3. **Игнатущенко В. Н., Касютин И. С.** Методика оценки технического уровня мини-ЭВМ.— АСУ, 1976, вып 1 (17), с. 63—70.
4. **Куценко А. В., Полосьянц Б. А., Ступин Ю. В.** Мини-ЭВМ в экспериментальной физике. М.: Атомиздат, 1975.
5. **Яницкий А.** Проблемы оценки качества вычислительных систем. Вычислительная техника социалистических стран: Сб. статей. М.: Статистика, 1978, вып. 4, с. 49—60.
6. **Вальков В. М.** Микроэлектронные управляющие вычислительные комплексы. Л.: Машиностроение, 1979.

Поступило в редакцию 24 октября 1979 г.

УДК 681.322.323 : 543.422.5

А. Ю. ГУСЕВ

(Новосибирск)

К ОЦЕНКЕ СТАБИЛЬНОСТИ ЧАСТОТЫ ОКГ

Для оценки стабильности частоты оптических квантовых генераторов (ОКГ) предложено применять целый ряд параметров, основная часть которых связана со случайным характером процесса флуктуаций частоты. Большинство параметров стабильности, таких как оценка дисперсии флуктуаций частоты, параметр Аллена, дисперсия Адамара, дисперсия относительной нестабильности частоты как функция временного интервала между выборками, а также корреляционная функция и спектральная плотность, были рекомендованы подкомитетом ИИЭР по стабильности частоты, однако в настоящее время нет единого стандартизованного параметра стабильности. Подробный обзор характеристик стабильности частоты, включая рассмотрение как широко используемых, так и сравнительно новых, приведен в работах [1—3].

Большое разнообразие параметров стабильности затрудняет описание процесса флуктуаций частоты с единых позиций и допускает неоднозначность при оценке качества стабильных ОКГ различными исследователями. В работах [4, 5] предложено оценивать стабильность частоты на основании характеристик, представленных в форме плотностей распределений вероятности флуктуаций относительно среднего (номинального) значения и флуктуаций по скоростям ухода, определяемым на практике по соответствующим гистограммам; сформулирован и аппаратно реализован алгоритм измерения этих характеристик. В настоящем сообщении показано, что предложенные характеристики обладают универсальным характером и могут рассматриваться как обобщенные, так как на их базе можно получить все широко используемые показатели стабильности частоты. Это обобщение основано на том факте, что большинство показателей стабильности представляет собой моменты соответствующего порядка процесса флуктуаций частоты и может быть выражено через функции плотности распределения.

При анализе сигнала, стабильного по частоте ОКГ, в качестве модели можно принять выражение вида [6]

$$f(t) = f_{\text{н}} + f_{\text{м}}(t) + f_{\text{с}}(t), \tag{1}$$

где $f(t)$ — сигнал разностной частоты ОКГ, методом оптического гетеродинирования перенесенный из оптического в радиодиапазон; $f_{\text{н}}$ — номинальное значение частоты; $f_{\text{м}}(t)$ — компонента, характеризующая монотонное изменение частоты; $f_{\text{с}}(t)$ — компонента, обусловленная статистическими флуктуациями, центрированная на интервале времени наблюдения T_0. Как правило, закон изменения $f_{\text{м}}(t)$ может быть определен теоретически или эмпирическим путем, и, следовательно, влияние на оценку стабильности этой компоненты можно учесть в окончательном результате. Поэтому в дальнейшем при оценке статистических свойств сигнала будем рассматривать модель

$$f(t) = f_{\text{н}} + f_{\text{с}}(t). \tag{2}$$

Для получения гистограммы распределения флуктуаций относительно номинального значения необходимо выполнить N измерений сигнала $f(t)$, вычесть из каждого измерения значение $f_{\text{н}}$ и преобразовать полученную реализацию в соответствии с правилом

$$h_j\{\bar{f}_{\text{c}}(t_i, \tau)\} = \begin{cases} 1 & \text{при} \quad j\Delta f \leqslant \bar{f}_{\text{c}}(t_i, \tau) \leqslant (j+1)\,\Delta f, \\ 0 & \text{при} \quad \bar{f}_{\text{c}}(t_i, \tau) < j\Delta f, \ \bar{f}_{\text{c}}(t_i, \tau) > (j+1)\,\Delta f, \end{cases} \tag{3}$$

где τ — время единичного измерения, $\bar{f}_{\text{c}}(t_i, \tau)$ — i-й отсчет частоты, Δf — ширина дифференциального коридора гистограммы, $j = 1, \pm 2, \pm 3, \ldots$,— номер дифференциального коридора (знак минус отражает симметрию гистограммы относительно дифференциального коридора минимальной ширины). Тогда для j-й ординаты оценки плотности вероятности можно написать:

$$p_j^* (\bar{f}_c) = n_j / \Delta f N, \tag{4}$$

где $n_j = \sum_{i=1}^{N} h_j^- \{f_c(t_i, \tau)\}$ — число отсчетов, попавших в j-й дифференциальный коридор. Для того чтобы получить гистограмму распределения флуктуаций по скоростям ухода, преобразованию (3) подвергается разность двух последовательных измерений, разделенных интервалом паузы τ_n. Ординату оценки плотности вероятности в этом случае можно вычислить аналогично (4):

$$p_k^* (\Delta \bar{f}_l) = n_k / \Delta f_T M. \tag{5}$$

Здесь $n_k = \sum_{l=1}^{M} h_k \{\Delta \bar{f}_l (T, \tau)\}$, $\Delta \bar{f}_l(T, \tau) = |\bar{f}_c(t_{i+1}, \tau) - \bar{f}_c(t_i, \tau)|$ — величина ухода частоты $f(t)$ за время τ_n, Δf_T — ширина дифференциального коридора, $T = \tau_n + \tau$ — интервал повторения отдельных измерений, M — число пар отсчетов частоты, $k = 1, 2, 3\ldots$ (k представлено натуральным рядом, так как нас интересует абсолютное значение $\Delta \bar{f}_l(T, \tau)$).

Рассмотрим связь гистограмм с показателями стабильности частоты. Несмещенную оценку дисперсии частотных флуктуаций получим на основании известного выражения с учетом (4):

$$\hat{D}(N, T, \tau) = \frac{1}{N-1} \sum_{j=-L/2}^{L/2} n_j (j \Delta f)^2, \tag{6}$$

где L — число ординат гистограммы (четное).

В качестве оценки дисперсии Аллена, определяемой по конечному числу пар выборок M, принимают выражения вида [1]

$$\hat{\sigma}_A^2 (M, \tau) = \frac{1}{2M} \sum_{l=1}^{M} (\Delta F_l)^2, \tag{7}$$

где ΔF_l — разность значений частоты, измеренных в i-й и $(i+1)$-й интервалы времени длительностью τ каждый, причем $T = \tau$. Оценку дисперсии Аллена можно определить из (5) при $\tau_n = 0$. С учетом наших обозначений эта оценка запишется так:

$$\hat{\sigma}_A^2 (M, \tau) = \frac{1}{2M} \sum_{k=1}^{L} n_k (k \Delta f_T)^2. \tag{8}$$

Оценка дисперсии Адамара вычисляется по Q группам из M выборок в каждой [3]:

$$\hat{\sigma}_H^2 (M, T, \tau) = \frac{1}{Q} \sum_{g=1}^{Q} \left[\sum_{l=1}^{M} \Delta F_l \right]_g^2. \tag{9}$$

Этот параметр стабильности можно получить на основании Q гистограмм распределения флуктуаций частоты по скоростям ухода. Расчетная формула получается из (9) с учетом (5) в следующем виде:

$$\hat{\sigma}_H^2 (M, T, \tau) = \frac{1}{Q} \sum_{g=1}^{Q} \left[\sum_{k=1}^{L} n_{gk} (k \Delta f_T) \right]^2. \tag{10}$$

Гистограмму распределения флуктуаций частоты по скоростям ухода можно рассматривать как функцию либо интервала времени τ, либо интервала времени между измерениями T. Во втором случае определяют параметр $\sigma^2(T)$, имеющий совершенно иную основу по сравнению с предыдущими и позволяющий проследить поведение процесса флуктуаций частоты во времени. Особенность этой характеристики заключается в том, что по мере увеличения T все возможные значения флуктуаций вносят вклад в $\sigma^2(T)$, а не компенсируются за счет усреднения, как это происходит при росте τ. Оценку параметра $\sigma^2(T)$ определим как

$$\hat{\sigma}^2 (M, T) = \frac{1}{M} \sum_{l=1}^{M} (\Delta F_l)^2, \quad \tau = \text{const}. \tag{11}$$

С учетом (5) эта оценка вычисляется следующим образом:

$$\widehat{\sigma}^2(M,\ T) = \frac{1}{M}\sum_{k=1}^{L} n_k'(k\Delta f_T)^2, \quad \tau = \text{const}. \tag{12}$$

Получая гистограммы распределения флуктуаций частоты по скоростям ухода при различных T и вычисляя параметр $\widehat{\sigma}^2(M,\ T)$, можно найти оценку корреляционной функции $\widehat{R}_f(T)$ процесса флуктуаций частоты. Рассматриваемый параметр связан с $\widehat{R}_f(T)$ простым соотношением [3]

$$\widehat{\sigma}^2(M,\ T) = 2\,[\widehat{R}_f(0) - \widehat{R}_f(T)], \tag{13}$$

откуда сразу получаем оценку автокорреляционной функции. Выполнив преобразование Фурье над $\widehat{R}_f(T)$, определяем спектральную плотность мощности частотных флуктуаций.

Таким образом, предложенная методика оценки стабильности частоты ОКГ на основании соответствующих гистограмм плотности распределения позволяет определять параметры стабильности как во временной, так и в частотной области, а сами гистограммы можно рассматривать как обобщенные характеристики стабильности частоты. Предложенные характеристики применимы для оценки стабильности частоты не только ОКГ, но и генераторов, работающих в других диапазонах, и позволяют унифицировать алгоритм измерений и измерительную аппаратуру.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Стабильность** частоты: [Тематический выпуск].— ТИИЭР, 1966, т. 54, № 2.
2. **Burnes J. A. et al.** Characterization of Frequency Stability.— IEEE Trans. on Instrum. and Meas., 1971, vol. IM-20, N 2.
3. **Рютман Ж.** Характеристики нестабильности фазы и частоты сигналов высокостабильных генераторов.— ТИИЭР, 1978, т. 66, № 9.
4. **Гусев А. Ю. и др.** Аппаратурная реализация устройства для получения оценки частотной стабильности ОКГ.— В кн.: Прикладной анализ случайных сигналов. Новосибирск: изд. ИАиЭ СО АН СССР, 1973.
5. **Борисов Б. Д., Гусев А. Ю., Собстель Г. М.** Автоматизация исследований в лазерной спектроскопии. Препринт № 33—79. Новосибирск: изд. ИТФ СО АН СССР, 1979.
6. **Аппаратура** для частотных и временных измерений/Под ред. А. П. Горшкова. М.: Сов. радио, 1971.

Поступило в редакцию 14 апреля 1980 г.

УДК 535.3

И. Н. СВЕНТИЦКАЯ, Ю. А. ФЛЕГОНТОВ

(Ленинград)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ МЕТРИКИ В ЗАДАЧЕ ОБНАРУЖЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ НА ФОНЕ СЛУЧАЙНЫХ ПОМЕХ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Целью многих экспериментов, касающихся различных разделов физики, в частности оптики, является получение оптической информации в виде фотометрических характеристик изображения объекта. При этом, как правило, при формировании изображения и его регистрации возникают искажения и случайные помехи. Они зависят от распределения яркости в плоскости объекта, от характеристик оптического прибора и погрешностей регистрации.

Если утрата оптической информации в приборе не позволяет обеспечить требуемую точность эксперимента, возникает задача восстановления информации об объекте при исследовании его изображения.

В данной работе рассматривается эффективный путь численного решения такой задачи в случае характерных объектов, позволяющих свести ее к серии задач на обнаружение [1, 2].

Пусть нас интересует распределение $\varphi(x,\ y)$ интенсивности в плоскости объекта S, отображаемого оптическим прибором с известной аппаратной функцией $Q(x,\ x',$