СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бакалов В. П., Русских Н. П.** О возможности решения уравнения свертки при неизвестном ядре в случае многомерных пространственно-ограниченных сигналов // Автометрия.— 1985.— № 5.
2. **Бакалов В. П., Русских Н. П.** Моделирование процесса восстановления двумерных сигналов, искаженных сверткой с неизвестной функцией // Изв. вузов. Радиоэлектроника.— 1987.— № 7.
3. **Астафьев А. В., Бакалов В. П., Русских Н. П.** Применение градиентного метода при восстановлении двумерных сигналов при неизвестных искажениях // Автометрия.— 1989.— № 1.
4. **Ван Трис Г.** Теория обнаружения оценок и модуляции.— М.: Сов. радио, 1972.— Т. 1; 1977.— Т. 3.

Поступила в редакцию 8 августа 1989 г.

УДК 621.317.3

М. П. СЕЛИВАНОВА, Э. П. ТИХОНОВ

(Ленинград)

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО АЛГОРИТМА РАДИОИЗОТОПНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ

В настоящее время существует класс измерительных задач на основе априори известной, в том числе нелинейной, функциональной зависимости зондирующего сигнала (ЗС) от измеряемого параметра. К этому классу задач относится бесконтактное измерение плотности двухфазных потоков в парогенерирующих каналах посредством радиоизотопного ЗС. Решение задачи измерения связано с синтезом алгоритма измерения по известной адекватной модели, описывающей экспоненциальную зависимость ослабления ЗС от плотности [1, 2].

В связи с бурным развитием электроники в измерениях обозначился новый путь развития. Гибкие функциональные возможности микропроцессорной техники создают предпосылки к использованию более сложных, например, итерационных измерительных алгоритмов с опорным случайным процессом (ОСП) [3], реализация которых ранее была затруднительна. Под измерительным итерационным алгоритмом понимается процесс уравновешивания искомой (измеряемой) величины заданной уравновешивающей величиной, выраженной в единицах измерения, направленной на получение результата измерения минимизацией в установленном смысле отклонения между уравновешивающей и искомой величинами.

Целью работы является сравнение известного и предлагаемого итерационного на основе метода измерения с ОСП алгоритмов измерения плотности для разработки рекомендаций по их практическому применению.

В статье исследуются следующие существенные для сравнения свойства алгоритмов: а) эффект линеаризации градуировочной характеристики; б) чувствительность; в) эффективность, характеризующаяся величиной методической погрешности за заданное время измерения; г) помехоустойчивость.

Сущность измерения плотности ρ по известному алгоритму [1] состоит в том, что за время измерения t накапливают (интегрируют) количество событий k_1, соответствующее интенсивности появления, например, γ-квантов на выходе исследуемого объекта. В результате интегрирования получают уравнение

$$k_1 = I_0 t \exp(-a\rho), \tag{1}$$

$$\rho = (1/a)(\ln I_0 t - \ln k_1). \tag{2}$$

В статье предлагается алгоритм измерения, в котором, наряду с основным (измеряемым) сигналом, вводится опорный случайный сигнал. Формирование основного и опорного сигналов осуществляется посредством воздействия радиоизотопного ЗС на исследуемый и дополнительный объекты соответственно. Дополнительный объект идентичен исследуемому и имеет априори известное с заданной точностью значение плотности. Примем, без ограничения общности, плотность дополнительного объекта равной нулю.

Алгоритм измерения плотности с ОСП имеет вид

$$k[(n+1)\Delta t] = k(n\Delta t) - \alpha\{\xi_0(\Delta t)\exp[-a\rho + ak(n\Delta t)] - \\ - \xi_*(\Delta t)\exp[-ak(n\Delta t)]\}, \tag{3}$$

где $k(n\Delta t)$ и $k[(n+1)\Delta t]$ — значения уравновешивающей величины на n- и $(n+1)$-м тактах итерации, причем $0 \leqslant k(n\Delta t) \leqslant \alpha N$; Δt — временно́й шаг итерации; α — коэффициент уравновешивания, выбираемый равным $\alpha = \rho_{max}/N$; ρ_{max} — максимальное значение плотности; N — число дискретных значений уравновешивающей величины; $\xi_0(\Delta t)$ и $\xi_*(\Delta t)$ — независимые пуассоновские случайные величины, описывающие радиоизотопный ЗС на входе исследуемого и дополнительного объектов за временно́й интервал Δt с интенсивностью I_0 и I_* соответственно, при этом предполагается, что $I_0 = I_*$.

Величину временно́го интервала Δt можно выбирать из условия $I_0\Delta t = M$, где M — заданная постоянная.

В алгоритме (3) процесс измерения строится на основе итеративного уравновешивания величиной $k(n\Delta t)$ искомого значения плотности так, чтобы интенсивности ЗС на выходе исследуемого и дополнительного объектов с ростом числа итераций становились равными, т. е. выполнялось предельное соотношение

$$\lim_{n\to\infty} \langle \xi_0(\Delta t)\exp[-a\rho + ak(n\Delta t)] - \xi_*(\Delta t)\exp[-ak(n\Delta t)]\rangle = 0, \tag{4}$$

где $\langle\cdot\rangle$ — оператор математического ожидания по случайным величинам $\xi_0(\Delta t)$ и $\xi_*(\Delta t)$.

Из уравнения (4) получаем градуировочную характеристику для измерения плотности по уравновешивающей величине

$$\rho = 2k_2. \tag{5}$$

Здесь $k_2 = \lim\limits_{n\to\infty}\langle k(n\Delta t)\rangle$ — установившееся в результате n-кратной итерации значение уравновешивающей величины.

Сравнение равенств (2), (5) показывает, что применение алгоритма с ОСП позволяет получить линейную градуировочную характеристику, не зависящую от интенсивности ЗС и, следовательно, от уменьшения активности источника излучения в процессе эксплуатации.

По градуировочным характеристикам (2), (5) определяется чувствительность алгоритмов к изменениям измеряемой величины

$$\frac{dk_1}{d\rho} = -ak_1; \quad \frac{dk_2}{d\rho} = -0{,}5.$$

Таким образом, для алгоритма с ОСП в отличие от известного чувствительность постоянна на всем диапазоне измерения и не зависит от величины массового коэффициента ослабления и геометрических размеров исследуемого объекта. Последнее позволяет существенно повысить точность измерения плотности пароводяной смеси в трубах малого внутреннего диаметра.

Для сравнения эффективности алгоритмов (1), (3) введем в качестве меры методической погрешности обобщенную оценку в виде второго начального момента или среднего квадрата. Тогда более эффективным будем считать алгоритм, имеющий меньшую величину методической погрешности за заданное время измерения T. Значение параметра T выбирается с учетом динамики изменения измеряемой плотности во времени.

Методическая погрешность измерения $\Gamma_1(T)$ по известному алгоритму имеет вид [2]

$$\Gamma_1(T) = \exp(a\rho)/(2a^2 I_0 T). \qquad (6)$$

Для определения эффективности алгоритма с ОСП разложим в выражении (3) экспоненциальную функцию относительно установившегося значения в ряд Тейлора и ограничимся линейным приближением. После выполнения необходимых преобразований получим следующую оценку методической погрешности измерения по предложенному алгоритму:

$$\Gamma_2(L\Delta t) = \{[1 - 2\alpha a M \exp(-a\rho/2)]^2 + 2\alpha^2 a^2 M \exp(-a\rho)\}^L [\Gamma_2(0) - \sigma^2] + \sigma^2, \qquad (7)$$

где $\Gamma_2(L\Delta t) = \langle [k(L\Delta t) - \rho/2]^2 \rangle$; L — эквивалентный для рассматриваемых алгоритмов объем выборки, определяемый из равенства $L\Delta t = T$; $\Gamma_2(0)$ и $\sigma^2 = \lim\limits_{L\to\infty} \Gamma_2(L\Delta t)$ — начальное и предельное значения методической погрешности соответственно:

$$\sigma^2 = \frac{\alpha}{2a \exp(a\rho/2) - \alpha a^2 (1 + 2M)}. \qquad (8)$$

Из выражения (8) следует, что выбором параметров алгоритма с ОСП, а именно коэффициента уравновешивания α и величины временно́го шага Δt из условия $\alpha a M \ll 1$, можно значительно уменьшить влияние интенсивности ЗС на методическую погрешность измерения.

Представим равенство (7) в виде

$$\Gamma_2(L\Delta t) = \sigma^2 [1 + \beta(L)], \qquad (9)$$

где $\beta(L) \approx (\Theta - 1)\exp[-4\alpha a M L \exp(-a\rho/2)]$.

В формуле (9) $\Theta = \Gamma_2(0)/\sigma^2$ пропорционально числу градаций измеряемой величины, различимых посредством применения алгоритма (3), следовательно, $\ln\Theta$ определяет количество информации, получаемое в результате измерения [4].

Используя соотношения (6), (9), можно сделать вывод об эффективности исследуемых алгоритмов в зависимости от их параметров и интенсивности ЗС. Действительно, из отношения

$$\frac{\Gamma_2(L\Delta t)}{\Gamma_1(T)} = \frac{\alpha a I_0 T [1 + \beta(L)]}{\exp(3a\rho/2) - \alpha a \exp(a\rho)(0{,}5 + M)}$$

следует, что при $L \leqslant \dfrac{\exp(3a\rho/2)}{\alpha a M [1 + \beta(L)]}$ эффективным в установленном смысле является предложенный алгоритм, так как $\Gamma_2(L\Delta t) \leqslant \Gamma_1(T)$, в противном случае эффективным становится известный алгоритм измерения.

При радиоизотопных измерениях возникает проблема измерения в условиях воздействия помех из-за случайной природы ЗС, а также наличия фонового излучения $I_\text{ф}$, нестабильности коэффициента регистрации излучения ε. Указанные влияющие факторы могут привести к возникновению существенной погрешности смещения Δ в результатах измерений.

Поэтому свойство помехоустойчивости при выборе наилучшего алгоритма измерения является основным.

Сравнивая выражение для известного алгоритма в условиях помех

$$k_1 = \varepsilon I_0 t \exp(-a\rho) + \varepsilon I_\phi t$$

с исходным представлением (1), получаем следующее значение погрешности смещения:

$$\Delta_1 = \frac{1}{a}\left[\ln \varepsilon - \ln\left(1 - \frac{\varepsilon I_\phi t}{k_1}\right)\right].$$

В работе [5] предлагается соответствующей калибровкой скомпенсировать погрешность Δ_1. Однако следует учитывать, что величины ε, I_ϕ, k_1 случайны и изменяются во времени, поэтому процесс калибровки не приводит к полной компенсации погрешности смещения.

Рассмотрим алгоритм (3) с учетом воздействия помех

$$k[(n+1)\Delta t] = k(n\Delta t) - \alpha\{\varepsilon_1\xi_0(\Delta t)\exp[-a\rho + ak(n\Delta t)] + \\ + \varepsilon_1\xi_\phi(\Delta t)\exp[ak(n\Delta t)] - \varepsilon_2[\xi_*(\Delta t) + \xi_{\phi*}(\Delta t)]\exp[-ak(n\Delta t)]\}, \quad (10)$$

где ε_1 и ε_2 — коэффициенты регистрации излучения в основном и опорном измерительных трактах; $\xi_\phi(\Delta t)$ и $\xi_{\phi*}(\Delta t)$ пуассоновские случайные величины, описывающие фоновое излучение в основном и опорном измерительных трактах с интенсивностью I_ϕ и $I_{\phi*}$.

Градуировочная характеристика при линейном приближении алгоритма (10) определяется в соответствии с равенством

$$\rho = \frac{\varepsilon_1 I_1 + \varepsilon_2 I_2}{\varepsilon_1 I_0} k_2 + \frac{\varepsilon_1 I_1 - \varepsilon_2 I_2}{\varepsilon_1 I_0 a}.$$

Здесь $I_1 = I_0 + I_\phi$; $I_2 = I_0 + I_{\phi*}$.

Полагая $I_{\phi*} = I_\phi + \Delta I_\phi$, $\varepsilon_2 = \varepsilon_1 + \Delta\varepsilon$ и отбрасывая величины второго порядка малости, получаем максимальную погрешность смещения градуировочной характеристики относительно ее номинального значения (5)

$$\Delta_2 = \Delta\varepsilon/(a\varepsilon_1).$$

Наличие нескомпенсированной погрешности смещения в алгоритме (10) является следствием некоторой асимметрии основного и опорного измерительных трактов. При этом за счет выравнивания параметров ε_1 и ε_2 точность компенсации может быть сделана сколь угодно высокой.

На основании проведенного исследования можно утверждать, что предложенный алгоритм измерения плотности с ОСП позволяет повысить точность и помехоустойчивость измерений, решить задачи линеаризации градуировочной характеристики, увеличения чувствительности, стабильности, независимости результатов измерений от старения радиоизотопного источника излучения. Указанные преимущества дают основание для рекомендации алгоритма (3) к практическому применению.

В заключение отметим, что сравнительные испытания устройств, реализующих предложенный и известный алгоритмы, подтвердили полученные в статье теоретические результаты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гарт Г.** Радиоизотопное измерение плотности жидкостей и бинарных систем.— М.: Атомиздат, 1975.
2. **Клемпнер К. С., Чередниченко И. М.** Вероятностный анализ при проектировании радиоизотопных приборов.— М.: Атомиздат, 1971.
3. **Тихонов Э. П.** Измерения с опорным случайным процессом // Метрология.— 1985.— № 10.
4. **Новицкий П. В., Зограф И. А.** Оценка погрешностей результатов измерений.— Л.: Энергоатомиздат, 1985.
5. **Крейндлин И. И., Матвеев Л. В.** Анализ погрешности радиоизотопных приборов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. радиационная техника.— 1979.— Вып. 5.

Поступила в редакцию 4 июля 1988 г.