

Т. А. Алиев^{1,2}, академик НАН Азербайджана, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, telmancyber@gmail.com,
Н. Ф. Мусаева^{1,2}, д-р техн. наук, проф., musanaila@gmail.com,
Г. А. Гулуев¹, д-р техн. наук, зав. лабораторией, lab1.5@isi.az,
Н. Э. Рзаева^{1,2}, Ph.D., доц., зав. отделом, nikanel1@gmail.com,

¹Институт систем управления, г. Баку, Азербайджан,

²Азербайджанский архитектурно-строительный университет, г. Баку, Азербайджан

Технологии анализа и вычисления взаимосвязи между полезной составляющей и помехой зашумленного сигнала в системах мониторинга

Обсуждается разработка алгоритмов вычисления взаимной корреляционной функции и коэффициента корреляции между полезным сигналом и помехой зашумленного сигнала. Проанализированы факторы, влияющие на адекватность результатов решения задач мониторинга и контроля. Отмечено, что при обработке зашумленных сигналов следует применять алгоритмы и технологии раздельной обработки полезной составляющей и помехи. Показано, что в системах мониторинга и контроля при возникновении неисправностей нарушается такое важное условие, как отсутствие корреляции между полезным сигналом и помехой. Поэтому возникает задача вычисления взаимной корреляционной функции и коэффициента корреляции между полезным сигналом и суммарной помехой.

Предложены алгоритмы вычисления оценок коэффициента корреляции и корреляционной функции между полезным сигналом и помехой с использованием оценок корреляционной функции между центрированными и нецентрированными зашумленными сигналами. Отмечено, что момент возникновения корреляции между полезным сигналом и помехой можно контролировать в реальном масштабе времени. Показано, что оценка дисперсии суммарной помехи до появления корреляции является стабильной величиной. При появлении корреляции значение дисперсии суммарной помехи меняется. Разность дисперсий принимается как аналог оценки взаимной корреляционной функции между полезным сигналом и помехой при нулевом временном сдвиге.

Предложена технология проведения вычислительных экспериментов. Сформированы дискретные значения полезного сигнала, помехи и зашумленного сигнала. Вычислены коэффициент корреляции и взаимная корреляционная функция между полезным сигналом и помехой по разработанным и традиционным алгоритмам. Проведен сравнительный анализ.

Показано, что предлагаемые в работе технологии вычисления оценок взаимной корреляционной функции и коэффициента корреляции между полезным сигналом и помехой, а также дисперсии суммарной помехи позволяют извлечь дополнительную важную информацию из зашумленных сигналов.

Ключевые слова: полезный сигнал, помеха, зашумленный сигнал, отсчеты, корреляционная функция, коэффициент корреляции, система мониторинга

Введение

На сегодняшний день имеется широкий выбор инструментов контроля, анализа, испытаний и измерений. Современные контрольно-измерительные устройства достаточно эффективны и обеспечивают надежность и эффективность протекания исследуемых процессов, что способствует повышению качества. Кроме того, современные микропроцессорные устройства, которые очень компактны, могут быть использованы как цифровые измерительные устройства. Такого типа устройства позволяют регистрировать и анализировать измерительную информацию. На основе полученных данных определяется динамика изменения сигнала, поступающего от датчика, и делаются прогнозы на некоторый определенный промежуток времени [1–3]. При этом для решения задач мониторинга и контроля, как правило,

применяются традиционные алгоритмы цифровой обработки зарегистрированных сигналов [1–3], эффективность которой часто остается неудовлетворительной. Это связано с тем, что в случае обработки зашумленного сигнала $g(t) = x(t) + \varepsilon(t)$, состоящего из полезной составляющей $x(t)$ и помехи $\varepsilon(t)$, не используется информационный потенциал раздельной обработки полезной части и помехи, а также характеристик их взаимосвязи [4–8]. Поэтому при решении многочисленных важнейших задач мониторинга, контроля, управления и т. д. получаются неадекватные результаты [1].

Традиционно предполагается, что при анализе зашумленных сигналов $g(t)$ такие классические условия, как стационарность, эргодичность, нормальность закона распределения и отсутствие корреляции между полезным сигналом $x(t)$ и помехой $\varepsilon(t)$, выполняются [1–8]. Однако в системах мониторинга и контроля часто

при возникновении неисправностей нарушается такое важное условие, как отсутствие корреляции между полезным сигналом и помехой [1]. При этом вопрос наличия корреляции при возникновении повреждений в технических объектах практически не рассматривается [9–14].

В связи с этим возникает необходимость создания таких технологий, которые как при выполнении, так и при не выполнении предполагаемых классических условий обеспечивали бы адекватность результатов решения задач мониторинга и контроля. Необходимо разработать технологии, алгоритмы и программные средства вычисления коэффициента корреляции и взаимной корреляционной функции между полезным сигналом $x(t)$ и помехой $\varepsilon(t)$, располагая цифровыми отсчетами зашумленного сигнала $g(t)$.

Постановка задачи

На практике из-за зашумленности полезных сигналов $x(t)$ помехами $\varepsilon(t)$ при определении оценок их корреляционных функций $R_{xx}(\mu)$ возникают ощутимые погрешности. При этом, как это показано в работах [1, 15–20], суммарная помеха $\varepsilon(t)$ складывается из помехи $\varepsilon_1(t)$ от влияния внешних факторов и шума $\varepsilon_2(t)$, который возникает от зарождения дефекта в процессе эксплуатации объектов, т. е. $\varepsilon(t) = \varepsilon_1(t) + \varepsilon_2(t)$. В режиме нормальной эксплуатации объекта помеха $\varepsilon(t) = \varepsilon_1(t)$ не имеет корреляцию с полезным сигналом $x(t)$. В начале скрытого периода изменения технического состояния объекта при появлении дефектов возникает помеха $\varepsilon_2(t)$, которая коррелирует с полезным сигналом. В результате, начиная с этого момента взаимная корреляционная функция $R_{x\varepsilon}(\mu)$ и коэффициент корреляции $r_{x\varepsilon}$ между полезным сигналом $x(t)$ и суммарной помехой $\varepsilon(t)$ отличаются от нуля. Фактически, зарождение и развитие неисправностей отражается в оценках $R_{x\varepsilon}(\mu)$ и $r_{x\varepsilon}$. Поэтому для контроля начала и динамики изменения технического состояния объектов целесообразно использовать значения данных двух характеристик.

Следует отметить, что дискретизированные значения $x(i\Delta t)$ полезного сигнала и помехи $\varepsilon(i\Delta t)$ невозможно выделить из дискретизированных значений $g(i\Delta t)$ зашумленного сигнала, который поступает от соответствующего датчика. Предположим, что $g(t)$ — дискретизированный стационарный эргодический случай-

ный сигнал с нормальным законом распределения, состоящий из полезного сигнала $x(t)$ и помехи $\varepsilon(t)$ с математическим ожиданием m_ε , равным нулю. При этом формула вычисления оценки дисперсии D_g зашумленного сигнала $g(t)$ имеет вид [1, 15–20]

$$\begin{aligned} D_g &\approx R_{g'g'}(0) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g'^2(i\Delta t) = \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [x'(i\Delta t) + \varepsilon'(i\Delta t)][x'(i\Delta t) + \varepsilon'(i\Delta t)] = \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x'^2(i\Delta t) + 2 \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x'(i\Delta t)\varepsilon'(i\Delta t) + \\ &+ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon'^2(i\Delta t) = R_{x'x'}(0) + 2R_{x'\varepsilon'}(0) + R_{\varepsilon'\varepsilon'}(0), \end{aligned} \quad (1)$$

где $g'(i\Delta t) = g(i\Delta t) - m_g$, $x'(i\Delta t) = x(i\Delta t) - m_x$, $\varepsilon'(i\Delta t) = \varepsilon(i\Delta t) - m_\varepsilon$ — центрированные отсчеты; m_g , m_x , m_ε — математические ожидания сигналов $g(t)$, $x(t)$ и $\varepsilon(t)$ соответственно; $R_{x'\varepsilon'}(\mu)$ — взаимная корреляционная функция между полезным сигналом и помехой; $R_{\varepsilon'\varepsilon'}(0)$ — дисперсия помехи $\varepsilon(t)$.

Таким образом, погрешность дисперсии зашумленного сигнала

$$\lambda_{gg}(\mu = 0) = 2R_{x'\varepsilon'}(0) + R_{\varepsilon'\varepsilon'}(0). \quad (2)$$

Формулу для вычисления оценки корреляционной функции $R_{g'g'}(\mu)$ зашумленного сигнала $g(t)$ при $\mu \neq 0$ можно также представить в виде

$$\begin{aligned} R_{g'g'}(\mu) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g'(i\Delta t)g'((i+\mu)\Delta t) = \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [x'(i\Delta t) + \varepsilon'(i\Delta t)] \times \\ &\times [x'((i+\mu)\Delta t) + \varepsilon'((i+\mu)\Delta t)] = \\ &= R_{x'x'}(\mu) + R_{\varepsilon'x'}(\mu) + R_{x'\varepsilon'}(\mu) + R_{\varepsilon'\varepsilon'}(\mu). \end{aligned} \quad (3)$$

Следует заметить, что для инерционных объектов при $\mu \neq 0$ справедливо приближенное равенство $R_{\varepsilon'x'}(\mu) \approx 0$, в то время как для неинерционных объектов данное равенство не выполняется. Тогда суммарная погрешность оценок корреляционной функции зашумленного сигнала $g(t)$ будет равна

$$\lambda_{gg}(\mu) = \begin{cases} 2R_{x'\varepsilon'}(0) + R_{\varepsilon'\varepsilon'}(0) & \text{при } \mu = 0; \\ R_{x'x'}(\mu) + R_{\varepsilon'x'}(\mu) + R_{x'\varepsilon'}(\mu) + R_{\varepsilon'\varepsilon'}(\mu) & \text{при } \mu \neq 0, \end{cases} \quad (4)$$

т. е. при $\mu \neq 0$ погрешность состоит только из оценок $R_{x'x'}(\mu)$, $R_{\varepsilon'x'}(\mu)$, а при $\mu = 0$ к этой погрешности добавляется еще дисперсия помехи $R_{\varepsilon'\varepsilon'}(0)$ и

$$R_{x'x'}(\mu) \neq R_{g'g'}(\mu). \quad (5)$$

В этом случае не удастся извлечь ценную информацию, содержащуюся в характеристиках $R_{\varepsilon\varepsilon}(\mu)$, $R_{x'\varepsilon}(\mu)$, $R_{\varepsilon x'}(\mu)$, $r_{x\varepsilon}$ помехи $\varepsilon(t)$. Поэтому на практике во многих случаях оценки $R_{g'g'}(\mu)$ не обеспечивают адекватность результатов решаемых задач.

В настоящей работе рассматривается задача разработки и исследования алгоритмов и технологий мониторинга латентного периода перехода объекта в аварийные состояния по результатам вычисления взаимных корреляционных функций $R_{x'\varepsilon}(\mu)$, $R_{\varepsilon x'}(\mu)$ и коэффициента корреляции $r_{x\varepsilon}$ между полезным сигналом $x(t)$ и помехой $\varepsilon(t)$, которые невозможно извлечь из $g(t)$.

Алгоритмы вычисления коэффициента корреляции и корреляционной функции между полезным сигналом и помехой

В системах контроля и мониторинга для адекватной интерпретации результатов обработки зашумленных сигналов и выявления раннего периода возникновения неисправностей целесообразно вычислять оценки взаимных корреляционных функций $R_{x'\varepsilon}(\mu)$, $R_{\varepsilon x'}(\mu)$ и коэффициента корреляции $r_{x\varepsilon}$ между полезным сигналом $x(t)$ и помехой $\varepsilon(t)$ зашумленного сигнала $g(t)$.

Трудности решения этой задачи связаны с тем, что суммарная помеха $\varepsilon(t)$ формируется из помех $\varepsilon_1(t)$ и $\varepsilon_2(t)$, где $\varepsilon_1(t)$ возникает в результате влияния внешних факторов, а $\varepsilon_2(t)$ — в процессе эксплуатации объектов, и при этом имеют место следующие условия [1, 15–20]:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x'(i\Delta t) \varepsilon_1(i\Delta t) = 0; \quad (6)$$

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x'(i\Delta t) \varepsilon_2(i\Delta t) \neq 0; \quad (7)$$

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t) \varepsilon_2(i\Delta t) \neq 0. \quad (8)$$

Традиционная технология вычисления оценок автокорреляционных и взаимных корреляционных функций входных-выходных сигналов объектов контроля осуществляется по выражениям

$$R_{x'x'}(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x'(i\Delta t) x'((i + \mu)\Delta t), \quad (9)$$

где $R_{x'x'}(\mu)$ — оценки автокорреляционной функции $x(t)$.

Однако вычислить оценки корреляционной функции полезного сигнала $x(t)$, зашумленного помехой $\varepsilon(t)$, по выражению (9) невозможно, поскольку отчеты реального сигнала $g(i\Delta t)$ представляют собой сумму отчетов полезного сигнала $x(i\Delta t)$ и помехи $\varepsilon(i\Delta t)$:

$$g(i\Delta t) = x(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t). \quad (10)$$

С учетом (10) формула (9) принимает вид

$$R_{g'g'}(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g'(i\Delta t) g'((i + \mu)\Delta t), \quad (11)$$

и данная оценка при выполнении условий (7), (8) имеет погрешность

$$\lambda_{gg}(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x'(i\Delta t) \varepsilon'((i + \mu)\Delta t) + \varepsilon'(i\Delta t) x'((i + \mu)\Delta t) + \varepsilon'(i\Delta t) \varepsilon'((i + \mu)\Delta t)). \quad (12)$$

В связи с этим на практике во многих случаях не удастся обеспечить адекватность результатов решаемых задач. Для улучшения достоверности и адекватности результатов анализа зашумленных сигналов необходимо разработать алгоритмы и технологии определения оценок дисперсии помехи $R_{\varepsilon\varepsilon}(0)$ и взаимных корреляционных функций $R_{x'\varepsilon}(\mu)$ и $R_{\varepsilon x'}(\mu)$.

Как известно [1, 15–20], формулу вычисления погрешности дисперсии D_ε от суммарной помехи можно представить следующим образом:

$$D_\varepsilon = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [g'^2(i\Delta t) - 2g'(i\Delta t)g'((i + 1)\Delta t) + g'(i\Delta t)g'((i + 2)\Delta t)]. \quad (13)$$

Справедливость данного выражения можно проверить путем разложения его правой части на соответствующие слагаемые, т. е.

$$\begin{aligned} D_\varepsilon = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [g'^2(i\Delta t) - 2g'(i\Delta t)g'((i + 1)\Delta t) + \\ + g'(i\Delta t)g'((i + 2)\Delta t)] = R_{x'x'}(0) + R_{x'\varepsilon}(0) + \\ + R_{\varepsilon x'}(0) + R_{\varepsilon\varepsilon}(0) - 2R_{x'x'}(\Delta t) - 2R_{x'\varepsilon}(\Delta t) - \\ - 2R_{\varepsilon x'}(\Delta t) - 2R_{\varepsilon\varepsilon}(\Delta t) + R_{x'x'}(2\Delta t) + \\ + R_{x'\varepsilon}(2\Delta t) + R_{\varepsilon x'}(2\Delta t) + R_{\varepsilon\varepsilon}(2\Delta t). \end{aligned} \quad (14)$$

Для реальных инерционных технологических объектов практически всегда между разностями оценок $R_{x'x'}(0) - R_{x'x'}(\Delta t)$, $R_{x'x'}(\Delta t) - R_{x'x'}(2\Delta t)$ имеет место приближенное равенство

$$R_{x'x'}(0) - R_{x'x'}(\Delta t) \approx R_{x'x'}(\Delta t) - R_{x'x'}(2\Delta t),$$

согласно которому можно считать справедливым приближенное равенство

$$R_{x'x'}(0) + R_{x'x'}(2\Delta t) - 2R_{x'x'}(\Delta t) \approx 0.$$

Приближенная оценка $R_{\varepsilon'\varepsilon'}(\mu)$ при $\mu \neq 0$ для инерционных объектов также равна нулю:

$$R_{\varepsilon'\varepsilon'}(\mu) \approx 0.$$

В результате для стационарных нормально распределенных зашумленных сигналов с учетом условий (6)–(8) имеем:

$$\begin{aligned} R_{x'\varepsilon'}(0) &\neq 0, R_{\varepsilon'x'}(0) \neq 0, R_{\varepsilon'\varepsilon'}(0) \neq 0; \\ R_{x'x'}(0) + R_{x'x'}(2\Delta t) - 2R_{x'x'}(\Delta t) &\approx 0; \\ R_{\varepsilon'\varepsilon'}(\Delta t) &\approx 0, R_{\varepsilon'\varepsilon'}(2\Delta t) \approx 0; \\ R_{x'\varepsilon'}(\Delta t) &\approx 0, R_{x'\varepsilon'}(2\Delta t) \approx 0; \\ R_{\varepsilon'x'}(\Delta t) &\approx 0, R_{\varepsilon'x'}(2\Delta t) \approx 0 \end{aligned} \quad (15)$$

и в правой части выражения (14) получим оценку погрешности дисперсии от суммарной помехи, совпадающую с (4):

$$\begin{aligned} D_\varepsilon &= R_{x'\varepsilon'}(0) + R_{\varepsilon'x'}(0) + R_{\varepsilon'\varepsilon'}(0) = \\ &= 2R_{x'\varepsilon'}(0) + R_{\varepsilon'\varepsilon'}(0). \end{aligned} \quad (16)$$

Отсюда очевидна важность определения оценки взаимной корреляционной функции $R_{x'\varepsilon'}(0)$ между сигналами $x(t)$ и $\varepsilon(t)$.

Характер взаимосвязи между помехой и полезным сигналом четко отражается на оценках корреляционной функции $R_{g'g'}(\mu)$ между центрированными $g'(t)$ и нецентрированными $g(t)$ зашумленными сигналами:

$$R_{g'g'}(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g'(i\Delta t)g((i+\mu)\Delta t). \quad (17)$$

С помощью формулы (17) можно определить оценки $R_{x'\varepsilon'}(\mu)$.

Обозначим $N^{++}(\mu)$ — число положительных произведений $(g'(i\Delta t))^+g((i+\mu)\Delta t)$ центрированных положительных отсчетов $(g'(i\Delta t))^+$ на нецентрированные отсчеты $g((i+\mu)\Delta t)$ при временном сдвиге μ , а $N^{-+}(\mu)$ — число отрицательных произведений $(g'(i\Delta t))^-g((i+\mu)\Delta t)$ центрированных отрицательных отсчетов $(g'(i\Delta t))^-$ на нецентрированные отсчеты $g((i+\mu)\Delta t)$ при временном сдвиге μ , $N^{++}(\mu) + N^{-+}(\mu) = N$. Для положительных произведений $(g'(i\Delta t))^+g((i+\mu)\Delta t)$ примем индексы суммирования $i = i_{1^{++}(\mu)}, i_{2^{++}(\mu)}, \dots, i_{N^{++}(\mu)}$, а для отрицательных произведений $(g'(i\Delta t))^-g((i+\mu)\Delta t)$ — индексы суммирования $i = i_{1^{-+}(\mu)}, i_{2^{-+}(\mu)}, \dots, i_{N^{-+}(\mu)}$.

Учитывая, что при любом μ значение корреляционной функции не может превышать начальное значение, а конечное значение равно квадрату среднего значения, то очевидно, что между суммами положительных и отрицательных произведений имеют место неравенства

$$R_{(g')^+g}(\mu) > R_{(g')^-g}(\mu), \quad (18)$$

где

$$\begin{aligned} R_{(g')^+g}(\mu) &= \frac{1}{N} \sum_{i=i_{1^{++}(\mu)}}^{i_{N^{++}(\mu)}} (g'(i\Delta t))^+g((i+\mu)\Delta t), \\ R_{(g')^-g}(\mu) &= \frac{1}{N} \sum_{i=i_{1^{-+}(\mu)}}^{i_{N^{-+}(\mu)}} (g'(i\Delta t))^-g((i+\mu)\Delta t). \end{aligned}$$

Вычислительные эксперименты показали, что при умножении отсчетов центрированного сигнала $g'(i\Delta t)$ на их нецентрированные $g(i\Delta t)$ отсчеты имеет место неравенство

$$\begin{aligned} \frac{1}{N} \sum_{i=i_{1^{++}(\mu)}}^{i_{N^{++}(\mu)}} (g'(i\Delta t))^+g((i+\mu)\Delta t) &\neq \\ &\neq \frac{1}{N} \sum_{i=i_{1^{-+}(\mu)}}^{i_{N^{-+}(\mu)}} (g'(i\Delta t))^-g((i+\mu)\Delta t). \end{aligned} \quad (19)$$

При этом разность суммы положительных и отрицательных произведений при $\mu = 0$ значительно больше нуля, т. е.

$$\begin{aligned} \frac{1}{N} \sum_{i=i_{1^{++}(\mu)}}^{i_{N^{++}(\mu)}} (g'(i\Delta t))^+g((i+\mu)\Delta t) - \\ - \frac{1}{N} \sum_{i=i_{1^{-+}(\mu)}}^{i_{N^{-+}(\mu)}} (g'(i\Delta t))^-g((i+\mu)\Delta t) \gg 0. \end{aligned}$$

Очевидно, что корреляция между $x(t)$ и $\varepsilon(t)$ ярко отражается на оценке $R_{(g')^+g}(\mu)$, так как имеет место неравенство

$$\begin{aligned} \frac{1}{N} \sum_{i=i_{1^{++}(\mu)}}^{i_{N^{++}(\mu)}} (g'(i\Delta t))^+g((i+\mu)\Delta t) &\gg \\ &\gg \frac{1}{N} \sum_{i=i_{1^{-+}(\mu)}}^{i_{N^{-+}(\mu)}} (g'(i\Delta t))^-g((i+\mu)\Delta t). \end{aligned} \quad (20)$$

Как известно [1], с увеличением временного сдвига $\mu\Delta t$ между $g'(i\Delta t)$ и $g((i+\mu)\Delta t)$ при до-

стижении определенного значения суммы положительных и отрицательных произведений будут приблизительно равны

$$\begin{aligned} \frac{1}{N} \sum_{i=i_{1^{++}(\mu)}}^{i_{N^{++}(\mu)}} (g'(i\Delta t))^+ g((i+\mu)\Delta t) &\approx \\ \approx \frac{1}{N} \sum_{i=i_{1^{-+}(\mu)}}^{i_{N^{-+}(\mu)}} (g'(i\Delta t))^- g((i+\mu)\Delta t); \\ \frac{1}{N} \sum_{i=i_{1^{++}(\mu)}}^{i_{N^{++}(\mu)}} (g'(i\Delta t))^+ g((i+\mu)\Delta t) - \\ - \frac{1}{N} \sum_{i=i_{1^{-+}(\mu)}}^{i_{N^{-+}(\mu)}} (g'(i\Delta t))^- g((i+\mu)\Delta t) &\approx 0. \end{aligned} \quad (21)$$

Анализ специфики приближенного равенства (21) показывает, что его выполнение можно принимать как информативный признак о выполнении условий стационарности, нормальности закона распределения и отсутствии корреляции между сигналами $x(t)$ и $\varepsilon(t)$.

Однако при зарождении помехи $\varepsilon_2(t)$ согласно условиям (6)—(8) между суммарной помехой $\varepsilon(t)$ и полезным сигналом $x(t)$ возникает корреляция вида

$$\begin{aligned} R_{x'\varepsilon}(0) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x'(i\Delta t) \varepsilon(i\Delta t) \neq 0; \\ R_{\varepsilon'x}(0) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon'(i\Delta t) x(i\Delta t) \neq 0; \\ R_{x'\varepsilon}(0) &= R_{\varepsilon'x}(0) = R_{x\varepsilon}(0). \end{aligned}$$

В результате, начиная с момента возникновения корреляции между $x(t)$ и $\varepsilon(t)$, от умножения отсчетов анализируемого сигнала на коэффициент корреляции $r_{x\varepsilon}$ увеличиваются суммы как положительных, так и отрицательных произведений

$$\begin{aligned} R_{(g')^+g}(\mu) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=i_{1^{++}(\mu)}}^{i_{N^{++}(\mu)}} (x'(i\Delta t))^+ x((i+\mu)\Delta t) + \\ + \frac{1}{N} \sum_{i=i_{1^{++}(\mu)}}^{i_{N^{++}(\mu)}} (\varepsilon'(i\Delta t))^+ x((i+\mu)\Delta t) + \\ + \frac{1}{N} \sum_{i=i_{1^{++}(\mu)}}^{i_{N^{++}(\mu)}} (x'(i\Delta t))^+ \varepsilon((i+\mu)\Delta t) + \\ + \frac{1}{N} \sum_{i=i_{1^{++}(\mu)}}^{i_{N^{++}(\mu)}} (\varepsilon'(i\Delta t))^+ \varepsilon((i+\mu)\Delta t); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{(g')^-g}(\mu) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=i_{1^{-+}(\mu)}}^{i_{N^{-+}(\mu)}} (x'(i\Delta t))^- x((i+\mu)\Delta t) + \\ + \frac{1}{N} \sum_{i=i_{1^{-+}(\mu)}}^{i_{N^{-+}(\mu)}} (\varepsilon'(i\Delta t))^- x((i+\mu)\Delta t) + \\ + \frac{1}{N} \sum_{i=i_{1^{-+}(\mu)}}^{i_{N^{-+}(\mu)}} (x'(i\Delta t))^- \varepsilon((i+\mu)\Delta t) + \\ + \frac{1}{N} \sum_{i=i_{1^{-+}(\mu)}}^{i_{N^{-+}(\mu)}} (\varepsilon'(i\Delta t))^- \varepsilon((i+\mu)\Delta t) \end{aligned} \quad (22)$$

на величины

$$\begin{aligned} \frac{1}{N} \sum_{i=i_{1^{++}(\mu)}}^{i_{N^{++}(\mu)}} (\varepsilon'(i\Delta t))^+ x((i+\mu)\Delta t) + \\ + \frac{1}{N} \sum_{i=i_{1^{++}(\mu)}}^{i_{N^{++}(\mu)}} (x'(i\Delta t))^+ \varepsilon((i+\mu)\Delta t); \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{N} \sum_{i=i_{1^{-+}(\mu)}}^{i_{N^{-+}(\mu)}} (\varepsilon'(i\Delta t))^- x((i+\mu)\Delta t) + \\ + \frac{1}{N} \sum_{i=i_{1^{-+}(\mu)}}^{i_{N^{-+}(\mu)}} (x'(i\Delta t))^- \varepsilon((i+\mu)\Delta t) \end{aligned} \quad (24)$$

соответственно.

Ясно, что в зависимости от степени корреляции $r_{x\varepsilon}$ между $x(t)$ и $\varepsilon(t)$ в оценках, полученных по выражениям (22)—(24), будут увеличиваться как сумма положительных, так и сумма отрицательных произведений.

На практике в системах контроля в большинстве случаев возникает необходимость определения оценки коэффициента корреляции между $x(t)$ и $\varepsilon(t)$ в текущий момент времени. Для решения этой задачи можно использовать оценки взаимной корреляционной функции $R_{x'\varepsilon}(\mu)$, полученные при временном сдвиге, когда $N^{++}(\mu)$ и $N^{-+}(\mu)$ приблизительно равны:

$$\begin{aligned} N^{++}(\mu) &\approx N^{-+}(\mu), \\ R_{(X')^+\varepsilon}(\mu) &\approx R_{(X')^-\varepsilon}(\mu), \quad r_{X\varepsilon} \approx 0. \end{aligned}$$

Однако наличие разности

$$\begin{aligned} R_{(X')^+\varepsilon}(\mu) &\neq R_{(X')^-\varepsilon}(\mu), \\ R_{(X')^+\varepsilon}(\mu) - R_{(X')^-\varepsilon}(\mu) &> 0 \end{aligned}$$

свидетельствует об отличии коэффициента корреляции $r_{x\varepsilon}$ от нуля.

Очевидно, что при положительной корреляции между $x(t)$ и $\varepsilon(t)$ сумма положительных произведений $(g'(i\Delta t))^+ g((i + \mu)\Delta t)$ будет больше, чем сумма отрицательных произведений $(g'(i\Delta t))^- g((i + \mu)\Delta t)$ и наоборот. Следовательно, в общем случае, для определения оценки коэффициента корреляции можно использовать формулу

$$r_{X\varepsilon}^* \approx \begin{cases} \frac{R_{(g')^+g}(0) - R_{(g')^-g}(0)}{R_{(g')^+g}(0)} & \text{при } R_{(g')^-g}(0) > R_{(g')^+g}(0); \\ \frac{R_{(g')^+g}(0) - R_{(g')^-g}(0)}{R_{(g')^-g}(0)} & \text{при } R_{(g')^+g}(0) > R_{(g')^-g}(0). \end{cases} \quad (25)$$

Оценку взаимной корреляционной функции между полезным сигналом $x(t)$ и помехой $\varepsilon(t)$ можно определить по формуле

$$R_{X\varepsilon}(0) = r_{X\varepsilon} \sigma_x \sigma_\varepsilon,$$

где $\sigma_x, \sigma_\varepsilon$ — средние квадратические отклонения сигналов $x(t), \varepsilon(t)$.

Тогда среднее квадратическое отклонение помехи $\varepsilon(t)$ можно вычислить, используя формулу дисперсии суммарной помехи D_ε (13):

$$\sigma_\varepsilon^* \approx \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [g^2(i\Delta t) - 2g(i\Delta t)g((i+1)\Delta t) + g(i\Delta t)g((i+2)\Delta t)]}. \quad (26)$$

Учитывая выражения (1) и (14), можно вычислить среднее квадратическое отклонение полезной составляющей $x(t)$:

$$\sigma_x^* \approx \sqrt{D_g - D_\varepsilon}. \quad (27)$$

Принимая во внимание (25)—(27), получаем следующее выражение для вычисления взаимной корреляционной функции между полезным сигналом $x(t)$, и помехой $\varepsilon(t)$:

$$R_{X'\varepsilon'}^*(0) \approx \begin{cases} \frac{R_{(g')^+g}(0) - R_{(g')^-g}(0)}{R_{(g')^+g}(0)} \sigma_x^* \sigma_\varepsilon^* & \text{при } R_{(g')^-g}(0) > R_{(g')^+g}(0); \\ \frac{R_{(g')^+g}(0) - R_{(g')^-g}(0)}{R_{(g')^-g}(0)} \sigma_x^* \sigma_\varepsilon^* & \text{при } R_{(g')^+g}(0) > R_{(g')^-g}(0). \end{cases} \quad (28)$$

Проведенный экспериментальный анализ показал, что в системах момент возникновения корреляции между полезным сигналом и помехой можно контролировать в реальном масштабе времени. Для этого, если допустить, что оценка погрешности дисперсии D_ε суммарной помехи $\varepsilon(t)$ до появления корреляции является стабильной величиной и меняется только при появлении корреляции, то разность оценок D_{ε_1} и D_{ε_2} до и после нарушения выполнения условий (6)—(8) можно принять как аналог оценки $R_{X\varepsilon}^*(0)$, т. е.

$$R_{X\varepsilon}^*(0) \approx D_{\varepsilon_2} - D_{\varepsilon_1}. \quad (29)$$

Здесь оценки D_{ε_1} и D_{ε_2} определяются по формуле (13). При нормальном техническом состоянии объекта контроля, когда коэффициент корреляции равен нулю, $D_{\varepsilon_1} = D_\varepsilon$. В момент возникновения корреляции разность (29) будет представлять собой оценку взаимной корреляционной функции между полезным сигналом и помехой.

Технологии проведения вычислительных экспериментов и результаты сравнительного анализа

Для проверки достоверности алгоритмов вычисления коэффициента корреляции и корреляционной функции между полезным сигналом $x(t)$ и помехой $\varepsilon(t)$ зашумленного сигнала $g(t)$ были проведены вычислительные эксперименты в среде компьютерной математики MATLAB.

Сначала сформируем полезный сигнал $x(t)$ в виде стационарного случайного процесса в виде линейной комбинации гармонических колебаний со случайной амплитудой и начальной фазой φ вида [15—20]

$$x(t) = 20 \sin \left(\pi \frac{(1,5k)^n}{T} + \varphi \right) + 200,$$

где $k = 0, 1, \dots, K$, $K = 2598$, $n = 1,5$; $T = 1800$ — период сигнала.

Начальная фаза φ имеет равномерное распределение вероятностей и задана в виде функции $\text{rand}[\text{size}(k)] \pi/3$; формирующий вектор соразмерен с вектором k , причем элементы вектора принимают случайные значения, распределенные по равномерному закону в интервале $(0, 1)$. Допускается, что полезный сигнал — стационарный эргодический процесс.

С помощью генератора случайных чисел сформируем нормально распределенную помеху $\varepsilon(t)$ с заданным значением среднего квадратического отклонения $\sigma_\varepsilon = 7$ и нулевым математическим ожиданием $m_\varepsilon = 0$. Коэффициент корреляции между полезным сигналом $x(t)$ и помехой $\varepsilon(t)$ составляет $r_{x\varepsilon} = 0,1738$. Далее сформируем зашумленный сигнал $g(t) = x(t) + \varepsilon(t)$.

Суть экспериментов сводится к вычислению коэффициента корреляции $r_{x\varepsilon}^*$ и взаимной корреляционной функции $R_{x\varepsilon}^*(0)$ между полезным сигналом $x(t)$ и помехой $\varepsilon(t)$ по разработанным алгоритмам (23)–(28). Полученные значения $r_{x\varepsilon}^*$ и $R_{x\varepsilon}^*(0)$ сравниваем со значениями $r_{x\varepsilon}$ и $R_{x\varepsilon}(0)$, которые вычислены по традиционным алгоритмам с использованием сгенерированных дискретных значений полезного сигнала $x(i\Delta t)$ и помехи $\varepsilon(i\Delta t)$. Для проведения сравнительного анализа определим значения относительных погрешностей:

$$\Delta r_{x\varepsilon} = \left| r_{x\varepsilon} - r_{x\varepsilon}^* \right| / r_{x\varepsilon} \cdot 100 \%,$$

$$\Delta R_{x'\varepsilon'}(0) = \left| R_{x'\varepsilon'}(0) - R_{x'\varepsilon'}^*(0) \right| / R_{x'\varepsilon'}(0) \cdot 100 \%.$$

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1) сумма положительных произведений больше, чем отрицательных:

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N^{++}} g^+(i\Delta t) g'(i\Delta t) > \left| \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N^{-+}} g^-(i\Delta t) g'(i\Delta t) \right|$$

и составляет $1392,6 > |1148,9|$;

2) число N^{++} положительных произведений больше числа N^{-+} отрицательных произведений: $N^{++} > N^{-+}$ и составляет $6750 > 6240$;

3) взаимная корреляционная функция, вычисленная по формуле (17), равна $R_{g\varepsilon}(0) = 275,5$;

4) положительные произведения, вычисленные по формуле (20), равны $R_{(g')^+g}(0) = 1392,6$;

5) вычисленная по формуле (25) оценка коэффициента корреляции $r_{x\varepsilon}^* = 0,17087$ и заданная оценка $r_{x\varepsilon} = 0,17382$ практически совпадают, и значение относительной погрешности составляет $\Delta r_{x\varepsilon} = 1,6975 \%$;

6) вычисленная по формуле (28) оценка корреляционной функции $R_{x'\varepsilon'}^*(0) = 19,58$ и заданная оценка $R_{x'\varepsilon'}(0) = 19,205$ практически совпадают, и значение относительной погрешности составляет $\Delta R_{x'\varepsilon'}(0) = 1,954 \%$.

Несмотря на то, что современные измерительные устройства обладают высокой надежностью и точностью измерения, не всегда удается обеспечить адекватность результатов задач, решаемых в системах мониторинга и контроля. Это обусловлено отсутствием алгоритмов и технологий, позволяющих извлечь из зашумленных сигналов как можно больше ценной информации в результате вычисления характеристик помехи, полезной составляющей и их взаимосвязи.

Предлагаемая в работе технология определения оценок взаимной корреляционной функции и коэффициента корреляции между полезным сигналом и помехой путем анализа взаимосвязи между центрированным и нецентрированным сигналами позволяет извлечь дополнительную полезную информацию из зашумленных сигналов. Благодаря этому открывается возможность формирования важных информативных признаков, повышающих степень достоверности и надежности функционирования современных информационных систем.

Список литературы

1. Aliev T. A. Noise control of the Beginning and Development Dynamics of Accidents. Springer, 2019. 201 p. DOI:10.1007/978-3-030-12512-7
2. Сандомирский С. Г. Влияние точности измерения и диапазона изменения физической величины на коэффициент корреляции между ее истинными значениями и результатами измерений // Измерительная техника. 2014. № 10. С. 13–17.
3. Сандомирский С. Г. Зависимость коэффициента корреляции между результатами измерения параметра и его истинными значениями от приведенной погрешности измерения // Приборы и методы измерений. 2019. Т. 10, № 1. С. 90–98.
4. Chen X., Wang M., Zhang Yu., Feng Y., Wu Z., Huang N. E. Detecting Signals from Data with Noise: Theory and Applications // Journal of the Atmospheric Sciences. 2013. Vol. 70, Iss. 5. P. 1489–1504.
5. Altankhuyag Y., Hardt W. Noise Signal Analysis for Fault Detection // Energy Research. 2017. Vol. 1, Iss. 1. P. 47–59.
6. Taffin F., Mokrani K. Real time automatic detection of bearing fault in induction machine using kurtogram analysis // The Journal of the Acoustical Society of America. 2012. Vol. 132, N. 5. EL405-10.
7. Konold C., Pollatsek A. Data Analysis as the Search for Signals in Noisy Processes // Journal for Research in Mathematics Education. 2002. Vol. 33, N. 4. P. 259–289.
8. Delgado-Arredondo A. P., Morinigo-Sotelo D., Osornio-Rios R. A., Avina-Cervantes J. G., Rostro-Gonzalez H., Romero-Troncoso R. de J. Methodology for fault detection in induction motors via sound and vibration signals // Mechanical Systems and Signal Processing. 2017. Vol. 83. P. 568–589.
9. Javorskyj I. N., Yuzefovych R. M., Dzeryn Yu. O., Semenov P. A. Properties of LSM-estimator of correlation function of

biperiodically correlated random processes // Journal of Automation and Information Sciences. 2020. Vol. 52, Iss. 6. P. 44–57.

10. Heel M., Schatz M., Orlova E. Correlation functions revisited // Ultramicroscopy. 1992. Vol. 46, Iss. 1–4. P. 307–316.

11. Schulz-Du B. E. O., Rehberg I. Structure function in lieu of correlation function // Applied Physics A. 1981. Iss. 24. P. 323–329.

12. Asma F. Damage detection by updating using correlation functions // Scientific Bulletin-University Politehnica of Bucharest, Series D: Mechanical Engineering. 2011. Vol. 73, N. 1. P. 31–42.

13. Pinghe N., Yong X., Siu-Seong L., Zhu S. Structural Damage Detection Using Auto / Cross-Correlation Functions Under Multiple Unknown Excitations // International Journal of Structural Stability and Dynamics. 2014. Vol. 14, N. 05. P. 1440006.

14. Bendat J. S., Piersol A. G. Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis. N. Y.: Wiley, 1993. 458 p.

15. Aliev T. A., Musaeva N. F., Suleymanova M. T., Gazizade B. I. Analytic representation of the density function of normal distribution of noise // Journal of Automation and Information Sciences. 2015. Vol. 47(8), N. 4. P. 24–40.

16. Aliev T. A., Musaeva N. F., Gazizade B. I. Algorithms for calculating high-order moments of the noise of noisy signals

// Journal of Automation and Information Sciences. 2018. Vol. 50, N. 6. P. 1–13.

17. Aliev T. A., Musaeva N. F., Suleymanova M. T. Algorithms for Indicating the Beginning of Accidents Based on the Estimate of the Density Distribution Function of the Noise of Technological Parameters // Automatic Control and Computer Science. 2018. Vol. 52, Iss. 3. P. 231–242.

18. Aliev T. A., Musaeva N. F. Technologies for Early Monitoring of Technical Objects Using the Estimates of Noise Distribution Density // Journal of Automation and Information Sciences. 2019. Vol. 51, N. 9. P. 12–23.

19. Aliyev T. A., Musaeva N. F., Rzayeva N. E., Mammadova A. I. Development of technologies for reducing the error of traditional algorithms of correlation analysis of noisy signals // Measurement Techniques, Springer. 2020. N. 6. P. 421–430.

20. Aliev T. A., Musaeva N. F., Rzayeva N. E., Mamedova A. I. Technologies for forming equivalent noises of noisy signals and their use // Journal of Automation and Information Sciences. 2020. Vol. 52, N. 5. P. 1–12.

Technologies for Analyzing and Calculating the Relationship between the Useful Component and the Noise of Noisy Signal in Monitoring Systems

T. A. Aliev^{1, 2}, telmancyber@gmail.com, N. F. Musaeva^{1, 2}, musanaila@gmail.com,

Q. A. Quluyev¹, lab1.5@isi.az, N. E. Rzayeva^{1, 2}, nikanel1@gmail.com,

¹Institute of Control Systems, Baku, AZ1141, Republic of Azerbaijan,

²Azerbaijan University of Architecture and Construction, Baku, AZ1073, Republic of Azerbaijan

Corresponding author: **Musaeva Naila F.**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Azerbaijan University of Architecture and Construction, Baku, AZ1073, Republic of Azerbaijan, e-mail: musanaila@gmail.com

Accepted on August 31, 2022

Abstract

The article is devoted to the development of algorithms for calculating the cross-correlation function and the correlation coefficient between the useful signal and the noise of a noisy signal. The authors analyze the factors influencing the adequacy of the results of solving the problems of monitoring, control, management, etc. It is noted that when processing noisy signals, algorithms and technologies for separate processing of the useful component and the noise should be used. It is shown that in the event of malfunctions, such an important condition as the absence of correlation between the useful signal and the noise is violated in monitoring and control systems. Therefore, the problem arises of calculating the cross-correlation function and the correlation coefficient between the useful signal and the total noise as well. Algorithms are proposed for calculating the estimates of the correlation coefficient and the correlation function between the useful signal and the noise of noisy signals. It is pointed out that the moment of occurrence of the correlation between the useful signal and the noise can be monitored in real time in information systems. It is shown that the estimate of the variance of the total noise before the appearance of the correlation is a stable value. When a correlation appears, the value of the variance of the total noise changes. The difference in the variance estimates is taken as an analogue of the estimate of the cross-correlation function between the useful signal and the noise at zero time shift. A technology for conducting computational experiments is proposed. Discrete values of the useful signal, noise and noisy signal are generated. The correlation coefficient and the cross-correlation function between the useful signal and the noise are calculated by the developed and traditional algorithms. A comparative analysis is carried out. It is shown that the proposed technologies for calculating the estimates of the cross-correlation function and the correlation coefficient between the useful signal and the noise, as well as the variance of the total noise, make it possible to extract additional important information from noisy signals. This opens up the opportunity to increase the efficiency of the analysis of noisy signals.

Keywords: useful signal, noise, noisy signal, samples, correlation function, correlation coefficient, monitoring system

For citation:

Aliev T. A., Musaeva N. F., Quluyev Q. A., Rzayeva N. E. Technologies for Analyzing and Calculating the Relationship between the Useful Component and the Noise of Noisy Signal in Monitoring Systems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 12, pp. 629–636.

DOI: 10.17587/mau.23.629-636

References

1. Aliev T. A. Noise control of the Beginning and Development Dynamics of Accidents, Springer, 2019, 201 p. DOI:10.1007/978-3-030-12512-7
2. Sandomirskii S. G. Influence of measurement accuracy and range of change of a physical quantity on the correlation coefficient between its true values and measurement results, *Measurement Techniques*, 2014, no. 10, pp. 13–17 (in Russian).
3. Sandomirskii S. G. Dependence of the Correlation Coefficient Between the Results of a Parameter Measurement and Its True Values on the Reduced Measurement Error, *Devices and Methods of Measurements*, 2019, vol. 10, no. 1, pp. 90–98 (in Russian).
4. Chen X., Wang M., Zhang Yu., Feng Y., Wu Z., Huang N. E. Detecting Signals from Data with Noise: Theory and Applications, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2013, vol. 70, iss. 5, pp. 1489–1504.
5. Altankhuyag Y., Hardt W. Noise Signal Analysis for Fault Detection, *Energy Research*, 2017, vol. 1, iss. 1, pp. 47–59.
6. Tafinine F., Mokrani K. Real time automatic detection of bearing fault in induction machine using kurtogram analysis, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2012, vol. 132, no. 5, EL405-10.
7. Konold C., Pollatsek A. Data Analysis as the Search for Signals in Noisy Processes, *Journal for Research in Mathematics Education*, 2002, vol. 33, no. 4, pp. 259–289.
8. Delgado-Arredondo A. P., Morinigo-Sotelo D., Osornio-Rios R. A., Avina-Cervantes J. G., Rostro-Gonzalez H., Romero-Troncoso R. de J. Methodology for fault detection in induction motors via sound and vibration signals, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, vol. 83, pp. 568–589.
9. Javorskyj I. N., Yuzefovych R. M., Dzeryn Yu. O., Semenov P. A. Properties of LSM-estimator of correlation function of biperiodically correlated random processes, *Journal of Automation and Information Sciences*, 2020, vol. 52, iss. 6, pp.44–57.
10. Heel M., Schatz M., Orlova E. Correlation functions revisited, *Ultramicroscopy*, 1992, vol. 46, iss.1–4, pp. 307–316.
11. Schulz-Du B. E. O., Rehberg I. Structure function in lieu of correlation function, *Applied Physics A*, 1981, iss. 24, pp. 323–329.
12. Asma F. Damage detection by updating using correlation functions, *Scientific Bulletin-University Politehnica of Bucharest, Series D: Mechanical Engineering*, 2011, vol. 73, no. 1, pp. 31–42.
13. Pinghe N., Yong X., Siu-Seong L., Zhu S. Structural Damage Detection Using Auto / Cross-Correlation Functions Under Multiple Unknown Excitations, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2014, vol. 14, no. 05, 1440006.
14. Bendat J. S., Piersol A. G. Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis, N. Y., Wiley, 1993, 458 p.
15. Aliev T. A., Musaeva N. F., Suleymanova M. T., Gazizade B. I. Analytic representation of the density function of normal distribution of noise, *Journal of Automation and Information Sciences*, 2015, vol. 47(8), no 4, pp. 24–40.
16. Aliev T. A., Musaeva N. F., Gazizade B. I. Algorithms for calculating high-order moments of the noise of noisy signals, *Journal of Automation and Information Sciences*, 2018, vol. 50, no. 6, pp. 1–13.
17. Aliev T. A., Musaeva N. F., Suleymanova M. T. Algorithms for Indicating the Beginning of Accidents Based on the Estimate of the Density Distribution Function of the Noise of Technological Parameters, *Automatic Control and Computer Science*, 2018, vol. 52, iss. 3, pp. 231–242.
18. Aliev T. A., Musaeva N. F. Technologies for Early Monitoring of Technical Objects Using the Estimates of Noise Distribution Density // *Journal of Automation and Information Sciences*. 2019, vol. 51, no. 9. P. 12–23.
19. Aliyev T. A., Musaeva N. F., Rzayeva N. E., Mammadova A. I. Development of technologies for reducing the error of traditional algorithms of correlation analysis of noisy signals, *Measurement Techniques*, Springer, 2020, no. 6, pp. 421–430.
20. Aliev T. A., Musaeva N. F., Rzayeva N. E., Mamedova A. I. Technologies for forming equivalent noises of noisy signals and their use, *Journal of Automation and Information Sciences*, 2020, vol. 52, no. 5, pp. 1–12.



21–24 марта 2023 г.

Юбилейная XXV конференция молодых ученых "НАВИГАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ"

г. Санкт-Петербург, Россия,
АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»



В формат конференции включаются обзорные лекции ведущих ученых в области теории и практики построения современных систем навигации и управления движением и доклады участников конференции.

Контактная информация:

Тел.: +7 (812) 499 82 10 +7 (812) 499 81 57
Факс: +7 (812) 232 33 76 E-mail: kmu@eprib.ru, kmu_elprib@mail.ru