

УДК 656

DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-6-75-85

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СТАТИСТИЧЕСКОГО МЕТОДА СТАБИЛИЗАЦИИ ЧАСТОТЫ ГЕНЕРАТОРОВ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Д.Д. ГАБРИЭЛЬЯН¹, П.И. КОСТЕНКО², О.А. САФАРЬЯН³

¹*Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи,
г. Ростов-на-Дону, Россия*

²*Ростовский филиал МГТУ ГА, г. Ростов-на-Дону, Россия*

³*Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия*

Работа выполнена при материальной поддержке РФФИ, грант № 19-01-00151

В статье рассмотрены вопросы стабилизации частоты генераторов в распределенных информационно-измерительных системах на основе использования метода статической стабилизации частоты. Приведены примеры таких систем и отмечена необходимость обеспечения высокой стабильности частоты формируемых абонентами сигналов для повышения эффективности функционирования указанных систем. Отмечены две основные особенности применения метода статистической стабилизации частоты. Первая определяется задержкой поступления сигнала в устройство оценивания частотно-временных параметров сигнала по отношению к интервалу измерения фазы сигнала. Вторая особенность связана с задержкой прихода сформированного управляющего сигнала коррекции частоты генератора. Показано, что отмеченные особенности приводят к несовпадению текущего отклонения частоты генератора и корректируемого значения, полученного с учетом задержки. Предложено описание информационных сигналов, позволяющих уточнить математическую модель процесса формирования оценки отклонения частоты информационного сигнала с учетом указанных факторов. Показано, что возможность использования статистического метода стабилизации частоты генераторов в распределенных информационно-измерительных системах определяется не только значениями номинальных частот и относительных нестабильностей генераторов, входящих в состав информационно-измерительной системы, но и автокорреляционной функцией случайного процесса, описывающего изменение частоты информационного сигнала. При малых временных задержках между оцениванием частоты информационного сигнала и стабилизацией частоты использование рассматриваемого метода позволяет уменьшить относительную нестабильность частоты информационного сигнала. При временных задержках больше интервала корреляции использование статистического метода не приводит к изменению относительной нестабильности частоты информационного сигнала. В пределах интервала корреляции использование статистического метода стабилизации частоты может приводить в зависимости от значений автокорреляционной функции как к уменьшению, так и увеличению относительной нестабильности частоты информационного сигнала.

Ключевые слова: распределенная информационно-измерительная система, информационный сигнал, стабильность частоты, интервал запаздывания, случайный процесс, корреляционная функция случайного процесса.

ВВЕДЕНИЕ

Современный этап развития фундаментальных и прикладных разделов науки, внедрения новых прорывных технологий во все сферы деятельности общества неразрывно связан с дальнейшим ростом требований к показателям функционирования распределенных инфокоммуникационных систем. В подтверждение широкого развития и использования таких систем можно выделить спутниковые системы связи, глобальные навигационные спутниковые системы, геодезические системы, пункты измерения в составе которых распределены по всей территории Земного шара, инфокоммуникационные системы, абоненты которых могут быть рассредоточены на обширной территории, радиотехнические системы наблюдения за дальним космосом и т. д. Устойчивое и эффективное функционирование таких систем и решение посредством их применения целевых задач связано с возможностью быстрой передачи, а во многих случаях в реальном масштабе времени, больших объемов цифровых потоков между абонентами.

Технической основой устойчивого обмена большим объемом данных является стабильность частотно-временных параметров формируемых информационных сигналов. Вопросы необходимости повышения стабильности указанных параметров и взаимосвязи стабильности частоты с вероятностно-временными характеристиками передачи информации рассмотрены в большом количестве работ, например [1–5]. К одному из современных методов стабилизации частотно-временных параметров информационных сигналов можно отнести метод статистической стабилизации частоты, основанный на одновременном измерении отклонений фаз данных сигналов от номинальных значений на некотором измерительном интервале и формировании оценок текущей частоты сигналов для последующего уменьшения указанных отклонений [6, 7]. В указанных работах также рассмотрены вопросы технической реализации устройства оценивания частотно-временных параметров сигналов и моделирования его функционирования.

Распределенные информационно-измерительные системы включают большое число устройств, формирующих сигналы, что потенциально определяет достижение высокой точности получаемых оценок текущего значения частоты всех генераторов и соответственно возможности их стабилизации [6, 7]. В то же время распределение таких устройств на большой территории приводит к появлению эффектов, связанных с запаздыванием получения оценки отклонения частоты по отношению к временному интервалу, на котором возникло данное отклонение частоты и последующего формирования сигнала управления частотно-временными параметрами сигнала [8, 9]. Такое запаздывание может в ряде случаев не только уменьшить компенсацию возникшего отклонения частоты, но и, наоборот, привести к ее увеличению. Однако указанные эффекты, которые могут проявляться именно в распределенных системах, в известных работах, посвященных методу статистической стабилизации частоты, не рассматривались.

С учетом отмеченных выше особенностей цель статьи заключается в анализе применения метода статистической стабилизации частоты в распределенных информационно-измерительных системах.

Представим структурную схему распределенной информационно-измерительной системы, как и в работе [6] (рис. 1). В соответствии с методом статистической стабилизации частоты информационные сигналы N абонентов, циркулирующие в распределенной информационно-измерительной системе, подаются на дополнительно введенное устройство оценивания частотно-временных параметров сигналов. Элементы τ_1, τ_2, τ_N описывают задержку, учитывающую как время прохождения сигнала от абонента до устройства оценивания частотно-временных параметров в распределенной информационно-измерительной системе, так и время последующего прохождения управляющего сигнала для корректировки частоты информационного сигнала от данного устройства до абонента.

Информационно-измерительный сигнал, формируемый n -м абонентом в распределенной информационно-измерительной системе (сигнал вида КАМ, ФМ), может быть представлен с использованием следующего соотношения:

$$u_n(t) = U_n^{(0)}(t) \cos(2\pi \cdot \Psi_n(t)), \quad (n = 1, \dots, N), \quad (1)$$

в котором $\Psi_n(t) = \int_0^T f_n(\tau) \cdot d\tau + \psi_{0,n}(t)$ – модулированная фаза радиосигнала, $U_n^{(0)}(t)$ – модулированная амплитуда радиосигнала; $f_n(\bullet)$ – несущая частота радиосигнала; $\psi_{0,n}(t)$ – модулированная фаза радиосигнала; T – длительность сигнала.



Рис. 1. Структурная схема распределенной информационно-измерительной системы
Fig. 1. The block-diagram of the distributed information-measuring system

Отклонение несущей частоты $f_n(t)$ сигнала устройства формирования и обработки от соответствующего номинального значения $f_{0,n}$ приводит к изменению амплитуды главного пика автокорреляционной функции (АКФ) $R_n(\Delta\tau, \Delta f_n)$, которая при полной синхронизации сигналов ($\Delta\tau = 0$) определяется выражением [2]

$$R_n(0, \Delta f_n) = \frac{\sin(\pi \cdot \Delta f_n \cdot T)}{\pi \cdot \Delta f_n \cdot T}, \quad (n = 1, \dots, N), \quad (2)$$

где $\Delta f_n = f_n - f_{0,n}$.

На рис. 2 на примере генератора, управляемого напряжением, ГК-77 УН приведена возможная временная зависимость номинальной $f_{0,n}$ и текущей $f_n(t)$ частоты сигнала устройства формирования и обработки n -го абонента.

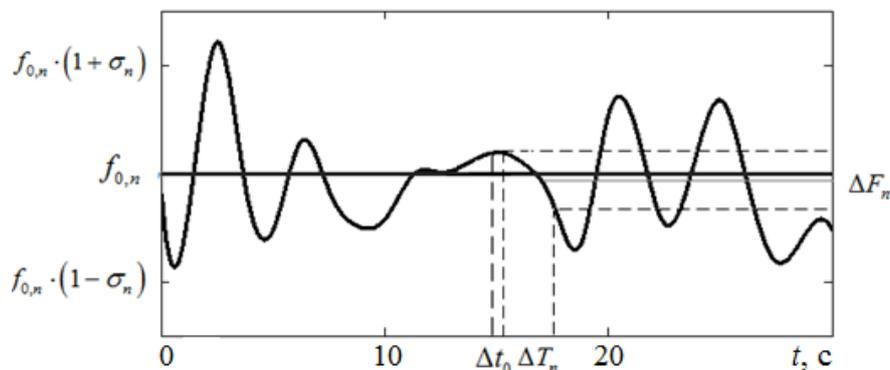


Рис. 2. Соотношения между текущими значениями частоты сигнала в различные моменты времени: номинальная частота $f_{0,n} = 5 \cdot 10^7$ Гц, относительная нестабильность $\sigma_n = 2 \cdot 10^{-7}$

Fig. 2. Relations between the current values of the signal frequency at different time moments: nominal value of frequency $f_{0,n} = 5 \cdot 10^7$ Hz, relative instability of frequency $\sigma_n = 2 \cdot 10^{-7}$

На рис. 2 также показаны временные интервалы: интервал измерений фазы сигналов номинальной длительностью Δt_0 , характерный интервал длительностью T_n , в течение которого частота сигнала n -го абонента на интервале измерений Δt_0 изменится на величину большую, чем ΔF_n , определяемую требованиями к стабильности частоты информационного сигнала данного абонента.

Проанализируем возможность использования статистического метода стабилизации частоты. Для измерительного интервала $\Delta t_m = [T_m - \Delta t_m/2, T_m + \Delta t_m/2]$, длительность которого задается в устройстве оценивания частотно-временных параметров сигналов и отличается от номинального значения Δt_0 , на основе результатов [6, 7] запишем оценки текущих значений частоты сигнала n -го абонента с помощью следующего соотношения:

$$\Delta \hat{f}_{n,m} = \Delta t_0^{-1} \left(\Delta \varphi_{n,m} - 2\pi f_{0,n} \left(\sum_{p=1}^N \sigma_p^{-2} \right)^{-1} \sum_{p=1}^N (\Delta \varphi_{p,m} - 2\pi f_{0,p} \Delta t_0) \sigma_p^{-2} f_{0,p}^{-1} \right), \quad (n = 1, \dots, N), \quad (3)$$

где $\Delta \hat{f}_{n,m}$ – оценка отклонения частоты n -го информационного сигнала на m -м измерительном интервале, длительность которого Δt_m отличается от номинальной Δt_0 ; σ_n – относительная нестабильность устройства формирования и обработки n -го абонента; $\Delta \varphi_{n,m}$ – измеренное значение фазы n -го информационного сигнала на m -м измерительном интервале, показанное на рис. 3.

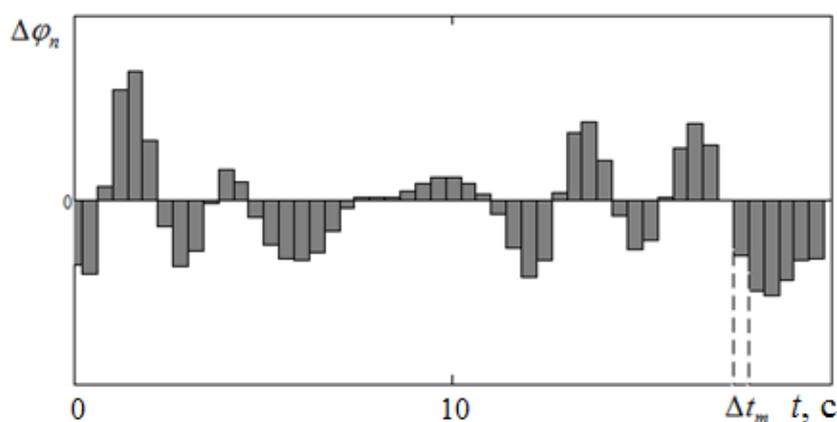


Рис. 3. Распределение измеряемых значений фаз информационного сигнала
Fig. 3. The distribution of the measured phase values of the information signal

Полученные значения оценок используются для формирования управляющего сигнала, пропорционального $\Delta \hat{f}_{n,m}$, для компенсации уходов частоты n -го информационного сигнала. Однако полученная для интервала Δt_m оценка отклонения частоты $\Delta \hat{f}_{n,m}$ не будет соответствовать текущему значению частоты $f_n(T_m + \tau_n)$ через время τ_n , и, соответственно, сформированный на основании $\Delta \hat{f}_{n,m}$ управляющий сигнал не обеспечит стабилизацию частоты через время τ_n .

Отклонение частоты от номинального значения в момент времени $T_m + \tau_n$ после компенсации может быть представлено следующим соотношением:

$$\delta f_n(T_m + \tau_n) = \Delta f_n(T_m + \tau_n) - \Delta \hat{f}_n(T_m), \quad (n = 1, \dots, N). \quad (4)$$

Величина $\delta f_n(T_m + \tau_n)$ представляет собой дополнительно возникающее отклонение частоты в устройстве формирования и обработки сигнала n -го абонента в распределенной информационно-измерительной системе, обусловленное запаздыванием формирования управляющего сигнала для стабилизации частоты.

Проанализируем статистическое распределение отклонения частоты $\delta f_n(T_m + \tau_n)$. Математическое ожидание $M\{\delta f_n(T_m + \tau_n)\}$ равно нулю, что может быть доказано следующим образом [10]:

$$M\{\delta f_n(T_m + \tau_n)\} = M\{\Delta f_n(T_m + \tau_n)\} - M\{\Delta \hat{f}_n(T_m)\}, \quad (n = 1, \dots, N), \quad (5)$$

где учтены представленные в [6, 7] результаты $M\{\Delta f_n(T_m + \tau_n)\} = 0$ и $M\{\Delta \hat{f}_n(T_m)\} = 0$. Дисперсия $D\{\delta f_n(T_m + \tau_n)\}$ может быть представлена соотношением [10]

$$D\{\delta f_n(T_m + \tau_n)\} = D\{\Delta f_n(T_m + \tau_n)\} + D\{\Delta \hat{f}_n(T_m)\} - 2\rho\{\Delta f_n(T_m + \tau_n) \cdot \Delta \hat{f}_n(T_m)\}, \quad (n = 1, \dots, N), \quad (6)$$

в котором $\rho\{\bullet\}$ обозначает автокорреляционную функцию случайного процесса – временную зависимость отклонения частоты от номинального значения.

Величина $D\{\delta f_n(T_m + \tau_n)\}$ определяет дисперсию дополнительно возникающего отклонения частоты в устройстве формирования и обработки сигнала n -го абонента в распределенной информационно-измерительной системе, обусловленного запаздыванием формирования управляющего сигнала для стабилизации частоты. При $\tau_n = 0$ с учетом свойств автокорреляционной функции и результатов работ [6, 7] получаем

$$\rho\{\Delta f_n(T_m + \tau_n) \cdot \Delta \hat{f}_n(T_m)\} = \rho\{\Delta f_n(T_m) \cdot \Delta \hat{f}_n(T_m)\} = \sigma_n^2 \cdot (N-1)/N, \quad (n = 1, \dots, N). \quad (7)$$

В этом случае $D\{\delta f_n(T_m + \tau_n)\} = \sigma_n^2 \cdot (N-1)/N$, что полностью согласуется с результатами, приведенными в [6, 7].

На рис. 4 на интервале корреляции T_n значений случайного процесса приведены зависимости $D_1(\tau_n) = D\{\delta f_n(T_m + \tau_n)\}$ от τ_n/T_n при различных значениях относительной нестабильности частоты n -го информационного сигнала. Используемые значения относительной нестабильности связаны с возможными изменениями температуры окружающей среды и напряжения питания на примере генератора ГК-77 УН. Длительность интервала измерений Δt_0 выбрана равной $0,01 \cdot \Delta T_n$. Как следует из приведенных зависимостей, существующая корреляция между отклонениями частоты в устройстве формирования и обработки сигнала от номинального значения в различные моменты времени обуславливает немонотонный характер изменения величины дополнительно возникающего отклонения частоты n -го абонента в распределенной информационно-измерительной системе ($n = 1, \dots, N$).

Приведенные зависимости D_1/σ_n от τ_n/T_n позволяют исследовать изменение амплитуды главного пика АКФ от τ_n/T_n , непосредственно определяющего отношение сигнал/шум на входе демодулятора и, соответственно, изменение вероятности ошибки приема бита информации в принимаемом сообщении. Для получения указанной зависимости представим с учетом разло-

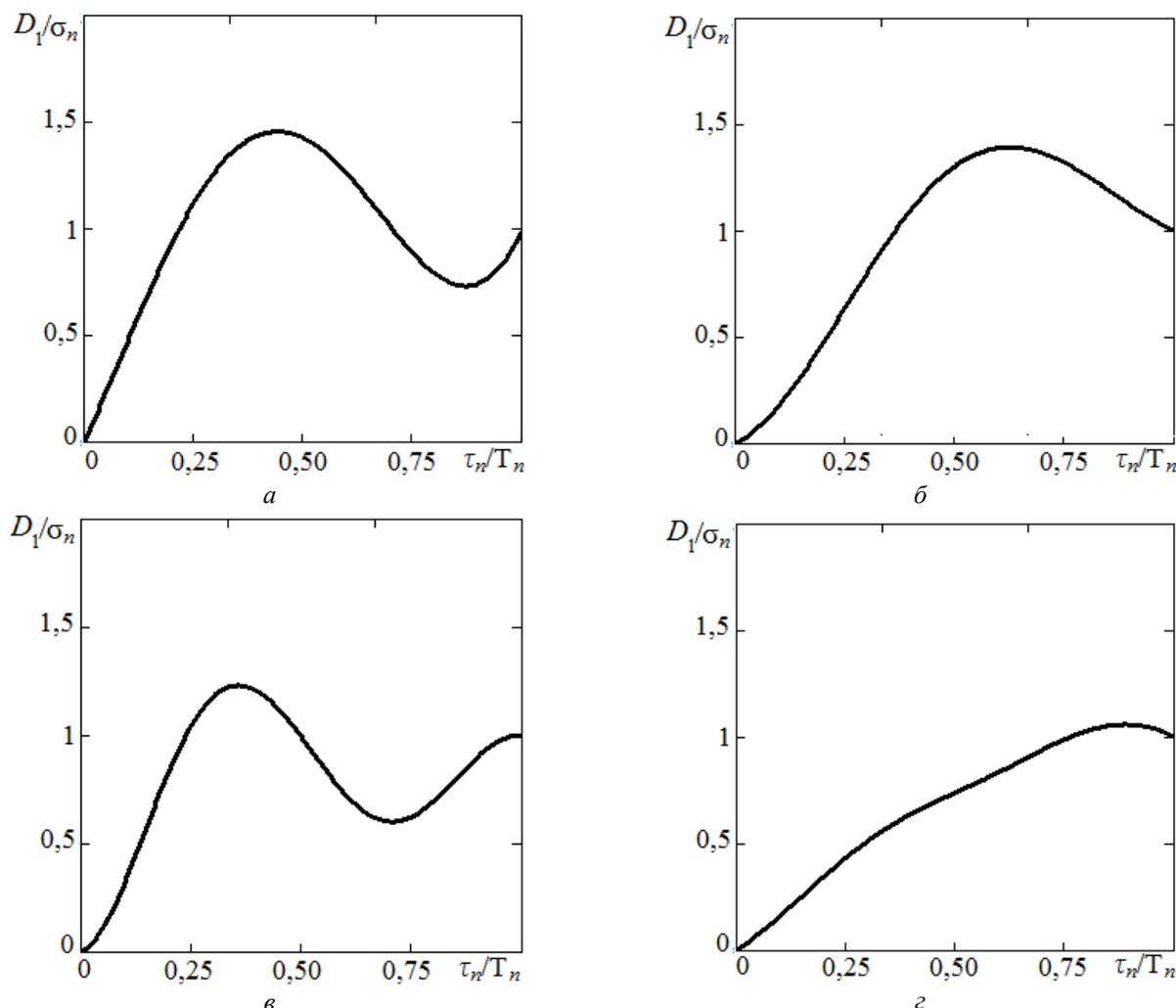


Рис. 4. Зависимость изменения относительной нестабильности частоты информационного сигнала от задержки τ_n : а – $\sigma_n = 4 \cdot 10^{-7}$; б – $\sigma_n = 3 \cdot 10^{-7}$; в – $\sigma_n = 2 \cdot 10^{-7}$; г – $\sigma_n = 1 \cdot 10^{-7}$

Fig. 4. The dependence of the change of the relative instability of information signal frequency on the delay τ_n : а – $\sigma_n = 4 \cdot 10^{-7}$; б – $\sigma_n = 3 \cdot 10^{-7}$; в – $\sigma_n = 2 \cdot 10^{-7}$; г – $\sigma_n = 1 \cdot 10^{-7}$

жения функции $\sin x = x - x^3/6$ [10], являющегося достаточным при относительных нестабильностях современных генераторов, АКФ в области главного пика выражением

$$R_n(0, \Delta f_n) = 1 - (\pi \cdot \Delta f_n \cdot T)^2 / 6, \quad (n = 1, \dots, N). \quad (8)$$

С учетом выражений (2) и (8) значение главного пика АКФ равно

$$\bar{R}_n = 1 - (\pi \cdot D_1(\tau_n) \cdot T)^2 / 6, \quad (n = 1, \dots, N). \quad (9)$$

Зависимости, иллюстрирующие изменение \bar{R}_n от τ_n , приведены на рис. 5.

Допустимое снижение уровня главного пика АКФ определяется допустимым увеличением вероятности битовой ошибки. В частности, для систем связи и передачи данных, использующих сложные сигналы, как показывают результаты исследований, приведенные в ряде работ, например

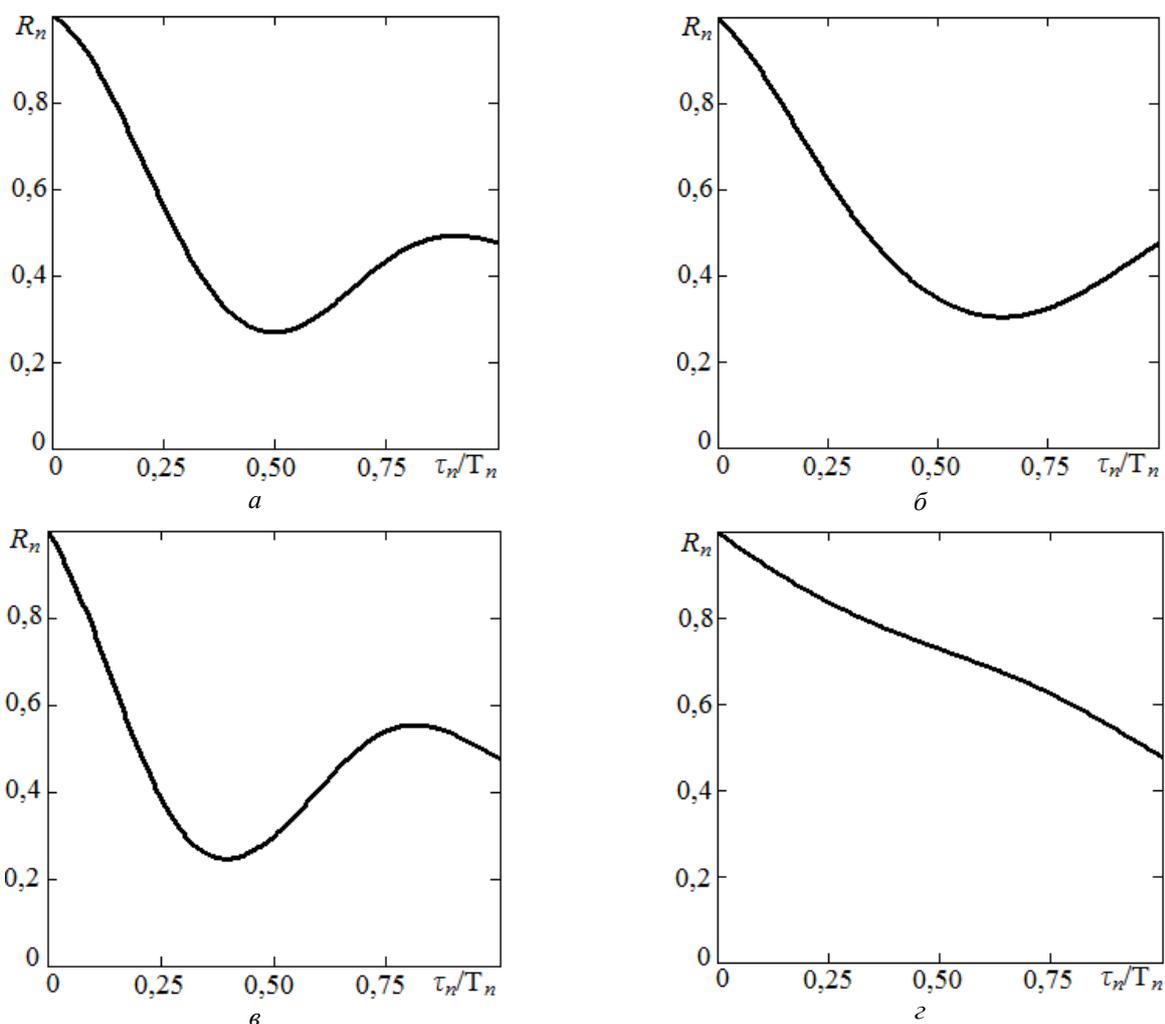


Рис. 5. Зависимость изменения амплитуды главного пика АКФ от задержки τ_n :

$$a - \sigma_n = 4 \cdot 10^{-7}; \quad б - \sigma_n = 3 \cdot 10^{-7}; \quad в - \sigma_n = 2 \cdot 10^{-7}; \quad г - \sigma_n = 1 \cdot 10^{-7}$$

Fig. 5. The dependence of the change of the main peak of the autocorrelation function amplitude on the delay τ_n :

$$a - \sigma_n = 4 \cdot 10^{-7}; \quad б - \sigma_n = 3 \cdot 10^{-7}; \quad в - \sigma_n = 2 \cdot 10^{-7}; \quad г - \sigma_n = 1 \cdot 10^{-7}$$

в [11], уровень нормированной АКФ не должен снижаться ниже 0,7. Это позволяет определить допустимые относительные задержки времени формирования сигнала управления, а при известном характерном времени изменения частоты сигнала получить абсолютное значение.

Для рассматриваемого в работе типа генератора ГК-77 УН допустимое время задержки τ_n , при котором значение пика АКФ не уменьшится ниже заданного значения, составляет в зависимости от внешних условий порядка $(0,12 \dots 0,5) \cdot T_n$.

Анализ приведенных результатов показывает, что использование статистического метода стабилизации частоты в распределенных информационно-измерительных системах позволяет при $\tau_n \approx 0$ ($n = 1, \dots, N$) формировать сигналы управления, обеспечивающие практически полное исключение отклонения частоты, что соответственно позволяет использовать данный метод в распределенных информационно-измерительных системах. При этом для использования в составе распределенных информационно-измерительных систем предпочтительными являются устройства формирования и обработки сигналов с большим характерным временем изменения частоты сигнала T_n .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показывают следующее.

1. Полученные результаты обобщают выполненные ранее исследования достигаемой стабильности частоты и основных закономерностей, связывающих параметры (частота и относительная нестабильность) устройств формирования и обработки сигналов с учетом возможных задержек формирования сигналов для стабилизации частоты, которые возникают в распределенных информационно-измерительных системах.

2. Возникающие задержки формирования сигналов приводят к повышению относительной нестабильности частоты и снижению уровня АКФ по сравнению со случаем $\tau_n = 0$. Однако снижение указанных характеристик определяется не только абсолютным значением τ_n , а отношением времени задержки τ_n к характерному времени изменения частоты сигнала T_n . Допустимое значение τ_n , при котором возможно использование метода статистической стабилизации частоты в распределенных информационно-измерительных системах, зависит от относительной нестабильности самого генератора и составляет при различных значениях исходной относительной нестабильности $(0,12...0,5) \cdot T_n$.

3. При малых временных задержках между оцениванием частоты информационного сигнала и стабилизацией частоты использование рассматриваемого метода позволяет уменьшить относительную нестабильность частоты информационного сигнала. При временных задержках больше интервала корреляции использование статистического метода не приводит к изменению относительной нестабильности частоты информационного сигнала. В пределах интервала характерного изменения частоты использование статистического метода стабилизации частоты имеет немонотонный характер в зависимости от значений автокорреляционной функции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихомиров Н.М., Романов С.К., Леньшин А.В. Формирование ЧМ-сигналов в синтезаторах с автоподстройкой. М.: Радио и связь, 2004. 210 с.
2. Варакин Л.Е. Системы связи с широкополосными сигналами. М.: Радио и связь, 1985. 384 с.
3. Пестряков А.В., Хасьянова Е.Р. Компенсация сдвига постоянной составляющей с применением метода временного усреднения // СВЧ-Техника и телекоммуникационные технологии: материалы докладов 25-й Международной конференции (КРЫМИКО'2015), Севастополь, Россия. Сентябрь 6–12. 2015. Т. 1. С. 351–353.
4. Fortier T.M., Nelson C.W., Hati A. Sub-femtosecond absolute timing jitter with a 10 GHz hybrid photonic-microwave oscillator // Appl. Phys. Letters. 2012. Vol. 100, Iss.23. Pp. 197–200. DOI: 10.1063/1.4726122
5. Hati A., Nelson C.W., Howe, D.A. Howe. Reduction oscillator PM noise from AM-PM noise correlation // Electronic Letters. 2014. Vol. 50, no. 17. Pp. 1195–1197. DOI: 10.1049/el.2014.2210
6. Габриэльян Д.Д. Метод оценки частот в системе генераторов / А.А. Прыгунов, А.Г. Прыгунов, О.А. Сафарьян // Физические основы приборостроения. 2012. Т. 1, № 2 (3). С. 72–77.
7. Safaryan O.A. Method of Reducing Phase Noise in the System Simultaneously and Independently Operating the High-Frequency Signal Generators / I.A. Sakharov, N.V. Boldyrikhin, I.A. Yengibaryan // Engineering Computations. Emerald Group Publishing Ltd. 2017. Vol. 34, no. 8. Pp. 2586–2594.
8. Геложе Ю.А., Клименко П.П., Максимов А.В. Исследование локальной динамики контура ФАПЧ // СВЧ-Техника и телекоммуникационные технологии: материалы докладов

26-й Международной конференции (КРЫМИКО'2016). Севастополь, Россия. Сентябрь 4–10. 2016. С. 449–455.

9. **Zucca C., Tavella P.** The clock model and its relationship with the Allan and related variances // IEEE Trans. on UFFC. February. 2005. Vol. 52, iss. 2. DOI: 10.1109/TUFFC.2005.1406554

10. **Корн Г., Корн Т.** Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Изд-во Наука, 1974. 832 с.

11. **Скляр Б.** Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Издательский дом «Вильямс», 2007. 1104 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Габриэлян Дмитрий Давидович, доктор технических наук, профессор, заместитель начальника НТК по науке ФГУП «РНИИРС», d.gabrielyan2011@yandex.ru.

Костенко Петр Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры авиационного электроприборного оборудования Ростовского филиала МГТУ ГА, pit.kostenko.73@mail.ru.

Сафарьян Ольга Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры кибербезопасности информационных систем Донского государственного технического университета, safari_2006@mail.ru.

FEATURES OF THE USE OF THE STATISTICAL METHOD OF FREQUENCY STABILIZATION OF GENERATORS IN DISTRIBUTED INFORMATION-MEASURING SYSTEMS

Dmitriy D. Gabrielyan¹, Petr I. Kostenko², Olga A. Safaryan³

¹ *Rostov-on-Don Research Institution of Radio Communication,
Rostov-on-Don, Russia*

² *Rostov Branch of the Moscow State Technical University of Civil Aviation,
Rostov-on-Don, Russia*

³ *Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia*

The research was conducted with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research, grant № 19-01-00151

ABSTRACT

The article deals with the problems of frequency stabilization of generators in distributed information-measuring systems on the basis of the static frequency stabilization method. The examples of similar systems are given. The necessity to ensure high stability of signal frequency generated by subscribers to improve the efficiency of the stated systems is noted. Two main features of applying the static frequency stabilization method are stated. The first one is determined with a delay in signal input into the device for estimating the frequency-time signal parameters in relation to the signal phase measurement interval. The second feature involves the entry delay of the formed control signal of generator frequency correction. It is shown that the mentioned features lead to divergence of the current variation of generator frequency and the value under correction, obtained considering the delay. The description of information signals enabling to specify a mathematical model of the process of assessment forming of the information signal frequency variation, taking into account the mentioned factors, is offered. It is shown that the possibility of using a statistical method to stabilize the frequency of generators in distributed information-measuring systems is determined not only with the values of nominal frequencies and relative instabilities of generators included into the information-measuring system, but also by the autocorrelation function of a random process describing the change of information signal frequency. In case of small time delays between the evaluation of information process signal frequency and frequency stabilization, the use of the method to be considered allows to reduce the relative instability of information signal frequency. When time delays are greater than the correlation interval, the use of the statistical method does not lead to

the change of relative instability of information signal frequency. Within the correlation interval, the use of the statistical method of frequency stabilization can cause depending on the autocorrelation function values both decrease and increase of the relative information signal frequency instability.

Key words: distributed information-measuring system, information signal, frequency stability, delay interval, random process, correlation function of a random process.

REFERENCES

1. **Tikhomirov, N.M., Romanov, S.K. and Lenshin, A.V.** (2004). *Formirovanie FM-signalov v sintezatorakh s avtopodstroykoy* [FM signals forming in synthesizers with auto-tuning]. Moscow: Radio and Communication, 210 p. (in Russian)
2. **Varakin, L.E.** (1985). *Sistemy svyazi s shirokopolosnymi signalami*. [Communication systems with broadband signals]. Moscow: Radio and Communication, 384 p. (in Russian)
3. **Pestryakov, A.V. and Khasyanova, E.R.** (2015). *Compensation of the constant component shift using the time averaging method*. Microwave Engineering and Telecommunication Technology: Proceedings of the 25th International Conference (CriMiCo'2015), Sevastopol, the Russian Federation, September 6–12, pp. 349–351 (in Russian)
4. **Fortier, T.M., Nelson, C.W. and Hati, A.** (2012). *Sub-femtosecond absolute timing jitter with a 10 GHz hybrid photonic-microwave oscillator* // Appl. Phys. Letters. 2012, vol. 100, issue. 23, pp. 197–200. DOI: 10.1063/1.4726122
5. **Hati, A., Nelson, C.W. and Howe, D.A.** (2014). *Reduction oscillator PM noise from AM-PM noise correlation* // Electronic Letters, vol. 50, no. 17, pp. 1195-1197. DOI: 10.1049/el.2014.2210
6. **Gabrielyan, D.D., Prygunov, A.A., Prygunov, A.G. and Safaryan, O.A.** (2012). *Method of Estimating Frequency in Generator System*. Physical Bases of Instrumentation, vol. 1, no. 2 (3), pp. 72–77. (in Russian)
7. **Safaryan, O.A., Sakharov, I.A., Boldyrikhin, N.V. and Yengibaryan, I.A.** (2017). *Method of Reducing Phase Noise in the System Simultaneously and Independently Operating the High-Frequency Signal Generators*. Engineering Computations. Emerald Group Publishing Ltd. 2017, vol. 34, no. 8, pp. 2586–2594.
8. **Gelozhe, Ju.A., Klimenko, P.P. and Maksimov, A.V.** (2016). *Research of local dynamics of the Phase-locked loop*. Microwave Engineering and Telecommunication Technology: Proceedings of the 26th International Conference (CriMiCo'2016), Sevastopol, the Russian Federation, September 4–10, pp. 449–455 (in Russian)
9. **Zucca, C. and Tavella, P.** (2005). *The clock model and its relationship with the Allan and related variances* // IEEE Trans. on UFFC. February, vol. 52, issue. 2. DOI: 10.1109/TUFFC.2005.1406554
10. **Korn, G. and Korn, T.** (1977). *Spravochnik po matematike dlia nauchnykh rabotnikov i inzhenerov*. [Manual on Mathematics for Researchers and Engineers]. Moscow: Publishing House “Nauka”, 832 p.
11. **Sklyar, B.** (2007). *Tsifrovaya svyaz. Teoreticheskiye osnovy i prakticheskoye primeneniye*. [Digital communication. Theoretical basic principles and practical application]. Publishing House “Williams”, 1104 p.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dmitriy D. Gabrielyan, Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Head for Science of the Scientific and Technological Complex, FSUE Rostov-on-Don Research Institution of Radio Communication, d.gabrieljan2011@yandex.ru.

Petr I. Kostenko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Aeronautical Electronic Radio Equipment Chair, Rostov Branch of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, pit.kostenko.73@mail.ru.

Olga A. Safarian, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Cyber-Security of Information Systems Chair, the Don State Technical University, safari_2006@mail.ru.

Поступила в редакцию 04.06.2019
Принята в печать 14.11.2019

Received 04.06.2019
Accepted for publication 14.11.2019