

УДК 621.396

Экспериментальные исследования ограничений времени накопления пилотной компоненты навигационных сигналов, обусловленных нестабильностью частоты опорного генератора

© Авторы, 2013

А. Ю. Шатилов – к.т.н., науч. сотрудник, Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Е. Н. Болденков – к.т.н., доцент кафедры радиотехнических систем, Национальный исследовательский университет «МЭИ»

И. В. Липа – аспирант кафедры радиотехнических систем, Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Увеличение времени преддетекторного когерентного накопления пилотной компоненты навигационного сигнала позволяет повысить чувствительность и помехоустойчивость навигационного приемника в режимах доописка и некогерентного слежения. При отсутствии динамики движения потребителя время накопления ограничено нестабильностью частоты опорного генератора. В статье приведены методика и результаты исследований данного ограничения применительно к ряду распространенных опорных генераторов.

Ключевые слова: радионавигация, навигационная аппаратура, нестабильность частоты.

Increasing accumulation time for the pilot component of navigation signal allows improvement of the receiver's sensitivity and antijam capability in fine acquisition and non-coherent tracking modes. For static user position, the reference oscillator's drift is the only limiting factor for the correlator accumulation time. The scope of this article is the experimental exploration of oscillator's drift impact on the SNR and accumulation time problem. The experiment technique and results are presented for a number of popular TCXOs.

Keywords: radionavigation, navigation receiver, frequency instability.

Введение

Известно [1], что увеличение времени преддетекторного накопления в навигационном приемнике позволяет повысить чувствительность и помехоустойчивость как в режиме доописка и обнаружения сигнала, так и в режиме слежения. При обработке сигналов, модулированных неизвестным навигационным сообщением, время преддетекторного накопления ограничено длительностью символа этого сообщения. Однако с появлением технологии снятия навигационного сообщения (wire-off), а также новых пилотных сигналов, это ограничение отсутствует. Следующим препятствием на пути увеличения времени накопления оказывается динамика потребителя и нестабильность частоты опорного генератора (ОГ). В ряде применений на стационарных и малоподвижных объектах, а также при тесно связанном комплексировании с инерциальной навигационной системой (ИНС), динамикой потребителя можно пренебречь и нестабильность частоты ОГ становится решающим фактором при выборе времени преддетекторного накопления.

Цель работы – экспериментальное нахождение верхней границы времени преддетекторного накопления при условии, что оно ограничено только нестабильностью ОГ.

Рассмотрим корреляционный интеграл вида

$$I(T_{acc}) = \int_{t_0}^{t_0 + T_{acc}} y_{вх}(t) h_{дк}(t - \varepsilon_r) \exp\{i(\varphi_0 + \omega_0(t - t_0) + \delta\varphi(t - t_0))\} dt, \quad (1)$$

где T_{acc} – время накопления; $h_{дк}(t)$ – функция дальномерного кода, принимающая значения ± 1 ; ε_r – ошибка оценивания задержки; φ_0 – фаза опорного колебания на момент начала интегрирования t_0 ; ω_0 – частота опорного колебания на момент t_0 ; $\delta\varphi(t - t_0)$ – случайный процесс дрейфа фазы ОГ относительно детерминированной линейной составляющей $\varphi_0 + \omega_0(t - t_0)$. Положим, что в момент $t = t_0$ случайное смещение фазы ОГ равно нулю, т.е. $\delta\varphi(0) = 0$. Будем также считать, что ошибка оценивания задержки равна нулю: $\varepsilon_r = 0$. Входной сигнал, параметры которого полностью известны и совпадают с параметрами опорного колебания в момент t_0 ,

$$y_{вх}(t) = A \cdot h_{дк}(t) \cdot \cos(\varphi_0 + \omega_0(t - t_0)) + n(t), \quad (2)$$

где $n(t)$ – белый гауссовский шум с односторонней спектральной плотностью N_0 .

Подставив (2) в (1), получим выражение

$$I(T_{acc}) = \frac{A}{2} \int_{t_0}^{t_0+T_{acc}} \exp(i\delta\varphi(t-t_0)) dt + \int_{t_0}^{t_0+T_{acc}} n(t) \exp\{i(\varphi_0 + \omega_0(t-t_0) + \delta\varphi(t-t_0))\} dt, \quad (3)$$

в котором можно выделить полезную и шумовую составляющие. Дисперсия комплексной шумовой составляющей в приближении, что $T_{acc} \gg \frac{1}{2\pi\omega_0}$, равна

$$D_I = M \left[\left| \int_{t_0}^{t_0+T_{acc}} n(t) \exp\{i(\varphi_0 + \omega_0(t-t_0) + \delta\varphi(t-t_0))\} dt \right|^2 \right] = \frac{N_0}{2} T_{acc}. \quad (4)$$

Отсюда отношение сигнал-шум на выходе коррелятора

$$q_I(T_{acc}) = \frac{A^2}{2N_0 T_{acc}} \left| \int_{t_0}^{t_0+T_{acc}} \exp(i\delta\varphi(t-t_0)) dt \right|^2. \quad (5)$$

Можно убедиться, что при отсутствии случайного дрейфа фазы ОГ, когда $\delta\varphi(t-t_0) = 0$, подынтегральное выражение в (5) равно 1, интеграл в (5) растёт как T_{acc} , а отношение сигнал-шум на выходе коррелятора равно $q_I(T_{acc}) = \frac{A^2 T_{acc}}{2N_0}$.

т.е. отношение сигнал-шум прямо пропорционально времени накопления, что общеизвестно. Однако наличие расходящегося случайного процесса $\delta\varphi(t-t_0)$ приводит к тому, что подынтегральное выражение в (5) становится знакопеременным в действительной и мнимой частях. Рост интеграла прекращается, а следовательно, $q_I(T_{acc})$ начнет падать при достижении времени накопления некоего критического момента, т.е. дальнейшее накопление уже не приведет к увеличению отношения с-ш, оно бессмысленно и даже вредно. На рис. 1 представлены зависимости отношения с-ш от времени накопления для трёх реализаций процесса дрейфа фазы ОГ $\delta\varphi(t-t_0)$, записанных с опорного генератора ГК-206 с учетом переноса на несущую частоту 1602 МГц.

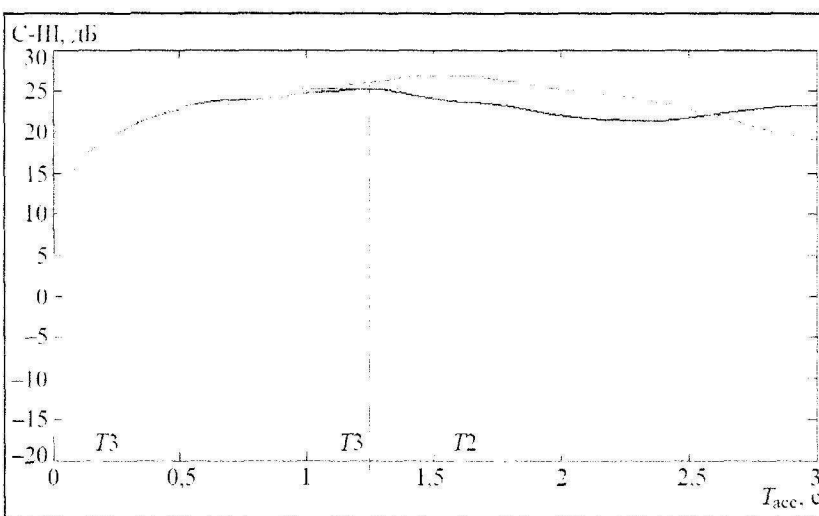


Рис. 1

Задачей данного исследования является определение предельного времени накопления T_{acc} (при котором отношение сигнал-шум на выходе коррелятора максимально) по выборкам процесса $\delta\varphi(t-t_0)$, записанного с реальных кварцевых ОГ, применяемых в навигационном приемнике.

Методика эксперимента

Методика эксперимента основана на взаимном гетеродинировании сигналов от двух ОГ одной серии номиналом 10 МГц. Сигнал одного из ОГ переносится на несущую частоту ГЛОНАСС L1 1602 МГц, другого – на 1698 МГц. Результирующие сигналы подаются на входы аналогового смесителя, на выходе которого формируется разностное колебание на промежуточной частоте 96 МГц. Это колебание оцифровывается и переносится на нулевую частоту с помощью цифрового квадратурного гетеродина. Вся цифровая часть и АЦП тактируются от второго исследуемого ОГ. Цифровые квадратуры результирующего сигнала записываются в память и далее обрабатываются на компьютере специальным программным обеспечением. Структурная схема установки, реализующей данную методику, представлена на рис. 2.

Записанные цифровые квадратуры являются комплексным процессом вида

$$\hat{x}(t_k) = U \exp\{i(\delta\varphi_1(t_k) - \delta\varphi_2(t_k))\}, \quad (6)$$

где $\delta\varphi_1(t_k)$, $\delta\varphi_2(t_k)$ – соответствующие отклонения фазы 1-го и 2-го ОГ относительно номинального линейного роста фазы на несущей частоте 1602 МГц. Из $\hat{x}(t_k)$ легко выделить процесс

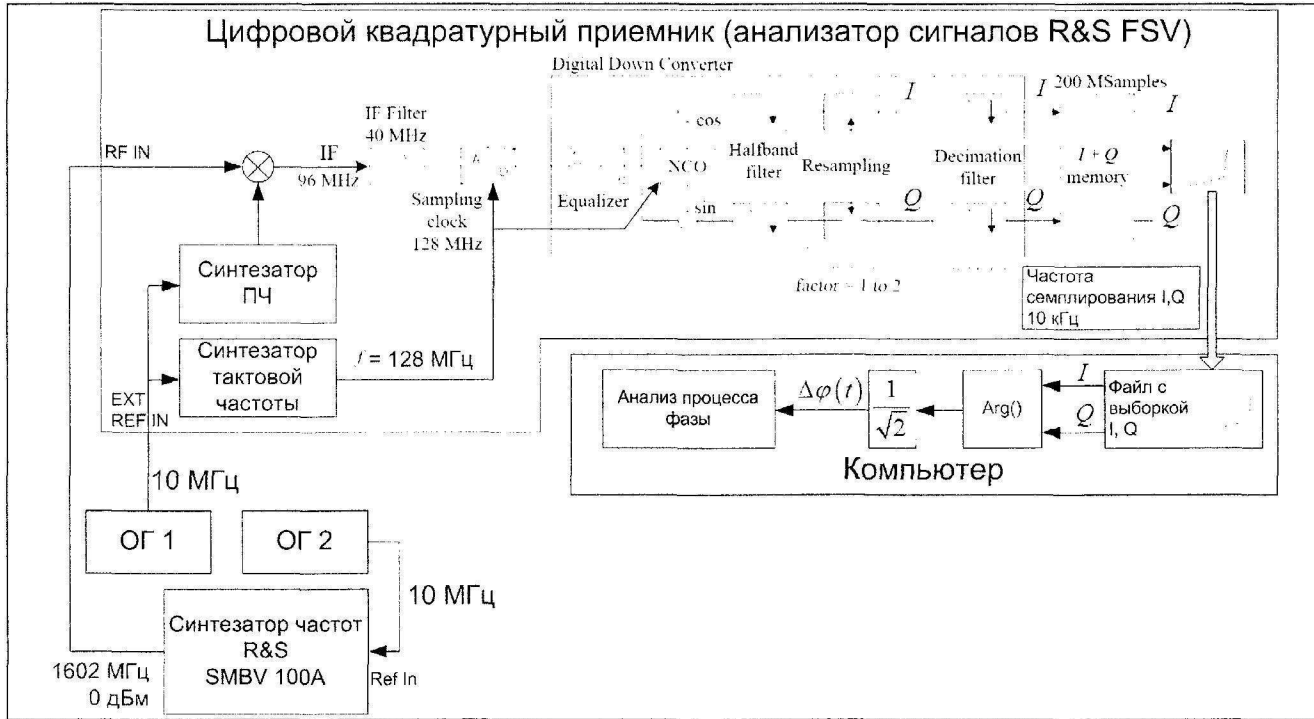


Рис. 2

$$\delta\varphi(t_k) = \frac{\delta\varphi_1(t_k) - \delta\varphi_2(t_k)}{\sqrt{2}}, \quad (7)$$

который приближенно будем считать процессом кратковременной нестабильности фазы для ОГ данной серии с учетом переноса колебания ОГ на несущую 1602 МГц. Производная $\frac{d\delta\varphi(t)}{dt} = \delta\omega(t)$ является процессом мгновенной нестабильности частоты ОГ. Типичный вид процесса $\delta\omega(t)$ (оцененный для ОГ ГК-99 с помощью системы фазовой автоподстройки (ФАП) 3-го порядка с полосой 100 Гц) приведен на рис. 3.

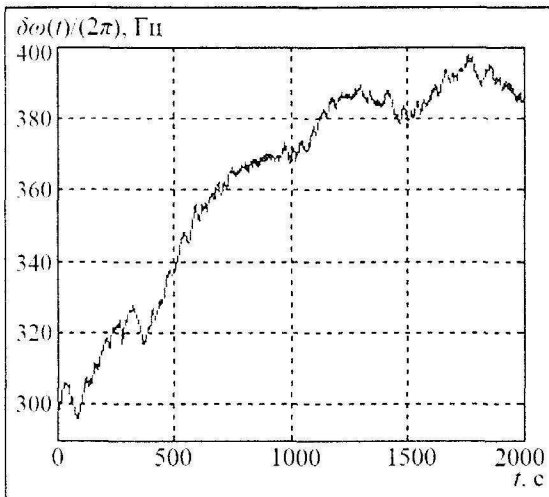


Рис. 3

$T_{асс}$ основана на поиске аргумента первого максимума функции, пропорциональной отношению с-ш (5), что проиллюстрировано на рис. 1. По заданному участку выборки, начиная с отсчета m , рассчитывается функция, пропорциональная отношению с-ш (5),

$$\hat{q}_N = \frac{1}{N} \left| \sum_{k=0}^{N-1} \exp\{i(\delta\varphi(t_{m+k}) - \delta\varphi(t_m) - \omega_m kT)\} \right|^2, \quad (8)$$

Характеристики разработанной установки:

инструментальная среднеквадратичная погрешность измерения процесса разности фаз $\delta\varphi(t_k) - 0,06^\circ$ (погрешность носит шумовой характер);

частота дискретизации процесса $\delta\varphi(t_k) - 10$ кГц;

максимальная длительность выборки: 20000 с (200 Msamples).

Разработанное программное обеспечение позволяет находить: девиацию Аллана для исследуемого ОГ;

время накопления $T_{асс}$, соответствующее максимуму отношения с-ш, для разных участков выборки (см. рис. 1, т. T_1, T_2, T_3);

динамическую ошибку слежения за фазой ОГ в ФАП 2-го или 3-го порядка с заданной полосой;

минимальную полосу ФАП 2-го или 3-го порядка, при которой сохраняется слежение за фазой ОГ (шумы наблюдений отсутствуют).

Девиация Аллана рассчитывается по выборке фазы $\delta\varphi(t_k)$ в соответствии с определением [2].

Методика нахождения максимального времени накопления

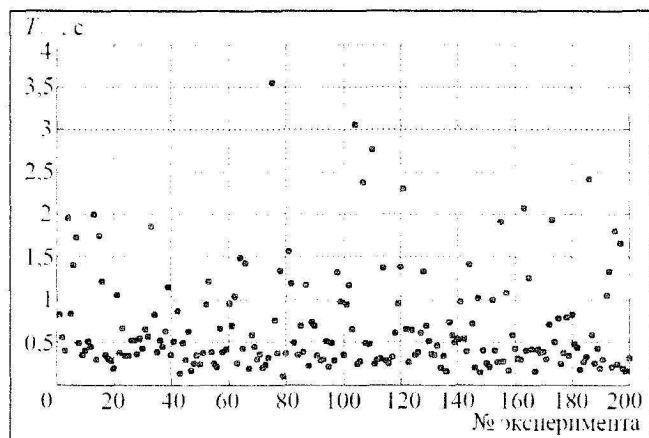


Рис. 4

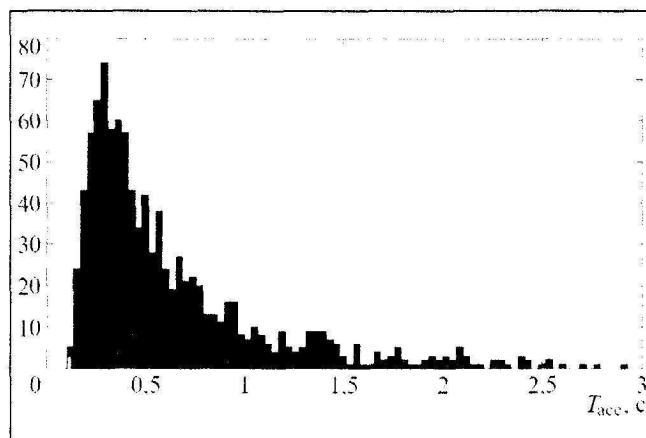


Рис. 5

где $T = 0,1$ мс – интервал дискретизации; ω_m – высокоточная оценка нестабильности частоты на момент времени t_m от системы ФАП с полосой 100 Гц.

Величина N определяется по критерию: $\hat{q}_{N-1} < \hat{q}_N > \hat{q}_{N+1}$. Отсюда выборочное значение времени накопления $T_{acc}\langle N \rangle = NT$. Далее осуществляется переход к следующему участку выборки: $m = m + N$, и процесс повторяется, находится следующее выборочное значение $T_{acc}\langle N \rangle$. Типичная выборка значений максимального времени накопления для смежных участков выборки фазы $\delta\varphi(t_k)$ генератора ГК-206ТК показана на рис. 4, гистограмма распределения $T_{acc}\langle N \rangle$ – на рис. 5.

Из анализа распределения значений $T_{acc}\langle N \rangle$ следует, что существует минимальное выборочное значение максимального времени накопления – $T_{acc,min}$. При этом гарантируется, что отношение с-ш на выходе коррелятора будет только расти при накоплении на интервале $T_{acc,min}$. Поэтому рекомендованным предельным значением времени накопления в корреляторе будем считать минимальное выборочное значение $T_{acc,min} = \min(T_{acc}\langle N \rangle)$.

Методика нахождения минимальной полосы ФАП, при которой сохраняется слежения за дрейфом фазы ОГ, основана на подборе. Фазовая автоподстройка с адаптивной полосой и дискриминатором вида $\sin(\Delta\varphi)$ работает по входному воздействию $\delta\varphi(t_k)$. Полоса ФАП постепенно сужается, при этом регистрируются факты срыва по выходу ошибки слежения за пределы $\pm\pi$ рад. При наличии срыва полоса ФАП расширяется на 10%, а её вектор состояния переинициализируется точными значениями фазы, частоты и фазового ускорения. Далее процесс повторяется. Искомой величиной является выборочное максимальное значение адаптивной полосы, полученной таким способом. Начальный переходный процесс не рассматривается. Процесс адаптации при нахождении минимальной полосы ФАП, при которой сохраняется слежения за дрейфом фазы ОГ, показан на рис. 6, где пунктирной линией отмечено искомое значение полосы ФАП, которое составило в данном случае 5,2 Гц.

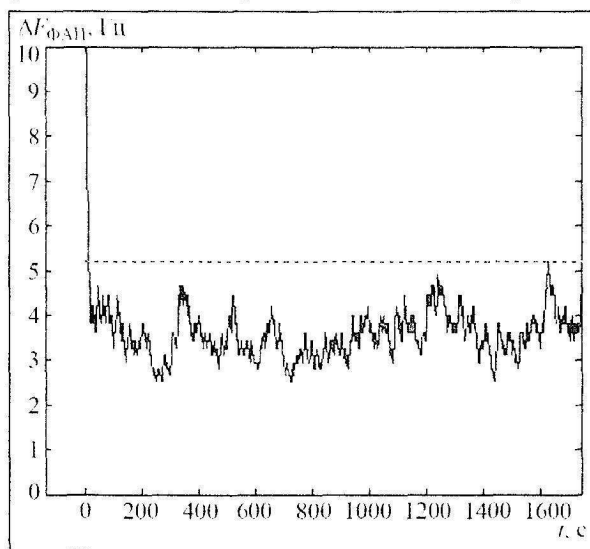


Рис. 6

Результаты эксперимента

Для анализа были выбраны следующие термокомпенсированные кварцевые ОГ (ТСХО), применяемые в навигационной аппаратуре потребителей (НАП) спутниковых радионавигационных систем (СРНС):

- ГК-206ТК (Морион, Россия);
- ГК-99ТК (Морион, Россия);
- ГТХО-83 (Gollodge, UK).

Также был проведен анализ лабораторного термостабирированного кварцевого ОГ (ОСХО), являющегося опцией к прибору R&S SMBV100A.

Измерения проводились в нормальных условиях при комнатной температуре. В ряде случаев учитывалось размещение ОГ:

без корпуса, «на открытом воздухе» – при микроколебаниях температуры, вызванных вентиляцией комнатным воздухом;

в корпусе, заполненном поролоном, где микроколебания температуры существенно снижены.

В результате эксперимента были записаны выборки процессов дрейфа фазы ОГ, а по ним определены следующие характеристики:

девиация Аллана $\sigma_y(\tau)$ при времени осреднения τ 0,1; 1 и 10 с;

рекомендованное предельное время накопления в корреляторе, в соответствии с методикой;

минимально допустимая полоса ФАП 3-го порядка в соответствии с методикой.

Результаты эксперимента приведены в таблице.

Тип ОГ и условия	Длина выборки, с	Объем статистики T_{acc} (количество участков выборки)	Предельное время накопления T_{acc} , с	Оценка девиации Аллана $\sigma_y(\tau)$ при τ , равном			Минимально допустимая полоса ФАП3, Гц
				0,1 с	1 с	10 с	
ГК-206ТК, без корпуса	5400	9665	0,115	$2,4 \cdot 10^{-10}$	$8 \cdot 10^{-10}$	$6,7 \cdot 10^{-10}$	6,0
ГК-206ТК, в корпусе	7200	7098	0,17	$1,7 \cdot 10^{-10}$	$1,5 \cdot 10^{-10}$	$1,7 \cdot 10^{-10}$	1,5
ГТХО-83 без корпуса	3600	7087	0,1	$3,2 \cdot 10^{-10}$	$6,7 \cdot 10^{-10}$	$6 \cdot 10^{-10}$	5,2
ГТХО-83 в корпусе	3600	5286	0,12	$2,7 \cdot 10^{-10}$	$2,5 \cdot 10^{-10}$	$3,5 \cdot 10^{-10}$	2,5
ГК-99ТК, без корпуса	3000	1928	0,32	$8,4 \cdot 10^{-11}$	$1,3 \cdot 10^{-10}$	$6,7 \cdot 10^{-10}$	1,3
SMBV100A (ОСХО)	3600	722	0,66	$3,2 \cdot 10^{-11}$	$2,7 \cdot 10^{-11}$	$3,6 \cdot 10^{-11}$	0,26

Из таблицы следует, что для применяемых ТСХО предельное время накопления в корреляторе ограничено величиной 0,1...0,3 с. Изоляция ТСХО от внешних колебаний температуры, в целом, позволяет повысить время накопления, снизив кратковременную нестабильность частоты (девиацию Аллана). Однако существенного выигрыша эксперимент не продемонстрировал. С другой стороны, видно, что термоизоляция ТСХО дает возможность значительно сузить полосы ФАП в 2...4 раза. Минимально допустимая полоса ФАП для исследованных ТСХО меняется в довольно широких пределах от 1,3 до 6 Гц и сильно зависит именно от термоизоляции.

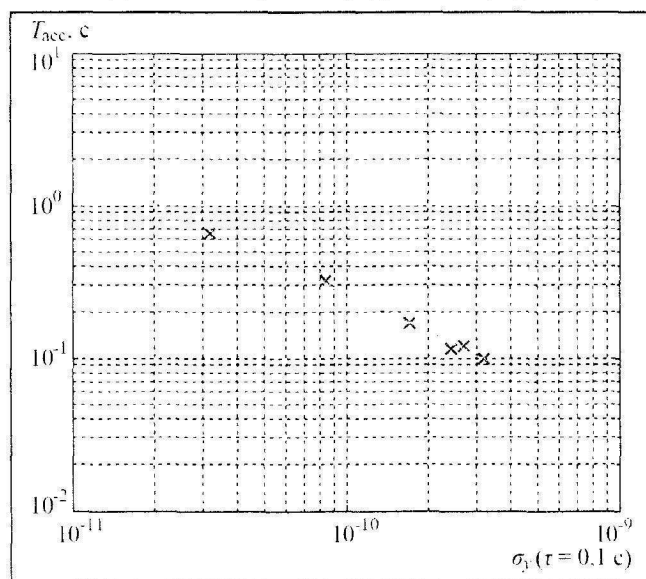


Рис. 7

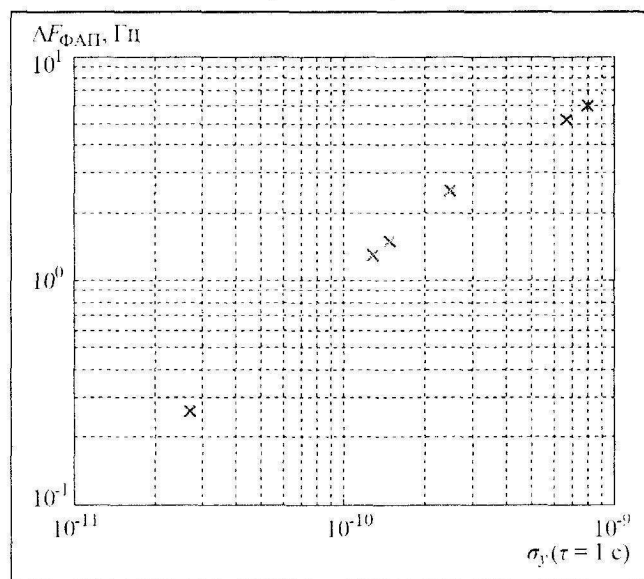


Рис. 8

Более тщательный анализ экспериментальных результатов позволил установить связь между предельным временем накопления, минимально допустимой полосой ФАП и девиацией Аллана для данного типа ОГ. На рис. 7 приведены экспериментальные точки и аппроксимирующая линия для зависимости предельного времени накопления от девиации Аллана при времени осреднения 0,1 с, а на рис. 8 – экспериментальные точки и аппроксимирующая линия для зависимости минимально допустимой полосы ФАП 3-го порядка от девиации Аллана ОГ при времени осреднения 1 с.

Зависимости на рис. 7, 8 представляют практический интерес, поскольку девиация Аллана – паспортная характеристика ОГ. Заметим одну особенность: в случае определения предельного времени накопления следует брать девиацию Аллана при $\tau = 0.1$ с, а в случае определения минимально допустимой полосы ФАП – при $\tau = 1$ с.

- Для применяемых термокомпенсированных кварцевых ОГ (ТСХО) время накопления пилотной компоненты навигационного радиосигнала ограничено величиной 0,1...0,3 с. Экспериментально выявлено, что предельное время накопления для заданного ОГ обратно его девиации Аллана, взятой при $\tau = 0,1$ с. Также показано экспериментально, что применяемые ТСХО ограничивают снизу полосу ФАП 3-го порядка величиной 1,3...6 Гц. При этом минимально допустимая полоса ФАП пропорциональна девиации Аллана, взятой при $\tau = 1$ с.

Статья подготовлена при проведении НИР в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

Литература

1. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. М.: Радиотехника, 2010.
2. Рютман Ж. Характеристики нестабильности фазы и частоты сигналов высокостабильных генераторов: итоги развития за 15 лет // ТИИЭР, 1978. Т. 66. № 9.

Поступила 5 июня 2013 г.

Limitations for pilot-component accumulation time due to reference oscillator instability. Experiment technique and results

© Authors, 2013

A. Y. Shatilov, E. N. Boldenkov, I. V. Lipa

Increasing accumulation time for the pilot component of navigation signal allows improvement of the receiver's sensitivity and anti-jam capability in fine acquisition and non-coherent tracking modes. For static user position, the reference oscillator's drift is the only limiting factor for the correlator accumulation time. The scope of this article is the experimental exploration of oscillator's drift impact on the SNR and accumulation time problem. The experiment technique and results are presented for a number of popular TCXOs: GK-99TK, GK-206TK, GTXO-83. OCXO was also considered. It is shown for TXCOs that the pilot component correlator accumulation time should be not more than 0.1...0.3 s. Experiment revealed that maximum reasonable accumulation time for a given oscillator is inverse to its Allan deviation at $\tau = 0.1$ s. Also experiment has shown that the considered TCXOs allow tightening of the 3-rd order PLL bandwidth down to 1.3...6 Hz. Generally, minimal working PLL bandwidth is proportional to Allan deviation at $\tau = 1$ s.

References

1. GLONASS. Principy' postroeniya i funkcionirovaniya / pod red. A.I. Perova, V.N. Xarisova. M.: Radiotekhnika, 2010.
2. Rytman Zh. Xarakteristiki nestabil'nosti fazy' i chastoty' signalov vy'sokostabil'ny'x generatorov: itogi razvitiya za 15 let // TИIE'P. 1978. T. 66. № 9.