  $-3 \cdot 10^{-13}$  до  $3 \cdot 10^{-13}$  модели восьми случайных сигналов, имитирующих разностные сигналы с выхода фазового детектора 7. Для имитации флуктуаций в момент времени  $t$  к основному сигналу прибавляется белый шум. В результате были рассмотрены следующие варианты возможных ситуаций:

1) Первая ситуация изображена на графиках «а», «б», «в», «г» рисунка 3. На графике «а» изображен сигнал разности фаз между квантовым стандартом частоты 2 и управляемым кварцевым генератором 1, в котором на отрезке времени от 300 до 600 с было добавлено случайное возмущающее воздействие. На графике «б» изображен сигнал разности фаз между квантовым стандартом частоты 3 и управляемым кварцевым генератором 1, в котором на отрезке времени от 600 до 900 с было добавлено случайное возмущающее воздействие. На графике «в» изображен сигнал разности фаз между квантовым стандартом частоты 2 и квантовым стандартом частоты 3, в котором на отрезке времени от 0 до 300 с было добавлено случайное возмущающее воздействие. На графике «г» изображен сигнал ошибки, формируемый в блоке обработки сигнала управления на временном интервале 0-900 с. Из анализа графиков следует, что сигнал ошибки, который является управляющим для кварцевого генератора 1, не имеет флуктуаций на всем промежутке времени оценки.

2) Вторая ситуация изображена на графиках «д», «е», «ж», «з» рисунка 4. На графике «д» изображен сигнал разности фаз между квантовым стандартом частоты 2 и управляемым кварцевым генератором 1, в котором на отрезке времени от 300 до 600 с было добавлено случайное возмущающее воздействие. На графике «е» изображен сигнал разности фаз между квантовым стандартом частоты 3 и управляемым кварцевым генератором 1, в котором на отрезке времени от 600 до 900 с было добавлено случайное возмущающее воздействие. На графике «ж» изображен сигнал между квантовым стандартом частоты 2 и квантовым стандартом частоты 3, в котором на отрезке времени от 0 до 300 с было добавлено случайное возмущающее воздействие. На графике «з»

изображен сигнал ошибки, формируемый в блоке обработки сигнала управления на временном интервале 0-900 с. Из анализа графиков следует, что наличие флуктуаций в графиках «д» и «е» говорит о варьировании частоты управляемого генератора 1 либо одного из квантовых стандартов частоты 2 или 3, однако, третий график «ж» сигнала разности фаз квантовых стандартов частоты 2 и 3 подтверждает наличие сбоя работы управляемого генератора 1, вследствие чего выходной управляющий сигнал «з» на временном интервале 300-900 с отсутствует, что характеризует нештатную ситуацию.

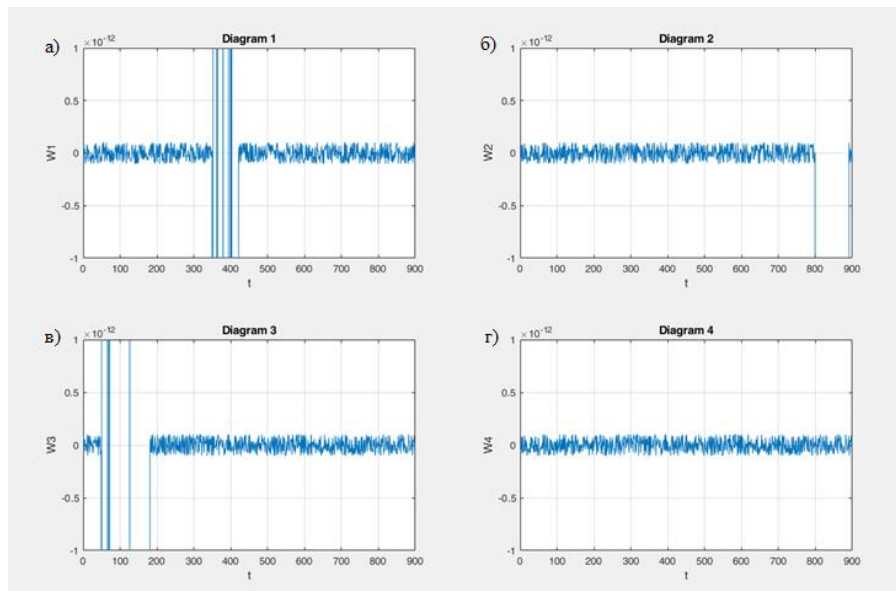


Рисунок 3 – Графики сигналов разностей фаз. Ситуация 1

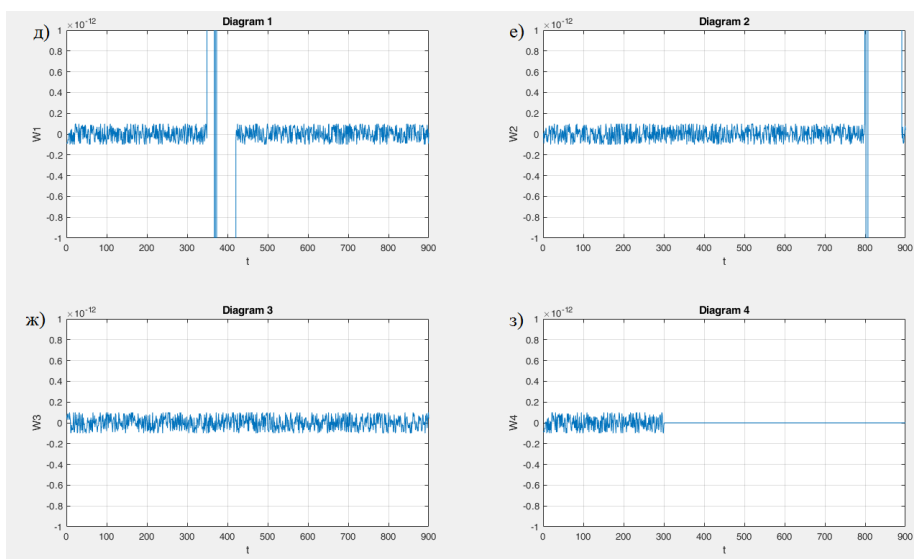


Рисунок 4 – Графики сигналов разностей фаз. Ситуация 2

### **Заключение**

Таким образом, представленный метод стабилизации гармонического сигнала частоты управляемого генератора, основанный на функциональной схеме «треугольник», включающий в себя два квантовых стандарта частоты и кварцевый генератор, способен обеспечить формирование выходного гармонического сигнала опорного генератора с кратковременной нестабильностью не хуже  $3 \cdot 10^{-13}$ .

### **Литература**

1 *Дмитриев С.П., Колесов Н.В., Осипов А.В.* Информационная надежность, контроль и диагностика навигационных систем. – С-Пб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2003.

2 *Одуан К., Гино Б.* Измерение времени. Основы GPS. – М.: Техносфера, 2002.

3 *Шахгильдян В.В., Ляховский А.А.* Системы фазовой автоподстройки частоты. – М.: Связь, 1972.

4 *Гмурман В.Е.* Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике. – М.: Высшая школа, 2004.

5 *Колобашкина Л.В.* Основы теории игры. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011.