Уфа: УГАТУ
Вестник УГАТУ
2000. № 2. С. 175–182

УДК 621.317.2

ТЕОРИЯ ТОЧНОСТИ СТАТИСТИЧЕСКИХ И СПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

А. И. ЗАИКО

Факультет авиационного приборостроения УГАТУ
Тел: (3472) 22 11 62 E-mail: zaiko@ugatu.ac.ru

Излагается теория точности, основанная на комплексном подходе к определению погрешностей статистических и спектральных измерений. Приводится пример применения теории. Показаны преимущества комплексного подхода по сравнению с применяемым элементарным подходом к определению погрешностей

Теория точности; комплексный подход; погрешности; статистические и спектральные измерения

ВВЕДЕНИЕ

В конце уходящего столетия пришло осознание того, что экспериментальную погрешность нельзя сделать по желанию сколь угодно малой, ибо она относится к действительности эксперимента и должна входить в его теорию составной частью [1]. Чем точнее исследователи хотят измерить физическую величину, тем труднее им это сделать [2]. И, наконец, ученые поняли, что надо измерять настолько точно, насколько необходимо, и настолько неточно, насколько возможно [3]. Особенно велика роль погрешностей при статистических и спектральных измерениях, когда пренебрежение погрешностями или их некорректный учет приводят к серьезным ошибкам.

Как правило, каждый влияющий на погрешность статистических и спектральных измерений фактор оценивается своей элементарной погрешностью. Так, отдельно учитываются погрешности из-за квантованности по уровню и дискретности во времени показаний, ограниченности объема выборки и длины реализации. По ним отдельно выбираются апертура квантования по уровню и шаг дискретизации во времени, объем выборки и длина реализации. Для оценки точности измерения статистических и спектральных характеристик элементарные погрешности суммируются [4, 5].

Анализ этого решения проблемы показал, что выбранные из элементарных погрешностей апертуры квантования по уровню, шаг дискретизации во времени, объем выборки и длину реализации нельзя считать наилучшими, а характеристики результирующей погрешности достоверными. Это объясняется тем, что каждая элементарная погрешность находится своим методом, на основе своей математической модели и не учитывает влияние остальных факторов. Учесть интегральное влияние различных факторов при суммировании элементарных погрешностей практически не удается [6, 7].

Данного недостатка лишены методы имитационного моделирования и экспериментального определения характеристик погрешностей. Однако они требуют значительного времени и наличия дорогостоящих образцовых средств измерений. Кроме того, экспериментальный метод имеет ограниченные функциональные возможности и дорог.

Весьма перспективным считается совместное использование расчетных и экспериментальных методов, а также методов имитационного моделирования [8, 9].

Однако объединение столь различных по своей природе методов возможно только на

В основу статьи положен текст доклада на Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям SCM'98, проходившей 22–26 июня 1998 г. в Санкт-Петербурге.

основе адекватной теории точности измерений, которая в настоящее время разрабатывается.

1. СУЩНОСТЬ И ИСТОРИЯ СТАНОВЛЕНИЯ КОМПЛЕКСНОГО ПОДХОДА

Расширить возможности указанных выше методов можно за счёт комплексного учёта основных факторов, влияющих на точность статистических и спектральных измерений: погрешности отсчётов, алгоритмов восстановления сигнала между отсчётами, шага дискретизации, объёма выборки и длины реализации. Идея комплексного подхода заключается в том, чтобы рассматривать погрешность измерений как единое и неделимое целое, трансформирующееся с изменением режимов измерений, условий эксплуатации и других факторов [10]. Он хорошо согласуется с экспериментальным методом и имитационным моделированием.

Впервые на возможность общего (комплексного) подхода к анализу статических и динамических погрешностей указал в 1959 году Н. А. Чехонадский [11]. Это положение комплексного подхода развивалось в работах М. А. Земельмана, В. Н. Иванова, Г. И. Кавалерова, С. М. Мандельштама, T. Kalevski и др. Оно входило в первую редакцию основополагающего стандарта по метрологическому обеспечению средств измерений ГОСТ 8.009-72 [12] и включено в учебник для вузов [13].

Однако в большинстве работ признавалось, что комплексный подход к определению статических и динамических погрешностей является незаменимым для нелинейных средств измерений, а для линейных возможен и элементарный подход. Исследования 1970–73 годов показали, что даже для линейных средств измерений элементарный подход некорректен [14]. К такому же выводу несколько позже пришли A. Metal и A. Zuchowski [15]. Это позволило автору в 1975 году высказаться за необходимость комплексного подхода к определению погрешностей в статическом и динамическом режиме для любых средств измерений [16]. Там же комплексный подход был дополнен вторым положением о погрешностях в нормальных и рабочих условиях эксплуатации.

Затем комплексный подход пополнился еще четырьмя положениями: о погрешностях в установившихся и переходных режимах [17], о погрешностях многозвенных и многоканальных разомкнутых и замкнутых измерительных систем [18, 19, 20], о методических и инструментальных погрешностях, о систематических и случайных погрешностях. Все они систематизированы в монографии [10].

Комплексный подход к определению погрешностей нашел применение при испытаниях аэрокосмической техники и для экспертизы образцов и комплексов вооружения, где требования к достоверности результатов и метрологическому обеспечению измерений особенно высоки. Он узаконен отраслевыми нормативно-техническими документами, доведен до инженерных методик, сопровождаемых пакетами прикладных программ [21, 22, 23].

Комплексный подход к определению погрешностей средств измерений хорошо реализуется экспериментально. Для этого разработаны соответствующие способы и устройства [24, 25]. Эксперименты проводились неоднократно на преобразователях различных принципов действия в лабораториях четырех организаций и дали хорошее совпадение результатов расчета с экспериментальными данными [26, 27]. Он неоднократно апробирован за рубежом и получил признание [28, 29], находит применение в отечественных нормативно-технических документах [30] и иностранной справочной литературе [31].

Комплексный подход к определению погрешностей статистических измерений был предложен в 1986 году [7], а для спектральных измерений излагается в данной работе впервые.

2. ИЗМЕРЕНИЕ ПЛОТНОСТЕЙ ВЕРОЯТНОСТЕЙ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ

Для эргодических случайных процессов оценки одномерной $\langle\varpi_1[X]\rangle$ и двумерной $\langle\varpi_2[X', X'']\rangle$ плотностей вероятностей равны [32]:

$$\langle\varpi_1[X]\rangle = \frac{1}{T}\int_0^T \varpi_1[X|\langle x(t)\rangle]\,dt; \qquad (1)$$

$$\langle\varpi_2[X', X'']\rangle = \frac{1}{T-|t''-t'|}\times$$
$$\times\int_0^{T-|t''-t'|} \varpi_2[X', X''|\langle x(t)\rangle]\,dt, \qquad (2)$$

где $\langle x(t)\rangle$ — измеренная аналоговым способом оценка реализации случайного процесса, а T — её длительность.

При цифровых измерениях с шагом дискретизации $T_0 = t_{i+1} - t_i$, где i — номер показания, и экстраполяции сигнала $x(t)$ по одному предыдущему показанию x_i выражения (1) и (2) принимают вид

$$\langle \varpi_1 [X] \rangle = \frac{1}{nT_0} \sum_{i=1}^{n} \int_{t_i}^{t_{i+1}} \varpi_1 [X| x_i] \, dt, \qquad (3)$$

$$\langle \varpi_2 [X', X''] \rangle = \frac{1}{(n-\mu)T_0} \times \sum_{i=1}^{n-\mu} \int_{t_1}^{t_{i+1}} \varpi_2 [X', X''| x_i] \, dt, \qquad (4)$$

где $\varpi_1[X|x_i]$ и $\varpi_2[X', X''|x_i]$ — одномерная и двумерная плотности вероятности сигнала в моменты времени t, t' и t'' при условии, что на интервале $t_i \le t \le t_{i+1}$ он экстраполирован по показанию x_i; $\mu = |t'' - t'|/T_0 = 1, 2, \ldots, (n-1)$; n — количество показаний в реализации $x(t)$.

3. ИЗМЕРЕНИЕ МОМЕНТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ

По определению, оценки математического ожидания $\langle m \rangle$, дисперсии $\langle \sigma^2 \rangle$ и корреляционной функции $\langle R(t'' - t') \rangle$ находятся как моменты оценок (3), (4) и равны [7]

$$\langle m \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} X \langle \varpi_1 [X] \rangle \, dX = \frac{1}{nT_0} \sum_{i=1}^{n} \int_{t_i}^{t_{i+1}} m(t| x_i) \, dt; \qquad (5)$$

$$\langle \sigma^2 \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} (X - m)^2 \langle \varpi_1 [X] \rangle \, dX = \frac{1}{nT_0} \sum_{i=1}^{n} \int_{t_i}^{t_{i+1}} \Big\langle [m(t| x_i) - m]^2 + \sigma^2 (t| x_i) \Big\rangle \, dt; \qquad (6)$$

$$\langle R(\mu T_0) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (X' - m)(X'' - m) \times \langle \varpi_2 [X', X''] \rangle \, dX' dX'' = \frac{1}{n-\mu} \sum_{i=1}^{n-\mu} \int_{t_i}^{t_{i+1}} \Big\{ [m(t|x_i) - m][m(t + \mu T_0 | x_{i+\mu}) - m] + R(t, t + \mu T_0 | x_i, x_{i+\mu}) \Big\} \, dt, \qquad (7)$$

где $m(t|x_i)$ и $\sigma^2(t|x_i)$ — условные математическое ожидание и дисперсия сигнала на интервале $t_i \le t \le t_{i+1}$; $R(t', t''|\cdot)$ — условная корреляционная функция сигнала на интервалах $t_i \le t \le t_{i+1}$ и $t_{i+\mu} \le t + \mu T_0 \le t_{i+\mu+1}$.

4. ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРОВ СЛУЧАЙНОГО ПРОЦЕССА

Чаще всего энергетический спектр $S(\omega)$ случайного процесса измеряют посредством прямого применения преобразования Фурье и его реализации $x(t)$ с последующим осреднением квадрата модуля текущего спектра $\langle G(j\omega) \rangle$ [33, 34]. Поэтому $\langle G(j\omega) \rangle$ и $\langle S(\omega) \rangle$ при аналоговых измерениях соответственно равны

$$\langle G (j\omega) \rangle = \int_{0}^{T} \langle x (t) \rangle e^{-j\omega t} \, dt;$$

$$\langle S (\omega) \rangle = \frac{1}{T} \langle G (-j\omega) \rangle \langle G (j\omega) \rangle = \frac{1}{T} \langle G(\omega) \rangle^2,$$

где $j = \sqrt{-1}$ — мнимая единица; $\langle G(\omega) \rangle$ — оценка амплитудно-частотной характеристики.

При цифровых измерениях эргодического случайного процесса и экстраполяции сигнала $x(t)$ по одному предыдущему показанию x_i эти оценки примут вид

$$\langle G (j\omega) \rangle = \sum_{i=1}^{m} \int_{t_i}^{t_{i+1}} m(t|x_i) e^{-j\omega t} \, dt; \qquad (8)$$

$$\langle S (\omega) \rangle = \frac{1}{nT_0} \langle G (-j\omega) \rangle \langle G (j\omega) \rangle. \qquad (9)$$

5. ПОГРЕШНОСТИ СТАТИСТИЧЕСКИХ И СПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Близость полученных оценок (3), (5)–(9) к истинным вероятностным характеристикам сигнала оценивается с помощью погрешностей. Так, погрешность оценки (3) равна

$$\delta_{\varpi}(X) = \langle \varpi_1[X] \rangle - \varpi_1[X],$$

где $\varpi_1[X]$ – истинное значение плотности вероятности сигнала. Математическое ожидание $m_{\delta\varpi}$ и дисперсия $\sigma^2_{\delta\varpi}$ погрешности равны

$$m_{\sigma\varpi} = \lim_{\substack{X_н \to -\infty \\ X_в \to \infty}} \frac{1}{X_в - X_н} \int\limits_{X_н}^{X_в} \delta_\varpi(X)\, dX;$$

$$\sigma^2_{\delta\varpi} = \lim_{\substack{X_н \to -\infty \\ X_в \to \infty}} \frac{1}{X_в - X_н} \int\limits_{X_н}^{X_в} \left[\delta_\varpi(X) - m_{\delta\varpi}\right]^2 dX =$$

$$= \lim_{\substack{X_н \to -\infty \\ X_в \to \infty}} \frac{1}{X_в - X_н} \int\limits_{X_н}^{X_в} \delta^2_\varpi(X)\, dX - m^2_{\delta\varpi}, \qquad (10)$$

где $X_н$ и $X_в$ — нижняя и верхняя границы распределения ϖ_1[X]. Аналогично математические ожидания погрешностей оценок (5)–(7) равны [7]

$$m_{\delta m} = \langle m \rangle - m, \qquad m_{\delta\sigma^2} = \langle \sigma^2 \rangle - \sigma^2,$$
$$m_{\delta R}(\mu T_0) = \langle R(\mu T_0) \rangle - R(\mu T_0),$$

где m, σ^2 и $R(\mu T_0)$ — истинные значения математического ожидания, дисперсии и корреляционной функции сигнала. Дисперсии погрешностей оценок (5)–(7) находятся как их центральные моменты второго порядка и равны для $\mu \ll n$ [7]

$$\sigma^2_{\delta m} = \frac{1}{n^2 T_0^2} \sum_{i=1}^{n} \int\limits_{t_i}^{t_{i+1}} \int\limits_{t_i}^{t_{i+1}} R(t', t''|x_i)\, dt' dt'';$$

$$\sigma^2_{\delta\sigma^2} = \frac{2}{n^2 T_0^2} \sum_{i=1}^{n} \int\limits_{t_i}^{t_{i+1}} \int\limits_{t_i}^{t_{i+1}} \Big\{ R^2(t', t''|x_i) + 2R(t', t''|x_i) \left[m(t'|x_i) - m\right] \times \left[m(t''|x_i) - m\right] \Big\} dt' dt''; \qquad (11)$$

$$\sigma^2_{\delta R}(\mu T_0) = \frac{1}{(n - 3\mu)^2 T_0^2} \sum_{i=1+\mu}^{n-2\mu} \int\limits_{t_i}^{t_{i+1}} dt \times$$
$$\times \int\limits_{t_{i-\mu}}^{t_{i-\mu+1}} [m(t' + \mu T_0|x_{i+\mu}) - m][m(t''|x_{i-\mu}) - m] \times R(t', t'' + \mu T_0|x_{i-\mu})\, dt' +$$
$$+ \int\limits_{t_i}^{t_{i+1}} \Big\langle [m(t'|x_i) - m][m(t''|x_i) - m] \times R(t' + \mu T_0, t'' + \mu T_0|x_i) +$$
$$+ [m(t' + \mu T_0|x_{i+\mu}) - m] \times [m(t'' + \mu T_0|x_{i+\mu}) - m] R(t', t''|x_i) +$$
$$+ R(t' + \mu T_0, t'' + \mu T_0|x_i) R(t', t''|x_i) \Big\rangle dt' +$$
$$+ \int\limits_{t_{i+\mu}}^{t_{i+\mu+1}} [m(t'|x_i) - m][m(t'' + \mu T_0|x_{i+2\mu}) - m] \times R(t' + \mu T_0, t''|x_{i+\mu})\, dt'. \qquad (12)$$

Наконец, математическое ожидание погрешности спектральной характеристики равно

$$m_{\delta s}(\omega) = \langle S(\omega) \rangle - S(\omega),$$

где $S(\omega)$ — истинное значение энергетического спектра случайного процесса. Дисперсии погрешностей оценок (8) и (9) соответственно равны:

$$\sigma^2_{\delta G}(j\omega) = \sum_{i=1}^{n} \int\limits_{t_i}^{t_{i+1}} \int\limits_{t_i}^{t_{i+1}} R(t', t''|x_i) \times e^{-j\omega(t'+t'')}\, dt' dt''; \qquad (13)$$

$$\sigma^2_{\delta G}(\omega) = \frac{1}{n^2 T_0^2} \times$$
$$\times \Big[R_{\delta G}(j\omega, j\omega) R_{\delta G}(-j\omega, -j\omega) + R_{\delta G}(j\omega, -j\omega) R_{\delta G}(-j\omega, j\omega) + \langle G(-j\omega) \rangle \langle G(j\omega) \rangle R_{\delta G}(j\omega, -j\omega) + \langle G(-j\omega) \rangle \langle G(-j\omega) \rangle R_{\delta G}(j\omega, j\omega) + \langle G(j\omega) \rangle \langle G(-j\omega) \rangle R_{\delta G}(-j\omega, j\omega) + \langle G(j\omega) \rangle \langle G(j\omega) \rangle R_{\delta G}(-j\omega, -j\omega) \Big]. \qquad (14)$$

При выводе формул (11), (12) и (14) начальные моменты высших порядков выражены через моменты первого и второго порядков. Поскольку это возможно только для нормальных распределений, то и выражения (11), (12) и (14), строго говоря, справедливы для нормально распределённых процессов и погрешностей, а для других законов распределения они рассматриваются как приближённые [7].

6. ПРИМЕР ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЛЕКСНОГО ПОДХОДА

Интегрирование полученных выражений рассмотрим и проанализируем на конкретном примере. Опишем измеряемый сигнал стационарным случайным процессом с равномерной плотностью вероятности [35]

$$\varpi_1[X] = \begin{cases} \frac{1}{X_в - X_н}, & X_н \le X \le X_в; \\ 0 & \text{— в остальных случаях,} \end{cases}$$

математическим ожиданием $m = (X_н + X_в)/2$, дисперсией $\sigma^2 = (X_в - X_н)^2/12$, ступенчатой корреляционной функцией

$$R(\tau) = \begin{cases} \sigma^2, & |\tau| \le \theta; \\ 0, & |\tau| > \theta \end{cases}$$

и энергетическим спектром

$$S(\omega) = 2\sigma^2\theta \frac{\sin\omega\theta}{\omega\theta},$$

где θ — интервал корреляции.

Погрешности показаний также опишем равномерным законом распределения с нулевым математическим ожиданием и дисперсией $\sigma_\delta^2 = \Delta^2/3$, где 2Δ — апертура квантования по уровню. Погрешности соседних показаний считаем независимыми. Тогда условная плотность вероятности при экстраполяции по одному показанию для $t_i \le t \le t_{i+1}$ и $T_0 \le \theta$

$$\varpi_1[X|x_i] = \begin{cases} \frac{1}{2\Delta}, & x_i - \Delta \le X \le x_i + \Delta; \\ 0 & \text{— в остальных случаях.} \end{cases} \tag{15}$$

Следовательно,

$$m(t|x_i) = \begin{cases} x_i, & t_i \le t \le t_{i+1}; \\ 0 & \text{— в остальных случаях,} \end{cases}$$

$$R(t', t''|x_i) = \sigma^2(t|x_i) = \begin{cases} \sigma_\delta^2 = \frac{\Delta^2}{3}, & t_i \le t \le t_{i+1}; \\ 0 & \text{— в остальных случаях.} \end{cases}$$

Подставив значение (15) в выражение (3) и обозначив через $\langle P(x_k)\rangle$ частоту появления показания x_k из n отсчётов, получим окончательно уравнение гистограммы в виде [36]

$$\langle\varpi_1[X]\rangle = \begin{cases} \frac{\langle P(x_k)\rangle}{2\Delta}, & x_k - \Delta \le X \le x_k + \Delta; \\ 0 & \text{— в остальных случаях,} \end{cases}$$

где $k = 1, 2, \ldots, M$, причём $M = \frac{X_в - X_н}{2\Delta}$. Математическое ожидание и дисперсия погрешности этой оценки находятся по формулам (10):

$$m_{\delta\varpi} = 0;$$

$$\sigma_{\delta\varpi}^2 = \frac{1}{(2\Delta)^2 M}\sum_{k=1}^{M}\left[\langle P(x_k)\rangle - \frac{1}{M}\right]^2.$$

Оценки $\langle m\rangle$, $\langle\sigma^2\rangle$ и $\langle R(\mu T_0)\rangle$, а также характеристики их погрешностей в рамках выбранной модели сигнала для случая $\mu \ll n$ равны:

$$\langle m\rangle = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i, \qquad m_{\delta m} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i - m;$$

$$\sigma_{\delta m}^2 = \frac{\sigma_\delta^2}{n}; \qquad \langle\sigma^2\rangle = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - m)^2 + \sigma_\delta^2;$$

$$m_{\delta\sigma^2} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - m)^2 + \sigma_\delta^2 - \sigma^2;$$

$$\sigma_{\delta\sigma^2}^2 = \frac{4\sigma_\delta^2}{n}\left[\langle\sigma^2\rangle - \frac{\sigma_\delta^2}{2}\right];$$

$$\langle R(\mu T_0)\rangle = \frac{1}{n-\mu}\sum_{i=1}^{n-\mu}(x_i - m)(x_{i+\mu} - m);$$

$$m_{\delta R}(\mu T_0) = \frac{1}{n-\mu} \times \sum_{i=1}^{n-\mu}(x_i - m)(x_{i+\mu} - m) - R(\mu T_0);$$

$$\sigma_{\delta R}^2(\mu T_0) = \frac{2\sigma_\delta^2}{n-\mu} \times \left[\langle\sigma^2\rangle + \langle R(2\mu T_0)\rangle - \frac{\sigma_\delta^2}{2}\right].$$

Оценки спектральных характеристик $\langle G(j\omega)\rangle$, $\langle S(\omega)\rangle$ и их погрешностей равны:

$$\langle G(j\omega)\rangle = \frac{\sin\omega T_0/2}{\omega T_0/2} e^{-j\frac{\omega T_0}{2}} T_0 \sum_{i=1}^{n} x_i e^{-j\omega t_i};$$

$$\sigma^2_{\delta G}(j\omega) = \sigma^2_\delta T_0^2 \left(\frac{\sin\omega T_0/2}{\omega T_0/2}\right)^2 \times \\ \times \frac{\sin\omega T_0 n}{\sin\omega T_0} e^{-j\omega(2t_1+T_0 n)};$$

$$\langle S(\omega)\rangle = \frac{1}{n}\left(\frac{\sin\omega T_0/2}{\omega T_0/2}\right)^2 \times \\ \times T_0 \sum_{l=1}^{n}\sum_{i=1}^{n} x_l x_i e^{-j\omega(t_i-t_l)};$$

$$m_{\delta S}(\omega) = \frac{1}{n}\left(\frac{\sin\omega T_0/2}{\omega T_0/2}\right)^2 \times \\ \times T_0 \sum_{l=1}^{n}\sum_{i=1}^{n} x_l x_i e^{-j\omega(t_i-t_l)} - 2\sigma^2\theta\frac{\sin\omega\theta}{\omega\theta};$$

$$\sigma^2_{\delta S}(\omega) = \sigma^2_\delta T_0^2 \left(\frac{\sin\omega T_0/2}{\omega T_0/2}\right)^4 \times \\ \times \left\{\sigma^2_\delta\left[\left(\frac{\sin\omega T_0 n}{n\sin\omega T_0}\right)^2 + 1\right] + \right. \\ + \frac{2}{n}\sum_{l=1}^{n}\sum_{i=1}^{n} x_l x_i \cos\omega(t_i-t_l) + \\ \left. + \frac{\sin\omega T_0 n}{n\sin\omega T_0}\frac{2}{n}\sum_{l=1}^{n}\sum_{i=1}^{n} x_l x_i \cos\omega(t_i+t_l)\right\}.$$

7. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенный в работах [6, 7] анализ полученных погрешностей статистических и спектральных характеристик случайных процессов показал, что они комплексно учитывают погрешности от квантования по уровню, дискретизации показаний во времени, конечной длины реализации, ограниченного объема выборки, особенности восстановления сигнала между показаниями и неточности классификации измеренных процессов. Из них как частные случаи путем соответствующих упрощений и преобразований можно получить элементарные погрешности оценок из-за погрешности показаний, дискретности показаний во времени, конечной длины реализации и ограниченного объема выборки. Однако получить комплексные погрешности оценок суммированием элементарных погрешностей можно только для оценок математического ожидания погрешностей, так как элементарные погрешности в них аддитивны. Для других оценок статистических и спектральных характеристик случайных процессов получить комплексные погрешности суммированием элементарных погрешностей не удается, так как элементарные погрешности связаны функционально. Выявить эту связь можно, только найдя комплексные оценки погрешности. Но тогда сама задача суммирования элементарных погрешностей теряет смысл.

Кроме того, из-за взаимодействия между собой не все факторы можно характеризовать элементарными погрешностями. Так, не выделяются элементарные погрешности из-за особенностей восстановления сигнала между отсчетами и неточности классификации измеряемых сигналов.

Наконец, комплексный подход к определению погрешностей статистических и спектральных измерений позволяет учесть не только коррелированность показаний, но и коррелированность их погрешностей.

8. ПРИМЕНЕНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ТЕОРИИ

Изложенный выше комплексный подход к определению погрешностей статистических и спектральных измерений, прежде всего, позволяет получить научно обоснованные оценки точности и достоверности результатов измерений. По Закону России «Об обеспечении единства измерений» без такой оценки результаты измерений не могут использоваться в народном хозяйстве страны.

Кроме того, комплексный подход к определению погрешностей позволяет синтезировать быстрые и точные алгоритмы измерения статистических и спектральных характеристик случайных сигналов. Так, синтезированные алгоритмы позволяют при той же длительности реализации уменьшить погрешность измерения в 2–4 раза по сравнению с известными алгоритмами. И, наоборот, при неизменной точности измерений во столько же раз можно уменьшить длительность реализации.

Наконец, разрабатываемая теория точности позволяет получить эффективные методы уменьшения погрешностей, анализа и синтеза современных информационно-измерительных систем [6, 37].

Дальнейшее развитие теории предполагает совершенствование математических моделей измеряемых сигналов и аналого-цифровых преобразователей различных принципов действия, разработку новых алгоритмов статистических и спектральных измерений повышенных точности и быстродействия. Нужно формировать банк знаний, который станет основой создания новых интеллектуальных информационно-измерительных систем для статистических и спектральных измерений требуемой точности [9, 38].

ВЫВОДЫ

Таким образом, разрабатываемая теория точности относится к фундаментальным проблемам метрологии. Она основывается на оригинальном комплексном подходе к определению погрешностей, позволяющем во взаимосвязи учесть основные факторы, влияющие на точность измерений. Комплексный подход к определению погрешности обладает большей достоверностью по сравнению с существующим подходом. В нем отсутствует суммирование элементарных погрешностей, которое нельзя выполнить корректно с учетом их коррелированности. Он хорошо согласуется с экспериментом и позволяет получить эффективные методы повышения точности, анализа и синтеза современных информационно-измерительных систем для статистических и спектральных измерений. Синтезированные алгоритмы позволяют в 2–4 раза уменьшить погрешность статистических и спектральных измерений или во столько же раз сократить их длительность.

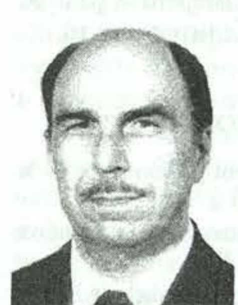
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бриллюэн Л.** Научная неопределенность и информация. М.: Мир, 1966. 272 с.
2. **Зайдель А. Н.** Элементарные оценки ошибок измерений. Л.: Наука, 1968. 96 с.
3. **Krainz G.** Die Bedeutung der Genaigkeit in der Messtechnik // BBC–Nachrichten. 1975. Heft 5/6. S. 367.
4. **Грибанов Ю. И., Мальков В. Л.** Погрешности и параметры цифрового спектрально-корреляционного анализа. М.: Радио и связь, 1984. 160 с.
5. **Бендат Дж., Пирсол А.** Прикладной анализ случайных данных / Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 540 с.
6. **Заико А. И.** Анализ и синтез информационно-измерительных систем для натурных испытаний по точностным характеристикам: Дис. ... д-ра техн. наук: 05.11.16. Л.: ЛЭТИ, 1989. 471 с. ДСП.
7. **Заико А. И.** К определению погрешностей статистических измерительных систем // Метрология. 1986. № 4. С. 11–19.
8. **Методология** летных испытаний пилотажно-навигационного оборудования самолетов и вертолетов / Д.-Е. П. Новодворский, Г. И. Поярков, Е. Г. Харин и др. М.: Машиностроение, 1984. 136 с.
9. **Романов В. Н., Соболев В. С., Цветков Э. И.** Интеллектуальные средства измерений / Под ред. Э. И. Цветкова. М.: РИЦ «Татьянин день», 1994. 280 с.
10. **Заико А. И.** Точность аналоговых линейных измерительных каналов ИИС. М.: Изд-во стандартов, 1987. 136 с.
11. **Чехонадский Н. А.** О возможности общего подхода к анализу статических и динамических погрешностей // Измерительная техника. 1959. № 3. С. 10–12.
12. **ГОСТ** 8.009-72 ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений: Введ. 1.01.72. М.: Изд-во стандартов, 1972. 16 с.
13. **Шляндин В. М.** Цифровые измерительные устройства: Учеб. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1981. 335 с.
14. **Заико А. И.** Разработка и исследование адаптивных цифровых измерительных систем на основе общего информационного подхода к оценке погрешностей: Дис. ... канд. техн. наук: 05.11.16. Куйбышев, 1973. 159 с.
15. **Metal A., Zuchowski A.** Dinamische Messtechnik-Begriffe und Definitionen // Archiv fuer Technisches Messen. 1975. № 469. S. 387–390.
16. **Заико А. И.** О необходимости общего подхода к определению погрешностей ИИС и системного подхода к нахождению их характеристик // Приборы и системы управления. 1975. № 11. С. 19–22.
17. **Заико А. И.** Общий подход к определению погрешностей измерительных систем в установившихся и переходных режимах // Измерительная техника. 1979. № 3. С. 21–24.
18. **Заико А. И.** Динамическая погрешность одноканальной многозвенной измерительной системы // Изв. вузов. Приборостроение. 1977. № 11. С. 24–28.
19. **Заико А. И.** Динамическая погрешность многоканальной измерительной системы // Изв. вузов. Приборостроение. 1979. № 5. С. 8–12.
20. **Заико А. И.** Динамическая погрешность измерительной системы // Изв. вузов. Приборостроение. 1981. № 5. С. 16–20.
21. **МУ 97-84.** Методы, алгоритмы и программы определения погрешности результатов испытаний ГТД. Общие требования: Метод. указания. 1984. 43 с. ДСП.
22. **ОСТ 1 02563-85.** ОСИ. Определение погрешности результатов измерений при испытаниях ГТД и их узлов с применением информационно-измерительных систем. Основные положения: Введ. 01.01.87. 1986. 12 с.
23. **МУ 688.001-85.** Система единства измерений при испытаниях летательных аппара-

тов. Расчет погрешностей информационно-измерительных систем для летных испытаний: Метод. указания // ЛИИ, УАИ. 1985. 112 с.

24. **А. с. 890287** СССР, МКИ G01R 35/00. Способ определения статистической погрешности измерительных устройств / А. И. Заико (СССР). № 2481379/18-21; Заявлено 25.04.77; Опубл. 15.12.81. Бюл. № 46. 3 с.: ил.
25. **А. с. 991342** СССР, МКИ G01R 35/00. Способ определения статистической погрешности измерительных устройств / А. И. Заико (СССР). № 3249762/18-21; Заявлено 17.02.81; Опубл. 23.01.83. Бюл. № 3. 3 с.: ил.
26. **Методика** и средства автоматизации исследования погрешностей аналого-цифровых преобразователей в динамическом режиме при случайном входном сигнале / А. А. Бакиров, А. И. Заико, Г. А. Зильберман и др. // Системы автоматизации метрологических исследований: Сб. науч. тр. Львов: ВНИИМИУС, 1983. С. 66–75.
27. **Экспериментальная** проверка общего подхода к определению погрешностей измерительных преобразователей в переходных режимах / А. В. Грязин, А. И. Заико, А. Х. Сахипгареев и др. // Теория и проектирование систем автоматического управления и их элементов: Межвуз. науч. сб. Уфа: УГАТУ, 1996. С. 143–148.
28. **Zaiko A., Kulikovski L.** Present state and perspectives of the definition and reduction if errors in information measuring systems // Xth IMEKO World Congress 1985: Preprint. Praha, CSVTS, IMEKO, 1985. Vol. 7. P. 145–152.
29. **Zaiko A., Zaiko N., Sakhipgareyev A.** Complex of methods and software for calculation of errors in measuring channels // Proc. of the 8th Int. Symp. on New Measurement and Calibration Methods of Electrical Quantities and Instruments. Budapest, Hungary: IMEKO TC-4, 1996. P. 121–124.
30. **МИ 2247-93.** Рекомендация. ГСИ. Метрология. Основные термины и определения. СПб.: ВНИИМ, 1994. 60 с.
31. **Измерения** в промышленности: Справ. изд. В 3-х кн. Кн. 1. Теоретические основы / Пер. с нем.; Под ред. П. Профоса. М.: Металлургия, 1990. 492 с.
32. **Заико А. И.** Аналоговые измерения многомерных характеристик случайных процессов // Метрология. 1985. № 11. С. 3–6.
33. **Кей С. М., Марпл С. Л.** Современные методы спектрального анализа: Обзор // ТИИЭР. 1981. Т. 69, № 11. С. 5–51.
34. **Гольденберг Л. М., Матюшкин Б. Д., Поляк М. Н.** Цифровая обработка сигналов: Справочник. М.: Радио и связь, 1985. 312 с.
35. **Заико А. И.** Случайный сигнал с равномерным законом распределения // Измерительная техника. 1999. № 1. С. 9–11.
36. **Заико А. И.** Измерение плотности вероятности эргодических случайных сигналов цифровым методом // Метрология. 1999. № 1. С. 21–27.
37. **Заико А. И.** Уменьшение погрешности измерительных каналов усреднением из показаний // Измерительная техника. 1992. № 9. С. 3–4.
38. **Губарев В. В.** База знаний «Вероятностные модели» // Сб. докл. междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям SCM'98. СПб., 1998. Т. 1. С. 156–159.

ОБ АВТОРЕ



Заико Александр Иванович, профессор кафедры теоретических основ электротехники УГАТУ. Дипл. инженер электронной техники (УАИ, 1970), д-р техн. наук по информационно-измерительным системам (ЛЭТИ, 1990). Заслуженный изобретатель РБ, чл.-кор. Международной инженерной академии. Исследования в области метрологического обеспечения, анализа и синтеза информационно-измерительных систем.