

Модель уходов частоты опорного генератора приемника СРНС

При описании наблюдаемых сигналов СРНС обычно учитывается вклад в доплеровскую частоту, который вносит дрейф опорного генератора приемника - $\Delta\omega_e$. Многочисленные исследования показывают, что динамика этого дрейфа сильно влияет на характеристики помехоустойчивости алгоритмов слежения. Поэтому при синтезе оптимального алгоритма необходимо задавать как можно более адекватную модель процесса $\Delta\omega_{e,k}$ для получения корректных результатов. Для получения модели уходов частоты реального генератора был проведен эксперимент над ОГ «Морион» ГК-99ТК, который стоял в приемном модуле РНПИ разработки «КБ НАВИС».



Рис. 1 Схема эксперимента по снятию уходов частоты ОГ.

В ходе эксперимента снимались временные зависимости отклонения частоты ОГ, перенесенной на несущую частоту сигнала GPS - 1575,42 МГц. Шаг съема данных - 1 с, погрешность измерения - не хуже 0,5 Гц.

Эксперимент проводился в режиме слежения за реальными спутниками системы GPS при высоком отношении с/ш и нулевой динамике потребителя. Схема эксперимента приведена на рис. 1

На рисунке ниже приведен типичный дрейф частоты генератора после включения питания (процесс разогрева и выхода на установившийся режим).

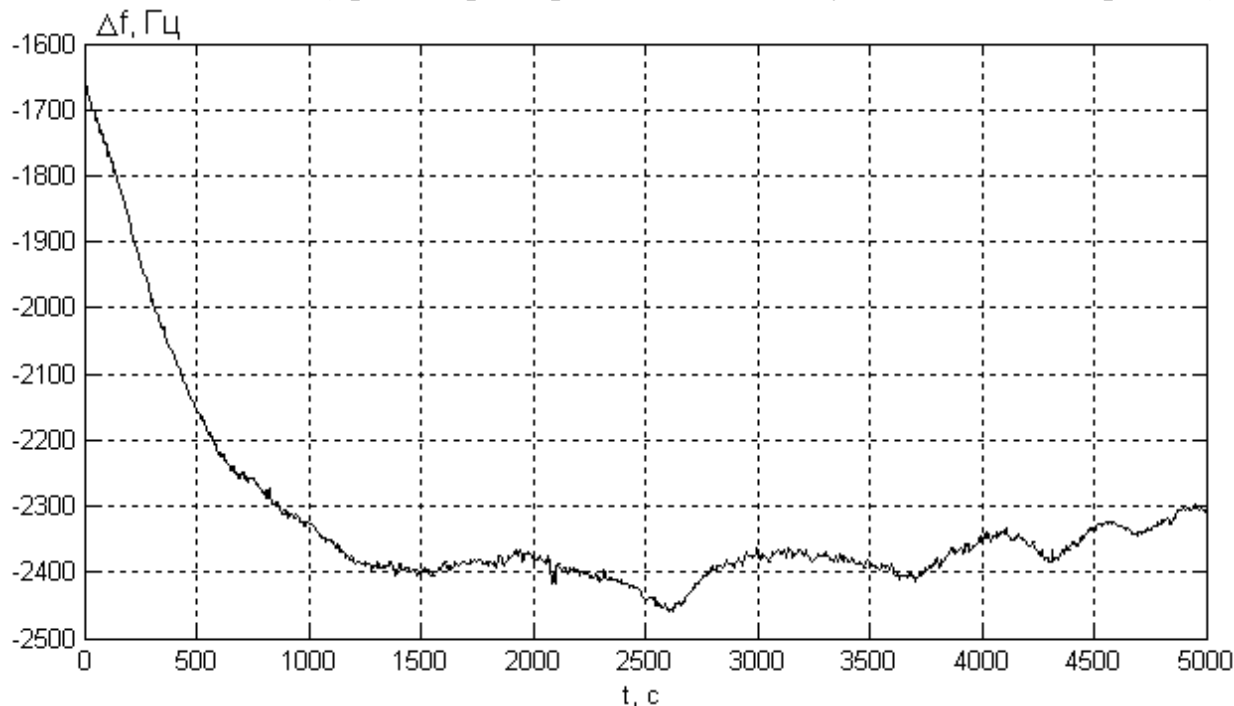


Рис. 2. Уход частоты опорного генератора.

Спектральный анализ десяти подобных выборок показал, что спектральная плотность мощности уходов частоты опорного генератора (СПМ процесса $\Delta f(t)$) лучше всего аппроксимируется двусторонним спектром вида:

$$S_{\Delta f}(f) = \frac{S_0}{f^2}, \quad (1)$$

где $S_0 = 7.5 \text{ Гц}^4 \cdot \text{с}$

Такая аппроксимация соответствует винеровскому уходу частоты ОГ, если ограничиться только классом линейных моделей. Однако, если сравнить реализацию винеровского процесса и процесс дрейфа частоты ОГ во временной области, можно заметить их различный характер. На рис. 2 проиллюстрированы временные зависимости дрейфов частоты опорного генератора, даваемые различными моделями. Все процессы для удобства сравнения центрированы относительно своих мат. ожиданий. На первом графике мы видим экспериментально полученную траекторию, на втором – траекторию полученную при винеровской аппроксимации со спектральной плотностью формирующего шума $S_0 = 7.5 \text{ Гц}^4 \cdot \text{с}$, на третьем – траекторию, полученную путём моделирования нелинейной динамической системы с шумовым воздействием.

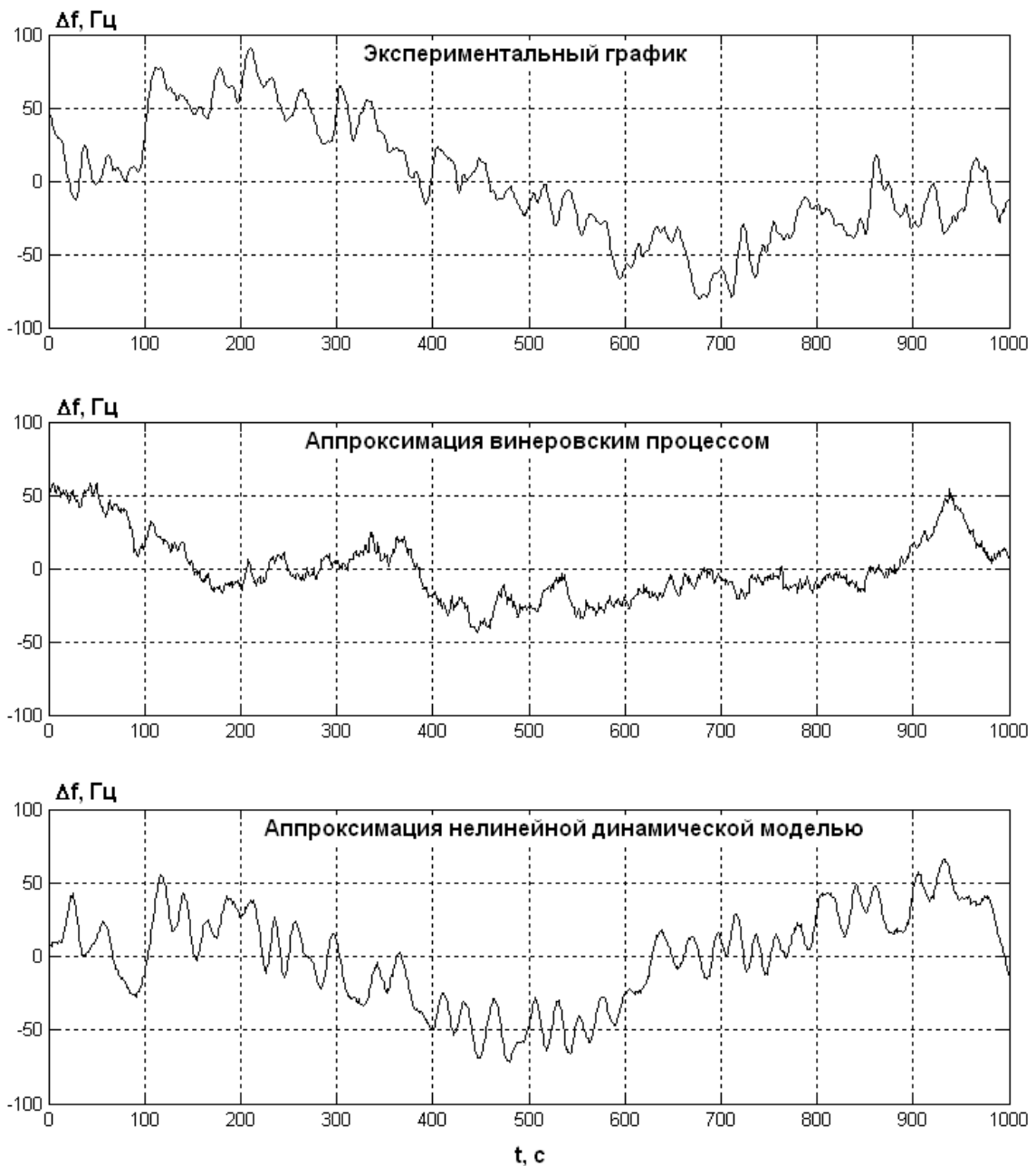


Рис. 2. Временные зависимости дрейфов частот опорного генератора, даваемые различными моделями.

Из графиков видно, что аппроксимация нелинейной динамической моделью лучше подходит для описания уходов частот опорного генератора, чем аппроксимация винеровским процессом. Спектр процесса на третьем графике также близок к винеровскому, как и спектр экспериментально записанной реализации дрейфа частоты, однако сам процесс винеровским не является, а описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned}
 f_k &= f_{k-1} + K_1 \cdot u_{k-1} + \xi_k, \\
 u_k &= u_{k-1} + T \cdot K_2 \cdot (-u_{k-1} + v_{k-1}), \\
 v_k &= v_{k-1} + T \cdot (K_3 \cdot u_{k-1} - v_{k-1} - u \cdot w) + \xi_k, \\
 w_k &= w_{k-1} + T \cdot (-K_4 \cdot w_{k-1} + u_{k-1} \cdot v_{k-1}).
 \end{aligned} \tag{2}$$

Это есть нелинейная система разностных уравнений, на которую действует дискретный белый шум ξ . В основе системы лежит хаотический генератор Лоренца, описываемый компонентами u, v, w , T - интервал дискретизации. Таким образом, мы получаем представление, какой именно должна быть модель дрейфов внутреннего генератора приемника. А именно – нелинейной, и не меньше чем 4-го порядка.

Однако использование модели, подобной (2), для алгоритма оптимальной фильтрации вряд ли оправдано. Тем более её не стоит использовать, когда речь идёт о моделировании опорного генератора в реальной аппаратуре. Поэтому для синтеза алгоритмов будем пользоваться моделью опорного генератора в виде винеровского процесса частоты:

$$\Delta\omega_{2,k} = \Delta\omega_{2,k-1} + \sigma_2 \cdot n_{2,k}, \quad (3)$$

где n_2 - дискретный белый шум с нулевым мат. ожиданием и единичной дисперсией.

σ_2 - среднеквадратичное значение отсчетов формирующего шума для ухода частоты опорного генератора. $\sigma_2 = \sqrt{S_0 \cdot T} \cdot \left(\frac{2\pi \cdot 12 \text{ МГц}}{1575.42 \text{ МГц}} \right)$, $S_0 = 7.5 \text{ Гц}^4 \cdot \text{с}$ - двусторонняя спектральная плотность формирующего шума. Здесь отклонение $\Delta\omega_{2,k}$ [рад/с], рассматривается как отклонение частоты выходного сигнала ОГ от номинала (в данном случае 12 МГц).

«Развод по понятиям»

Инженера-электронщика, который занимается анализом ТСХО, может и заинтересует процесс $\Delta\omega_{2,k}$ - отклонение частоты выходного сигнала ОГ от своего номинала. Однако разработчика алгоритмов прежде всего волнует тот уход частоты, который «чувствуют» петли слежения и алгоритмы поиска. Обозначим его $\delta\omega_{\text{ог}}(t)$. Этот уход получается после переноса выходного сигнала ОГ на несущую частоту $f_{\text{н}}$ в следствие гетеродинирования принимаемого сигнала СРНС. $\delta\omega_{\text{ог}}(t)$ связана с относительной нестабильностью частоты ОГ как

$$\delta\omega_{\text{ог}}(t) = 2\pi f_{\text{н}} \delta\nu_{\text{ог}}(t) \quad (4)$$

$\delta\omega_{\text{ог}}(t)$ - наблюдаемое петлёй отклонение частоты ОГ в рад/с;

$\delta\nu_{\text{ог}}$ - относительная нестабильность частоты ОГ, которая связана с

отклонением «физического» выхода ОГ $\Delta\omega_{2,k}$ как $\delta\nu_{\text{ог}} = \frac{\Delta\omega_2}{\omega_0}$ (ω_0 - номинал

ТСХО);

$f_{\text{н}}$ - несущая частота (1602 МГц для ГЛОНАСС).

Динамическая модель процесса $\delta\omega_{\text{ог}}(t)$ в непрерывном времени:

$$\frac{d\delta\omega_{\text{ог}}(t)}{dt} = \xi_{\text{ог}}(t), \quad \frac{d\delta v_{\text{ог}}(t)}{dt} = \xi_v(t), \quad \xi_{\text{ог}}(t) = 2\pi f_{\text{н}} \xi_v(t).$$

$\xi_{\text{ог}}(t)$ — БГШ с двусторонней СПМ $N_{\text{ог}}/2$ (отчет о НИР «Вальсет», статья «А.Ю.Шатилов. Методика расчета помехоустойчивости комплексной ФАП в НАП СРНС/ИНС» ($N_{\text{ог}} \equiv S_{\text{ог}}$));

$\xi_v(t)$ - БГШ с двусторонней СПМ $N_{\xi_v}/2$ (книга ГЛОНАСС, гл. 7);

$$N_{\text{ог}} = S_{\text{ог}} = (2\pi f_{\text{н}})^2 N_{\xi_v}. \quad (5)$$

Текущая неразбериха

1. В отчете о НИР Сигнал-СП используется ($N_{\xi_v} = 8 \cdot 10^{-21} \text{ с}^{-1}$) \Leftrightarrow ($N_{\text{ог}} = 0.81 \text{ рад}^2/\text{с}^3$) – это «хороший ОГ».

2. В книге ГЛОНАСС, гл.7, даны значения для

- ГК-99: ($N_{\xi_v} = 7,79 \cdot 10^{-19} \text{ с}^{-1}$) \Leftrightarrow ($N_{\text{ог}} = 79 \text{ рад}^2/\text{с}^3$);

- ГК89-ТС ($N_{\xi_v} = 7,79 \cdot 10^{-22} \text{ с}^{-1}$) \Leftrightarrow ($N_{\text{ог}} = 0,079 \text{ рад}^2/\text{с}^3$);

(К сожалению, книга не учитывает фазовых шумов ЧФД и ГУНа)

3. В статье 2009 г. «А.Ю.Шатилов. Методика расчета помехоустойчивости комплексной ФАП в НАП СРНС/ИНС» для ГК-99 дается

$$(N_{\xi_v} = 3,1 \cdot 10^{-17} \text{ с}^{-1}) \Leftrightarrow (N_{\text{ог}} = 3167 \text{ рад}^2/\text{с}^3)$$

Цифры получены по упрощенной методике, подвергшейся сильной критике со стороны В.Н. Харисова. Кроме того, здесь был учтен дрейф выхода на режим (прогрев) – неясно насколько это правильно.

4. В магистерской диссертации А.Ю. Шатилова экспериментальные исследования уходов ГК-99 дали следующие цифры (см. первый раздел):

$$(N_{\xi_v} = 6 \cdot 10^{-18} \text{ с}^{-1}) \Leftrightarrow (N_{\text{ог}} = 608 \text{ рад}^2/\text{с}^3)$$

5. Для моделирования в рамках НИР Вальсет выбран «хороший» современный ОКГ, дающий СКО динамической ошибки 0,02 рад в системе ФАП 3-го порядка с полосой 1 Гц . То есть, ОГ, имеющий фазовые шумы на уровне фазового шума несущей спутников ГЛОНАСС-М. В качестве примера из мира ОГ можно привести Symmetricom 9633.

$$(N_{\xi_v} = 6 \cdot 10^{-23} \text{ с}^{-1}) \Leftrightarrow (N_{\text{ог}} = 0,00608 \text{ рад}^2/\text{с}^3).$$

Где правда?

Подробным изучением воздействия уходов ОГ на систему ФАП ещё никто не занимался. Приведенные цифры получены при различных приближениях, о справедливости которых никто толком не знает. Наиболее

обоснованным на сегодняшний день является исследование фазовых шумов несущей ГЛОНАСС и GPS, выполненное в статье Болденков/Шатилов «Влияние фазовых шумов несущей сигналов СРНС ГЛОНАСС и GPS на чувствительность и помехоустойчивость системы ФАП» за 2010 год. Если взять наилучший на сегодняшний день кварцевый ОГ типа Symmetricom, то он обеспечит примерно такую же девиацию Аллана (при $\tau=1с$), как и генератор на спутнике. В этом случае, при анализе нестабильности частоты надо учитывать также и нестабильность несущей. Поэтому значения спектральных плотностей из статьи надо удвоить:

$$(N_{\xi_v} = 1,2 \cdot 10^{-22} \text{ с}^{-1}) \Leftrightarrow (N_{\text{ог}} = 0,013 \text{ рад}^2/\text{с}^3)$$

Эти цифры предлагается использовать как параметры нестабильности «хорошего» на сегодняшний день ОГ.

В качестве оценок для «плохого» ОГ, взяв за основу ГК-99, наиболее достоверной представляется оценка по п. 4, поскольку она наиболее отвечает экспериментальным данным. Поэтому для «плохого» ОГ можно брать параметры

$$(N_{\xi_v} = 6 \cdot 10^{-18} \text{ с}^{-1}) \Leftrightarrow (N_{\text{ог}} = 608 \text{ рад}^2/\text{с}^3)$$

В качестве «среднего» ОГ можно взять GTXO-83 GOLLEDGE, используемый в массовых коммерческих модулях СН-4706. По результатам обработки экспериментальных данных, для него получаются следующие параметры:

$$(N_{\xi_v} = 1,1 \cdot 10^{-19} \text{ с}^{-1}) \Leftrightarrow (N_{\text{ог}} = 11 \text{ рад}^2/\text{с}^3)$$

Аналогичные характеристики имеет ОГ приемника Javad Lexon LGGD.

Итоговая таблица с параметрами моделей для различных ОГ.

| Качество ОГ | Высшее | Среднее | Низкое |
|---|--|-----------------------|--------------------|
| Пример модели | Symmetricom 9633, или генератор НКА ГЛОНАСС-М, | GTXO-83 (GOLLEDGE) | ГК-99ТК (Морион) |
| Параметр $N_{\xi_v}, \text{с}^{-1}$ | $1,2 \cdot 10^{-22}$ | $1,1 \cdot 10^{-19}$ | $6 \cdot 10^{-18}$ |
| Параметр $N_{\text{ог}}, \text{рад}^2/\text{с}^3$ | 0,013 | 11 | 608 |

ИНС

При поддержке приемника от ИНС её ошибки вносят динамическое возмущение, аналогично нестабильности ОГ. В следующей таблице предприняты попытки рассчитать параметры нестабильности для ИНС, как если бы ИНС была опорным генератором.

Параметры динамики ошибок ИНС.

| Класс ИНС | Навигационный: высокоточные корабельные и авиационные ИНС (пример P-MIGITS II) | Навигационный: авиационные ИНС средней точности (пример LN-200G, HG-1700) | Тактический: ИНС для СУ ВТО - КР, МБР, РСЗО, КАБ | MEMS (пример – ADIS16350) |
|--|---|---|---|---------------------------------|
| Максимальный уход, км/ч | 2 | 11 | 100 | 350 |
| Параметр N_{ξ_v}, с⁻¹ | $5 \cdot 10^{-22}$ | $2 \cdot 10^{-20}$ | $1.5 \cdot 10^{-18}$ | $1.6 \cdot 10^{-17}$ |
| Параметр $N_{\text{ИНС}}$, рад²/с³ | 0,05 | 2 | 150 | 1600 |