

УДК 621.396.66

ПОГРЕШНОСТЬ ОЦЕНКИ ЧАСТОТ ГЕНЕРАТОРОВ В НЕСТАЦИОНАРНОМ СЛУЧАЕ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СТАТИСТИЧЕСКОГО МЕТОДА СТАБИЛИЗАЦИИ ЧАСТОТ

Сафарьян О. А.

Минобрнауки России, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Донской государственный технический университет», 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1. тел./факс (863) 232-79-53. e-mail: safari_2006@mail.ru

В статье проводится дальнейшее развитие метода статистической стабилизации частоты генераторов. Рассматриваются вопросы, связанные с анализом погрешностей, возникающих из-за нестационарности частот генераторов на интервале оценивания частот, при использовании данного метода. Первая составляющая ошибки связана с отклонением измеряемой фазы колебаний генератора из-за собственной неустойчивости частоты генератора, вторая – определяется изменением частоты генератора на интервале измерений. Отмечено, что уменьшение каждой из составляющих предъявляет взаимоисключающие требования к длительности временного интервала. На основе известных соотношений, определяющих потенциально достижимое значение среднеквадратического отклонения частоты от номинального значения, получены выражения, определяющие оптимальную длительность временного интервала измерений. В качестве критерия при выборе длительности временного интервала рассматривается минимум суммы двух ошибок. Приводятся основные соотношения, определяющие величину данных погрешностей, и результаты численного моделирования.

Ключевые слова: частота генератора, оценка отклонения частоты от номинального значения, статистический метод стабилизации частот, интервал измерения.

THE ERROR OF GENERATOR FREQUENCIES ESTIMATION IN NONSTATIONARY CASE IN USING OF STATISTICAL STABILIZATION METHOD

Safar'yan O. A.

Russia, Federal public budgetary educational institution of the higher professional education «Don State Technical University», 344000, Rostov-on-Don, Gagarin square 1. ph. (fax) of (863) 232-79-53. e-mails:safari_2006@mail.ru

The article is devoting to further development of the method of statistical stabilization of the generator frequency. The problems associated with the analysis of errors that arise due to non-stationary frequency generators on the interval estimation of frequencies, by using this method. The first component of the error associated with the deviation of the measured phase of the oscillator frequency instability due to its own generator, and the second is determined by the change in frequency of the generator to the range of measurements. It is noted that the reduction of each of the components presents conflicting requirements for the length of the time interval. Based on the known relationships that define the potentially achievable value of the standard deviation of frequency from the nominal value, the expressions that determine the optimal length of the time interval of measuring. The minimum amount of two errors is considered as a criterion in choosing the duration of the time interval. The basic relations that determine the amount of data errors are presented, and the results of numerical simulations are described.

Key words: frequency of the generator, frequency error estimate of the nominal value, the statistical method of stabilizing, interval of measurements.

Введение

Необходимость постоянного повышения эффективности радиоэлектронных систем (РЭС) обуславливает требования по обеспечению более высокой стабильности частоты генераторно-

го оборудования [1–7]. Кроме того, постоянный рост требований к стабильности частоты генераторного оборудования связан с непрерывным увеличением количества работающих в пределах одного диапазона РЭС.

Наиболее широкое распространение в современных РЭС находит использование высокостабильных генераторов или методов стабилизации частоты на основе измерения с последующей компенсацией уходов частоты и фазы стабилизируемых колебаний (ЧАПЧ и ФАПЧ) [2, 8, 15]. В то же время в [6] рассматривается принципиально отличающийся статистический метод стабилизации частот генераторов. Однако полученные для этого метода оценки, определяющие повышение стабильности частот генераторного оборудования, относятся к наиболее простому случаю, когда отклонение частоты генератора на интервале измерений является постоянным. Однако в реальных РЭС отклонение частот генераторов даже на малых интервалах времени может изменяться, что связано с рядом факторов и проявляется в виде фазовых шумов. В связи с этим стабилизацию частоты генераторов необходимо рассматривать как нестационарный процесс даже в пределах измерительного интервала.

Цель статьи

Определение оптимальной длительности временного интервала измерений с учетом нестационарности процесса отклонения частот генераторов, обеспечивающей минимум среднеквадратического отклонения частоты генератора от заданной на интервале измерений.

Постановка задачи

Пусть имеется, как предложено в [3], система K независимо функционирующих генераторов. С учетом нестационарности процесса опишем частоты генераторов на интервале измерений следующими зависимостями:

$$f_k = f_k^{(0)} + f_k^{(1)}(\tau - t/2) + f_k^{(2)}(\tau - t/2)^2/2! + \dots + f_k^{(L)}(\tau - t/2)^L/L!,$$
$$(0 \leq \tau \leq t, k = 1, \dots, K). \quad (1)$$

В соотношении (1) $f_k^{(0)}$ – частота k -го генератора в середине интервала измерений, t – длительность интервала измерений. Коэффициенты представленного ряда (1) принимают случайные значения, имеющие нормальный характер распределения. При этом можно считать, что $M\{f_k^{(0)}\} = f_{0k}$, $M\{f_k^{(l)}\} = 0$, а дисперсии данных коэффициентов $D_k^{(l)}$, ($k = 1, \dots, K$; $l = 1, \dots, L$) являются известными.

Оценка отклонения частот

Введем понятие среднего отклонения частоты k -го генератора на интервале измерений, определяемого как:

$$\Delta F_k = t_0^{-1} \int_0^t (f_k^{(1)}(\tau - t/2) + f_k^{(2)}(\tau - t/2)^2/2! + \dots + f_k^{(L)}(\tau - t/2)^L/L!) d\tau, \quad (2)$$

где t_0 – номинальная длительность интервала измерений.

Повторяя выкладки, выполненные в [3, 4], получим значение среднего отклонения частоты k -го генератора от номинального значения в виде:

$$\Delta F_k = (N_k - N_{0k} - f_{0k} \Delta t) t_0^{-1}. \quad (3)$$

Несложно заметить, что если в ряде (1) ограничиться только первым членом $f_k^{(0)}$, то при условии постоянного значения частоты $f_k^{(0)} = f_k$ соотношение (3) полностью совпадает с выражением (2) из работ [3, 4]. Оценка нестабильности временного интервала $\Delta \hat{t}$, полученная там же, определяется следующим образом:

$$\Delta \hat{t} = \left\{ \sum_{k=1}^K (N_k - N_{0k}) / \sigma_k^2 f_{0k} \right\} \left\{ \sum_{k=1}^K (1 / \sigma_k^2) \right\}^{-1}. \quad (4)$$

Таким образом, оценка отклонения частоты k -го генератора от среднего значения частоты на интервале измерений может быть записана с использованием соотношения:

$$\Delta \hat{F}_k = (N_k - N_{0k} - f_{0k} \Delta \hat{t}) t_0^{-1}. \quad (5)$$

Данное выражение показывает, что предположение о постоянной величине отклонения частоты на интервале измерений приводит к методической ошибке, равной разности действительного отклонения частоты от номинального значения в конце временного интервала измерений и полученной оценке среднего отклонения частоты. Величина данной ошибки равна:

$$\delta f_k^{(1)} = \sum_{l=1}^L f_k^{(l)} t_0^l l / (l + 1)! \quad (6)$$

Минимизация составляющей $\delta f_k^{(1)}$, как следует из физических соображений и формулы (6), связана с уменьшением длительности временного интервала измерений. Однако в то же время из-за ошибок округления при подсчете числа импульсов N_k , формируемых k -м генератором в течение интервала измерений, возникает вторая составляющая методической ошибки. Величина данной составляющей ошибки равна:

$$\delta_k^{(2)} = \pm t_0^{-1} \quad (7)$$

Таким образом, с учетом соотношений (6) и (7) полное значение методической ошибки определения отклонения частоты генератора равно:

$$\delta_k^* = \sum_{l=1}^L f_k^{(l)} t_0^l l / (l+1)! \pm t_0^{-1} \quad (8)$$

Проанализируем статистические характеристики получаемых значений методической ошибки δ_k^* . С учетом результатов работы [2, 13] можно, опуская промежуточные выкладки, сразу записать:

$$M\{\delta_k^*\} = M\left\{\sum_{l=1}^L f_k^{(l)} t_0^l l / (l+1)! \pm t_0^{-1}\right\} = \sum_{l=1}^L M\{f_k^{(l)} t_0^l l / (l+1)!\} \quad (9)$$

При сделанных ранее предположениях о значениях математических ожиданий коэффициентов ряда (1) и их некоррелированности из выражения (4) следует, что $M\{\delta_k^*\} = 0$. Таким образом, среднее значение методической ошибки равно нулю. Дисперсия случайных значений методической ошибки определяется выражением:

$$D\{\delta_k^*\} = \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^L M\left\{\left(f_k^{(l)} t_0^l l / (l+1)! \pm t_0^{-1}\right) \left(f_k^{(p)} t_0^p p / (p+1)! \pm t_0^{-1}\right)\right\} \quad (10)$$

В случае статистической независимости коэффициентов из ряда (1) выражение (10) упрощается и принимает вид:

$$D\{\delta_k^*\} = \sum_{l=1}^L D_k^{(l)} t_0^{2l} l^2 / [(l+1)!]^2 + t_0^{-2} / 12 \quad (11)$$

Минимальное значение дисперсии методической ошибки определяется условием:

$$\frac{dD\{\delta_k^*\}}{dt_0} = 0 \quad (12)$$

Опуская несложные преобразования, получаем уравнение для определения длительности временного интервала измерений, обеспечивающего минимум методической ошибки измерений:

$$\sum_{l=1}^L 2D_k^{(l)} t_0^{2l-1} l^3 / [(l+1)!]^2 - t_0^{-3} / 6 = 0 \quad (13)$$

Единственность решения данного уравнения определяется положительностью всех коэффициентов, стоящих под знаком суммы. Решение данного уравнения может быть легко полу-

чено с использованием известных численных методов, например, методом Ньютона [7]. В качестве начального приближения с учетом монотонности функции из (13) можно выбрать значение $t_0 = 0$.

Заключение

Приведенные в статье результаты являются дальнейшим развитием метода определения отклонений частот генераторов от номинальных значений, с использованием статистической взаимосвязи параметров одновременно измеряемых отклонений фаз колебаний в совокупности генераторов. Получено уравнение для выбора длительности временного интервала измерений, при котором величина среднеквадратического отклонения частоты каждого генератора минимальна.

Список литературы

1. Алексеев О. В., Головков А. А., Митрофанов А. В. Генераторы высоких и сверхвысоких частот. – М.: Высшая шк., 2003. – 326 с.:ил.
2. Вентцель Е. С. Теория вероятностей: Учебник для вузов. – М.: Высш. шк., 1998. – 576 с.
3. Габриэльян Д. Д., Воробьев С. С., Егорочкин О. Г. Метод стабилизации частот генераторов // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2007. – Т. 12. – № 6. – С. 24–29.
4. Габриэльян Д. Д., Прыгунов А. А., Прыгунов А. Г., Сафарьян О. А. Метод оценки частот в системе генераторов // Физические Основы Приборостроения. – 2012. – Т. 1. – № 2. – С. 72–77.
5. Габриэльян Д. Д., Сафарьян О. А. Взаимосвязь параметров генераторов и дисперсии оценки измерений временного интервала. Радиоэлектронные средства передачи и приема сигналов и визуализации информации // Материалы Второй Всероссийской конференции. Москва – Таганрог: Изд-во ГТИ ЮФУ, 2012. – 124 с.
6. Катулевский Ю. А. Современные зарубежные тактические радиоустройства / Ю. А. Катулевский // Успехи современной радиоэлектроники. – 2008. – № 3. – Журнал в журнале «Зарубежная радиоэлектроника». – 2008. – № 1.
7. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). – М.: Наука, 1973. – 832 с.
8. Клеппер Дж., Френкл Дж. Системы фазовой и частотной автоподстройки частоты. (Следящие демодуляторы сигналов с угловой модуляцией). – М.: Энергия, 1977. – 440 с.
9. Спутниковые системы персональной и подвижной связи для обслуживания абонентов на территории России / под ред. А. А. Кучейко. – М.: ИПРЖР, 2011.

10. Невдяев Л. М. Персональная спутниковая связь / Л. М. Невдяев, А. А. Смирнов. – М.: Экотрендз, 2008.
11. Сафарьян О. А. Взаимосвязь стабильности генераторов и точности определения координат объекта на плоскости. XV региональная научно-техническая конференция «ВУЗОВСКАЯ НАУКА СЕВЕРО-КАВКАЗСКОМУ РЕГИОНУ». Том первый. Естественные и точные науки. Технические и прикладные науки. Ставрополь: СевКавГТУ, 2011. – 178 с.
12. Сафарьян О. А. Влияние стабильности частот генераторов на качество функционирования инфокоммуникационных систем. XIV региональная научно-техническая конференция «ВУЗОВСКАЯ НАУКА СЕВЕРО-КАВКАЗСКОМУ РЕГИОНУ». Том первый. Естественные и точные науки. Технические и прикладные науки. Ставрополь: СевКавГТУ, 2010. – 219 с.
13. Тихонов В. И. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем / В. И. Тихонов, В. Н. Харисов. – М.: Радио и связь, 2011.
14. Радиосистемы передачи информации / под ред. И. Б. Федорова и В. В. Калмыкова. – М.: Телеком, 2008.
15. Шахгильдян В. В., Ляховкин А. А. Фазовая автоподстройка частоты. – М.: Связь, 1966. – 333 с.

Рецензенты:

Костоглотов Андрей Александрович, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник ФГУП «Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи» Федеральный научно-производственный центр, г. Ростов-на-Дону.

Погорелов Вадим Алексеевич, доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник ФГУП «Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи» Федеральный научно-производственный центр, г. Ростов-на-Дону.