

Технологии уменьшения погрешности традиционных алгоритмов корреляционного анализа зашумлённых сигналов

Т. А. Алиев^{1, 2}, Н. Ф. Мусаева², Н. Э. Рзаева², А. И. Мамедова¹

¹Институт систем управления национальной академии наук Азербайджана, Баку, Азербайджан, e-mail: telmancyber@gmail.com, anahaciyeva@gmail.com

²Азербайджанский архитектурно-строительный университет, Баку, Азербайджан, e-mail: musanaila@gmail.com, nikanel1@gmail.com

Проанализированы факторы, влияющие на погрешности оценок корреляционных функций зашумлённых сигналов при применении традиционных алгоритмов их вычисления. Показано, что суммарная помеха зашумлённого сигнала обусловлена влиянием внешних факторов и шумом, который возникает из-за различных дефектов в процессе эксплуатации объектов контроля. Для исключения погрешности результатов корреляционного анализа зашумлённых сигналов созданы алгоритмы и технологии определения оценок дисперсии помехи и взаимно корреляционных функций между полезным сигналом и помехой. Предложены технологии определения приближённых эквивалентных отсчётов помехи зашумлённых сигналов. Показано, что при использовании эквивалентных отсчётов помех можно получить результаты, идентичные результатам реальных отсчётов помех при корреляционном анализе зашумлённых сигналов. При выделении из зашумлённого сигнала эквивалентных отсчётов помехи определены эквивалентные отсчёты полезного сигнала. Эти отсчёты позволяют определить оценки, эквивалентные оценкам корреляционных функций полезного сигнала. Найдены оценки взаимно корреляционных функций между полезным сигналом и помехой. Исследования показали, что несмотря на существующие погрешности эквивалентных отсчётов, при достаточно длительном времени наблюдения можно значительно уменьшить погрешности традиционных технологий корреляционного анализа зашумлённых сигналов при эквивалентных отсчётах. Применение этих технологий можно использовать для коррекции погрешностей результатов анализа экспериментальных данных в информационно-измерительных комплексах и системах, что значительно улучшит их метрологические характеристики.

Ключевые слова: сигнал, помеха, зашумлённый сигнал, корреляционная функция, объект, диагностика, идентификация, оценка, погрешность, отсчёты помехи, эквивалентные отсчёты, полезный сигнал.

Введение. Большинство современных средств измерений используют аналого-цифровые преобразователи. Измеряемые величины в этом случае представлены в виде цифровых сигналов. Решение задачи уменьшения погрешности измерений, а также реализация косвенных измерений заставляют обращаться к области знаний, называемой цифровой обработкой сигналов. Таким образом, тема статьи является весьма актуальной.

При корреляционном анализе случайных сигналов $X(i\Delta t)$, где i – номер отсчёта, Δt – шаг дискретизации, определение оценок корреляционных функций $R_{xx}(\mu)$ вызывает на практике серьёзные трудности из-за зашумлённости помехами $\varepsilon(i\Delta t)$ [1–8]. Трудности возникают, так как реальные зашумлённые сигналы $g(i\Delta t)$, которые получают от датчиков, установленных на различных объектах, являются суммой полезных сигналов $X(i\Delta t)$ и помех $\varepsilon(i\Delta t)$:

$$g(i\Delta t) = X(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t),$$

где $g(i\Delta t)$, $X(i\Delta t)$, $\varepsilon(i\Delta t)$ – отсчёты центрированных дискретизированных сигналов $g(t)$ и $X(t)$ – зашумлённого и полезного соответственно, а также помехи $\varepsilon(t)$.

Поэтому при использовании традиционных алгоритмов определения оценок корреляционных функций $R_{gg}(\mu)$ зашумлённых сигналов

$$\begin{aligned} R_{gg}(\mu) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(i\Delta t)g[(i+\mu)\Delta t] = \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [X(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)][X[(i+\mu)\Delta t] + \varepsilon[(i+\mu)\Delta t]] \end{aligned}$$

возникают погрешности, которые можно определить следующим образом:

$$\begin{aligned} \lambda_{gg}(\mu) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [X(i\Delta t)\varepsilon[(i+\mu)\Delta t] + \\ &+ \varepsilon(i\Delta t)X[(i+\mu)\Delta t] + \varepsilon(i\Delta t)\varepsilon[(i+\mu)\Delta t]]. \end{aligned}$$

В результате между оценками корреляционных функций $R_{gg}(\mu)$, $R_{XX}(\mu)$ зашумлённого $g(i\Delta t)$ и полезного $X(i\Delta t)$ сигналов соответственно, имеет место неравенство [1–6]:

$$R_{XX}(\mu) \neq R_{gg}(\mu).$$

На практике часто не удаётся обеспечить адекватность результатов решения задач корреляционного анализа зашумлённых сигналов с применением традиционных технологий. В связи с этим необходимо создать алгоритмы и технологии устранения влияния указанных погрешностей на результат определения оценки $R_{gg}(\mu)$ корреляционных функций зашумлённых сигналов $g(i\Delta t)$.

Постановка задачи. В работах [1, 2] показано, что суммарная помеха $\varepsilon(i\Delta t)$ зашумлённого сигнала $g(i\Delta t)$ во многих случаях складывается из помехи $\varepsilon_1(i\Delta t)$, обусловленной влиянием внешних факторов, и шума $\varepsilon_2(i\Delta t)$, который возникает вследствие зарождения различных дефектов в процессе эксплуатации объектов контроля:

$$\varepsilon(i\Delta t) = \varepsilon_1(i\Delta t) + \varepsilon_2(i\Delta t).$$

Предположим, что $g(i\Delta t) = X(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)$ – дискретизированный стационарный случайный сигнал с нормальным законом распределения. Он состоит из полезного сигнала $X(i\Delta t)$ и помехи $\varepsilon(i\Delta t)$ с математическим ожиданием, равным нулю [7–10]. При этом формула вычисления оценки $R_{gg}(\mu=0)$, т. е. дисперсии зашумлённого сигнала, имеет вид

$$\begin{aligned} D_g \approx R_{gg}(0) &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g^2(i\Delta t) \approx \\ &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [X(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)][X(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)] \approx \\ &\approx R_{XX}(0) + 2R_{X\varepsilon}(0) + R_{\varepsilon\varepsilon}(0), \end{aligned} \quad (1)$$

где $R_{X\varepsilon}(0) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t)\varepsilon(i\Delta t)$ – взаимная корреляционная функция между полезным сигналом и помехой при $\mu=0$.

Следовательно, погрешность полученного результата составит

$$\lambda_{gg}(\mu=0) = 2R_{X\varepsilon}(0) + R_{\varepsilon\varepsilon}(0) = D_\varepsilon, \quad (2)$$

где $R_{\varepsilon\varepsilon}(0) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)\varepsilon(i\Delta t)$ – автокорреляционная функция помехи.

Формулу для вычисления оценки корреляционной функции $R_{gg}(\mu)$ при $\mu \neq 0$ можно представить в виде

$$\begin{aligned} R_{gg}(\mu) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(i\Delta t)g[(i+\mu)\Delta t] \approx \\ &\approx R_{XX}(\mu) + R_{X\varepsilon}(\mu) + R_{X\varepsilon}(\mu) + R_{\varepsilon\varepsilon}(\mu), \end{aligned} \quad (3)$$

где

$R_{XX}(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t)X[(i+\mu)\Delta t]$ – автокорреляционная функция полезного сигнала;

$R_{\varepsilon X}(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)X[(i+\mu)\Delta t]$ – взаимная корреляционная функция между помехой и полезным сигналом;

$R_{X\varepsilon}(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t)\varepsilon[(i+\mu)\Delta t]$ – взаимная корреляционная функция между полезным сигналом и помехой;

$R_{\varepsilon\varepsilon}(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)\varepsilon[(i+\mu)\Delta t]$ – автокорреляционная функция помехи.

Если принять во внимание равенства

$$R_{X\varepsilon}(\mu) = R_{\varepsilon X}(\mu); R_{\varepsilon\varepsilon}(\mu \neq 0) = 0,$$

то погрешность $\lambda_{gg}(\mu \neq 0)$ полученного результата составит

$$\lambda_{gg}(\mu \neq 0) = 2R_{X\varepsilon}(\mu). \quad (4)$$

Из выражений (1), (3), (4) следует, что погрешность оценок традиционных технологий корреляционного анализа зашумлённых сигналов будет

$$\lambda_{gg}(\mu) = \begin{cases} 2R_{X\varepsilon}(0) + R_{\varepsilon\varepsilon}(0) & \text{при } \mu = 0; \\ 2R_{X\varepsilon}(\mu) & \text{при } \mu \neq 0. \end{cases} \quad (5)$$

Следовательно, для исключения погрешности $\lambda_{gg}(\mu)$ из оценок $R_{gg}(\mu)$ результатов корреляционного анализа зашумлённых сигналов, полученных по традиционным технологиям, требуется создание алгоритмов и технологий определения оценки как дисперсии помехи D_ε , так и оценок взаимных корреляционных функций между полезным сигналом $X(i\Delta t)$ и помехой $\varepsilon(i\Delta t)$, т. е. $R_{X\varepsilon}(\Delta t)$, $R_{X\varepsilon}(2\Delta t)$, $R_{X\varepsilon}(3\Delta t)$ [1, 2].

Алгоритмы определения погрешностей результатов корреляционного анализа зашумлённых сигналов. Из равенств (2)–(5) следует, что для определения оценок корреляционной функции $R_{XX}(\mu)$ полезного сигнала $X(i\Delta t)$ требуется устранить погрешности традиционных алгоритмов корреляционного анализа зашумлённых сигналов.

В работах [1, 2] показано, что дисперсию помехи можно определить из выражения

$$\begin{aligned} D_\varepsilon \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{ &g^2(i\Delta t) - 2g(i\Delta t)g[(i+1)\Delta t] + \\ &+ g(i\Delta t)g[(i+2)\Delta t] \}. \end{aligned} \quad (6)$$

Справедливость выражения (6) можно проверить путём разложения правой части на соответствующие слагаемые:

$$\begin{aligned} D_\varepsilon \approx &R_{XX}(0) + R_{X\varepsilon}(0) + R_{\varepsilon X}(0) + R_{\varepsilon\varepsilon}(0) + \\ &+ R_{XX}(\Delta t) + R_{X\varepsilon}(\Delta t) + R_{\varepsilon X}(\Delta t) + R_{\varepsilon\varepsilon}(\Delta t) + \\ &+ R_{XX}(2\Delta t) + R_{X\varepsilon}(2\Delta t) + R_{\varepsilon X}(2\Delta t) + R_{\varepsilon\varepsilon}(2\Delta t). \end{aligned} \quad (7)$$

Если выполняются условия стационарности и нормальности закона распределения зашумлённых сигналов, то можно считать справедливыми следующие условия [11–18]:

$$\left. \begin{aligned} R_{X\varepsilon}(0) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t) \varepsilon(i\Delta t) \neq 0; \\ R_{\varepsilon X}(0) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t) X(i\Delta t) \neq 0; \\ R_{\varepsilon\varepsilon}(0) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t) \varepsilon(i\Delta t) \neq 0; \\ R_{XX}(0) + R_{XX}(2\Delta t) - 2R_{XX}(\Delta t) &\approx 0; \\ R_{\varepsilon\varepsilon}(\Delta t) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t) \varepsilon[(i+1)\Delta t] \approx 0; \\ R_{\varepsilon\varepsilon}(2\Delta t) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t) \varepsilon[(i+2)\Delta t] \approx 0; \\ R_{X\varepsilon}(\Delta t) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t) \varepsilon[(i+1)\Delta t] \approx 0; \\ R_{X\varepsilon}(2\Delta t) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t) \varepsilon[(i+2)\Delta t] \approx 0; \\ R_{\varepsilon X}(\Delta t) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t) X[(i+1)\Delta t] \approx 0; \\ R_{\varepsilon X}(2\Delta t) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t) X[(i+2)\Delta t]. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Если принять во внимание условия (8), то в правой части равенства (7) получим выражение

$$D_{\varepsilon} = R_{X\varepsilon}(0) + R_{\varepsilon X}(0) + R_{\varepsilon\varepsilon}(0) \approx 2R_{X\varepsilon}(0) + R_{\varepsilon\varepsilon}(0).$$

Таким образом, оценка дисперсии помехи D_{ε} , которая определяется по формуле (6), представляет собой погрешность оценки корреляционной функции $R_{gg}(\mu)$ при $\mu=0$. Следовательно, оценку $R_{XX}(\mu=0)$ корреляционной функции полезного сигнала $X(i\Delta t)$, зашумлённого помехой $\varepsilon(i\Delta t)$, можно определить по формуле

$$\begin{aligned} R_{XX}(\mu=0) &= R_{gg}(\mu=0) - D_{\varepsilon} = \\ &= R_{gg}(\mu=0) - [R_{\varepsilon\varepsilon}(\mu=0) + 2R_{X\varepsilon}(\mu=0)]. \end{aligned}$$

Из выражения (5) следует, что погрешность оценки $R_{gg}(\mu)$ при $\mu \neq 0$ представляет собой оценку взаимно-корреляционной функции $R_{X\varepsilon}(\mu)$ между полезным сигналом $X(i\Delta t)$ и помехой $\varepsilon(i\Delta t)$. Таким образом, для рассмотренного случая оценку корреляционной функции $R_{XX}(\mu)$ полезного сигнала $X(i\Delta t)$ при $\mu \neq 0$ можно представить в виде

$$R_{XX}(\mu\Delta t) = R_{gg}(\mu\Delta t) - 2R_{X\varepsilon}(\mu\Delta t).$$

Следовательно, для уменьшения погрешности корреляционного анализа зашумлённых сигналов при $\mu \neq 0$ необходимо определить оценку $R_{X\varepsilon}(\mu\Delta t)$.

В работе [1] показано, что формулу определения взаимно корреляционной функции между $X(i\Delta t)$ и $\varepsilon(i\Delta t)$ при $\mu \neq 0$ можно представить как

$$\begin{aligned} R'_{X\varepsilon}(\mu=\Delta t) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{g(i\Delta t)g[(i+1)\Delta t] - \\ &- 2g(i\Delta t)g[(i+2)\Delta t] + g(i\Delta t)g[(i+3)\Delta t]\}. \end{aligned}$$

При разложении правой части этого равенства получим

$$\begin{aligned} R'_{X\varepsilon}(\mu=\Delta t) &\approx R_{XX}(\Delta t) + R_{X\varepsilon}(\Delta t) + R_{\varepsilon X}(\Delta t) + R_{\varepsilon\varepsilon}(\Delta t) - \\ &- 2R_{XX}(2\Delta t) - 2R_{X\varepsilon}(2\Delta t) - 2R_{\varepsilon X}(2\Delta t) - 2R_{\varepsilon\varepsilon}(2\Delta t) + \\ &+ R_{XX}(3\Delta t) + R_{X\varepsilon}(3\Delta t) + R_{\varepsilon X}(3\Delta t) + R_{\varepsilon\varepsilon}(3\Delta t). \end{aligned}$$

При выполнении условий стационарности и нормальности закона распределения зашумлённых сигналов, корреляции между $X(i\Delta t)$ и $\varepsilon[(i+1)\Delta t]$, а также допустив справедливость отношений

$$R_{\varepsilon\varepsilon}(\Delta t) \approx 0; R_{X\varepsilon}(\Delta t) \neq 0; R_{\varepsilon X}(\Delta t) \neq 0;$$

$$R_{\varepsilon\varepsilon}(2\Delta t) \approx 0; R_{X\varepsilon}(2\Delta t) \approx 0; R_{\varepsilon X}(2\Delta t) \approx 0;$$

$$R_{\varepsilon\varepsilon}(3\Delta t) \approx 0; R_{X\varepsilon}(3\Delta t) \approx 0; R_{\varepsilon X}(3\Delta t) \approx 0;$$

$$R_{XX}(\Delta t) + R_{XX}(3\Delta t) - 2R_{XX}(2\Delta t) \approx 0,$$

получим равенство

$$R'_{X\varepsilon}(\Delta t) \approx R_{X\varepsilon}(\Delta t) + R_{\varepsilon X}(\Delta t) \approx 2R_{X\varepsilon}(\Delta t).$$

Следовательно, оценку взаимно-корреляционной функции $R_{X\varepsilon}(\Delta t)$ между полезным сигналом $X(i\Delta t)$ и помехой $\varepsilon(i\Delta t)$ при $\mu=\Delta t$ можно вычислить из выражения

$$R'_{X\varepsilon}(\Delta t) \approx \frac{R_{X\varepsilon}(\Delta t)}{2}. \quad (9)$$

Оценки $R_{X\varepsilon}(2\Delta t)$, $R_{X\varepsilon}(3\Delta t)$ при существовании корреляции между $X(i\Delta t)$, $\varepsilon(i\Delta t)$ при $\mu=2\Delta t$, $\mu=3\Delta t$ можно рассчитать аналогичным образом. Следовательно, при различных временных сдвигах $\mu=k\Delta t$, $k=1, 2, 3, \dots$, оценки $R_{X\varepsilon}(\mu)$ можно найти из выражения

$$\begin{aligned} R_{X\varepsilon}(\mu=k\Delta t) &\approx \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N \{g(i\Delta t)g[(i+k)\Delta t] - \\ &- 2g(i\Delta t)g[(i+k+1)\Delta t] + g(i\Delta t)g[(i+k+2)\Delta t]\}. \end{aligned} \quad (10)$$

Таким образом, существование алгоритмов и технологий определения оценок дисперсии D_{ε} помехи и взаимно-корреляционной функции между полезным сигналом и помехой $R_{X\varepsilon}(\mu)$ позволяет уменьшить погрешности традиционных алгоритмов вычисления оценок корреляционных функций.

Поэтому оценку корреляционной функции полезного сигнала $X(i\Delta t)$, зашумлённого помехой $\varepsilon(i\Delta t)$, можно определить следующим образом:

$$R_{XX}(\mu) \approx \begin{cases} R_{gg}(0) - [2R_{X\varepsilon}(0) + R_{\varepsilon\varepsilon}(0)] & \text{при } \mu = 0; \\ R_{gg}(\mu) - 2R_{X\varepsilon}(\mu) & \text{при } \mu \neq 0, \end{cases}$$

где оценки $R_{\varepsilon\varepsilon}(0)$, $R_{X\varepsilon}(\mu)$ вычисляются из выражений (6), (9), (10).

Алгоритмы уменьшения погрешностей результатов корреляционного анализа зашумлённых сигналов с помощью эквивалентных отсчётов помех этих сигналов. Проведённые авторами исследования показали, что уменьшить погрешности традиционных методов корреляционного анализа зашумлённых сигналов можно с помощью технологии определения эквивалентных отсчётов помехи $\varepsilon^e(i\Delta t)$ [1–6].

Рассмотрим возможность вычисления приближённых значений, неподдающихся непосредственному измерению, – отсчётов помехи $\varepsilon(i\Delta t)$ зашумлённых сигналов $g(i\Delta t)$. Анализ возможных вариантов решения этой задачи, проведённый в работах [1–6, 16–20], показал, что с помощью технологии вычисления оценки дисперсии D_ε помехи по выражению (6) вместо неподдающихся измерению отсчётов помехи $\varepsilon(i\Delta t)$ можно определить приближённые эквивалентные отсчёты $\varepsilon^e(i\Delta t)$. Для этого формулу (6) представим в виде

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

Введём обозначения:

$$\varepsilon'(i\Delta t) = g(i\Delta t) \{g(i\Delta t) + g[(i+2)\Delta t] - 2g[(i+1)\Delta t]\};$$

$$\text{sgn} \varepsilon'(i\Delta t) = \begin{cases} +1 & \text{при } \varepsilon'(i\Delta t) > 0; \\ 0 & \text{при } \varepsilon'(i\Delta t) = 0; \\ -1 & \text{при } \varepsilon'(i\Delta t) < 0. \end{cases}$$

Формулу вычисления эквивалентных отсчётов помехи $\varepsilon^e(i\Delta t)$ представим в виде

$$\begin{aligned} \varepsilon(i\Delta t) &\approx \varepsilon^e(i\Delta t) = \text{sgn} \varepsilon'(i\Delta t) \times \\ &\times \sqrt{g(i\Delta t) \{g(i\Delta t) + g[(i+2)\Delta t] - 2g[(i+1)\Delta t]\}} = \\ &= \text{sgn} \varepsilon'(i\Delta t) \sqrt{\varepsilon'(i\Delta t)}. \end{aligned} \quad (11)$$

Допустим справедливость выражения [1–3]:

$$\begin{aligned} D_\varepsilon &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon^2(i\Delta t) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon^{e2}(i\Delta t) = \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |g(i\Delta t) \{g(i\Delta t) + g[(i+2)\Delta t] - 2g[(i+1)\Delta t]\}|. \end{aligned} \quad (12)$$

Тогда формулу вычисления среднего значения отсчётов помехи $\varepsilon(i\Delta t)$ можно свести к вычислению среднего значения эквивалентных отсчётов помехи $\varepsilon^e(i\Delta t)$:

$$\bar{\varepsilon}(i\Delta t) \approx \bar{\varepsilon}^e(i\Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon^e(i\Delta t) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t).$$

Многочисленные эксперименты показали, что несмотря на возможные отклонения

$$\Delta \varepsilon(i\Delta t) = \varepsilon^e(i\Delta t) - \varepsilon(i\Delta t)$$

эквивалентных отсчётов $\varepsilon^e(i\Delta t)$ от истинных отсчётов $\varepsilon(i\Delta t)$, между оценками имеют место равенства

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon^{e2}(i\Delta t) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon^2(i\Delta t) &\approx 0; \\ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon^e(i\Delta t) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t) &\approx 0. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Равенства (11)–(13) и проведённые экспериментальные исследования показали, что с помощью эквивалентных отсчётов помехи $\varepsilon^e(i\Delta t)$ можно получить результаты, идентичные результатам корреляционного анализа тех же сигналов с известными реальными отсчётами помехи $\varepsilon(i\Delta t)$. Для этого по формуле

$$X^e(i\Delta t) \approx g(i\Delta t) - \varepsilon^e(i\Delta t) \approx g(i\Delta t) - \varepsilon(i\Delta t) = X(i\Delta t)$$

определим эквивалентные отсчёты $X^e(i\Delta t)$ полезного сигнала. При этом появляется возможность получить оценки $R_{X^e X^e}(\mu)$, которые равны оценкам корреляционных функций полезного сигнала $R_{XX}(\mu)$:

$$R_{XX}(\mu) \approx R_{X^e X^e}(\mu), \quad (14)$$

где $R_{X^e X^e}(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X^e(i\Delta t) X^e[(i+\mu)\Delta t]$ – автокорреляционная функция эквивалентных отсчётов полезного сигнала.

Выделив эквивалентные отсчёты помехи $\varepsilon^e(i\Delta t)$ из зашумлённого сигнала $g(i\Delta t)$, можно рассчитать по полученным эквивалентным значениям отсчётов полезного сигнала

$$X^e(i\Delta t) = g(i\Delta t) - \varepsilon^e(i\Delta t)$$

оценки $R_{X^e X^e}(\mu)$, $R_{X^e X^e}(0)$, эквивалентные оценкам корреляционных функций полезного сигнала $R_{XX}(\mu)$:

$$R_{XX}(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X^e(i\Delta t) X^e[(i+\mu)\Delta t]. \quad (15)$$

Определив эквивалентные отсчёты помехи $\varepsilon^e(i\Delta t)$ и полезного сигнала $X^e(i\Delta t)$, вычислим оценки взаимно-корреляционной функции между $X(i\Delta t)$, $\varepsilon(i\Delta t)$:

$$\begin{aligned} R_{X\varepsilon}(\mu) &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t) \varepsilon[(i+\mu)\Delta t] \approx \\ &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X^e(i\Delta t) \varepsilon^e[(i+\mu)\Delta t]. \end{aligned} \quad (16)$$

Следовательно, формулу нахождения оценки корреляционной функции полезного сигнала представим в виде

$$R_{X^e X^e}(\mu) \approx \begin{cases} R_{gg}(0) - [2R_{X^e \varepsilon^e}(0) + R_{\varepsilon^e \varepsilon^e}(0)] & \text{при } \mu=0; \\ R_{gg}(\mu) - 2R_{X^e \varepsilon^e}(\mu) & \text{при } \mu \neq 0. \end{cases} \quad (17)$$

Исследования также показали, что несмотря на определённые погрешности отсчётов $X^e(i\Delta t)$ по сравнению с отсчётами полезных сигналов $X(i\Delta t)$, при достаточной длительности времени T наблюдения выполняется равенство (13). Поэтому $R_{XX}(\mu) \approx R_{X^e X^e}(\mu)$, т. е. по выражениям (14)–(17), используя эквивалентные отсчёты помехи $\varepsilon^e(i\Delta t)$ и полезного сигнала $X^e(i\Delta t)$, можно значительно уменьшить погрешность традиционных технологий корреляционного анализа зашумлённых сигналов.

Результаты вычислительного эксперимента и сравнительного анализа. Приведём результаты вычислительных экспериментов уменьшения погрешностей результатов корреляционного анализа зашумлённых сигналов с помощью эквивалентных отсчётов их помех. Вычислительные эксперименты проведены с использованием MATLAB.

Сначала сформируем полезный сигнал $X(t)$. Из работы [3] известно, что любой стационарный случайный процесс $X(t)$ на бесконечном интервале T можно сколь угодно точно аппроксимировать линейной комбинацией гармонических колебаний со случайной амплитудой и фазой. Поэтому при проведении вычислительных экспериментов смоделируем полезный случайный сигнал в виде возмущённой гармонической дискретной функции с начальной фазой φ :

$$X(t) = 60 \sin \left(2\pi \frac{(0,5k)^n}{T} + \varphi \right) + 100,$$

где $k=0,1,\dots,K$, $K=2400$; $n=1,5$ – показатель степени; $T=200$ – период сигнала.

Начальная фаза φ имеет равномерное распределение вероятностей и задана в виде функции $\text{rand}[\text{size}(k)] \cdot \pi/3$, формирующей вектор, соразмерный с вектором k . Элементами

указанного вектора являются случайные значения, распределённые по равномерному закону в интервале $(0, 1)$. Допускается, что полезный сигнал – стационарный эргодический процесс и $X(t)$ – истинный полезный сигнал.

С помощью генератора случайных чисел сформируем нормально распределённую помеху $\varepsilon(t)$ с заданным значением среднего квадратического отклонения (СКО) $\sigma_\varepsilon = 30$ и нулевым математическим ожиданием $m_\varepsilon = 0$. Предполагается, что это и есть истинная помеха. Далее сформируем зашумлённый сигнал $g(t) = X(t) + \varepsilon(t)$.

После этого по выражению (11) вычислим эквивалентные отсчёты помех $\varepsilon^e(i\Delta t)$ и следующие характеристики:

$$\text{среднее значение } m_{\varepsilon^e} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon^e(i\Delta t);$$

$$\text{СКО } \sigma_{\varepsilon^e} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\varepsilon^e(i\Delta t) - m_{\varepsilon^e}]^2;$$

сумму квадратов отсчётов эквивалентной помехи

$$S_{\varepsilon^e} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\varepsilon^e(i\Delta t)]^2};$$

автокорреляционную функцию

$$R_{\varepsilon^e \varepsilon^e}(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\varepsilon^e(i\Delta t) - m_{\varepsilon^e}] [\varepsilon^e[(i+\mu)\Delta t] - m_{\varepsilon^e}].$$

Результаты вычисления автокорреляционной функции $R_{\varepsilon^e \varepsilon^e}(\mu)$ приведены в таблице, график функции представлен на рис. 1 (кривая 1).

Затем из выражения

$$X^e(i\Delta t) \approx g(i\Delta t) - \varepsilon^e(i\Delta t)$$

определим эквивалентные отсчёты $X^e(i\Delta t)$ полезного сигнала $X(t)$ и вычислим следующие параметры:

$$\text{среднее значение } m_{X^e} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X^e(i\Delta t);$$

$$\text{СКО } \sigma_{X^e} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [X^e(i\Delta t) - m_{X^e}]^2;$$

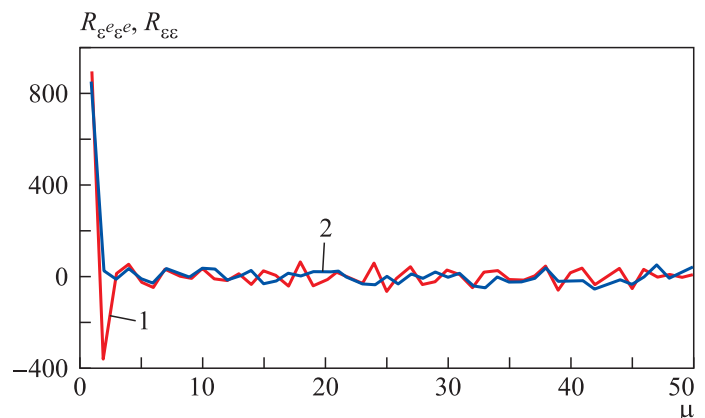


Рис. 1. Автокорреляционная функция эквивалентной (1) и сгенерированной (2) помех

Fig. 1. Autocorrelation function of equivalent (1) and the generated (2) noises

Автокорреляционные функции помех и полезных сигналов

i	$R_{\varepsilon\varepsilon}(\mu)$	$R_{\varepsilon^e\varepsilon^e}(\mu)$	$R_{XX}(\mu)$	$R_{X^eX^e}(\mu)$	$\Delta R_{XX}(\mu), \%$
1	849,920	892,270	1817,1	1855,10	2,0896
2	-11,011	10,272	1526,6	1579,70	3,4765
3	34,070	53,603	1368,6	1518	10,916
4	-8,9155	-20,327	1152	1144,80	0,63049
5	-30,541	-46,619	899,82	832,85	7,4433
6	34,019	31,662	620,29	590,87	4,7429
7	12,781	5,4964	332,25	412,43	24,134
8	-2,9757	-7,4765	47,246	30,745	34,925
9	36,687	34,601	-227,41	-208,54	8,2982
10	31,310	-10,233	-479,69	-463,49	3,3775

сумму квадратов отсчётов сгенерированной помехи

$$S_{\varepsilon} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\varepsilon(i\Delta t)]^2};$$

автокорреляционные функции

$$R_{\varepsilon\varepsilon}(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\varepsilon(i\Delta t) - m_{\varepsilon}] \{\varepsilon[(i+\mu)\Delta t] - m_{\varepsilon}\};$$

$$R_{XX}(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [X(i\Delta t) - m_X] \{X[(i+\mu)\Delta t] - m_X\}.$$

Результаты вычисления автокорреляционной функции $R_{\varepsilon\varepsilon}(\mu)$ приведены в таблице, график функции представлен на рис. 1 (кривая 2). Результаты вычисления автокорреляционной функции $R_{XX}(\mu)$ представлены в таблице, график функции показан на рис. 2 (кривая 2).

Проведём сравнительный анализ. Для этого определим относительные погрешности:

оценок СКО помехи $\varepsilon(t)$ и эквивалентной помехи $\varepsilon^e(t)$, а также полезного сигнала $X(t)$ и эквивалентного полезного сигнала $X^e(t)$:

$$\Delta\sigma_{\varepsilon} = \frac{|\sigma_{\varepsilon} - \sigma_{\varepsilon^e}|}{\sigma_{\varepsilon}} \cdot 100; \quad \Delta\sigma_X = \frac{|\sigma_X - \sigma_{X^e}|}{\sigma_X} \cdot 100;$$

оценок автокорреляционных функций полезного сигнала и помехи соответственно

$$\Delta R_{XX}(\mu) = \frac{|R_{XX}(\mu) - R_{X^eX^e}(\mu)|}{R_{XX}(\mu)} \cdot 100;$$

$$\Delta R_{\varepsilon\varepsilon}(\mu) = \frac{|R_{\varepsilon\varepsilon}(\mu) - R_{\varepsilon^e\varepsilon^e}(\mu)|}{R_{\varepsilon\varepsilon}(\mu)} \cdot 100;$$

оценок взаимно корреляционных функций между полезным сигналом и помехой

$$\Delta R_{X\varepsilon}(\mu) = \frac{|R_{X\varepsilon}(\mu) - R_{X^e\varepsilon^e}(\mu)|}{R_{X\varepsilon}(\mu)} \cdot 100;$$

$$\Delta R_{\varepsilon X}(\mu) = \frac{|R_{\varepsilon X}(\mu) - R_{\varepsilon^eX^e}(\mu)|}{R_{\varepsilon X}(\mu)} \cdot 100.$$

Результаты вычислений $\Delta R_{XX}(\mu)$ приведены в таблице.

После анализа результатов можно сделать следующие выводы.

1. Значения оценок средней помехи $\varepsilon(t)$ и эквивалентной помехи $\varepsilon^e(t)$, а также полезного сигнала $X(t)$ и эквивалентного полезного сигнала $X^e(t)$ составляют $m_{\varepsilon} = 0,40014$; $m_{\varepsilon^e} = 5,4363$; $m_X = 100,3$; $m_{X^e} = 95,269$; при этом относительная погрешность составила

$$\Delta m_X = \frac{|m_X - m_{X^e}|}{m_X} \cdot 100 = 5,016 \, \%.$$

2. Значения оценок СКО сгенерированной помехи $\varepsilon(t)$ и эквивалентной помехи $\varepsilon^e(t)$ составляют $\sigma_{\varepsilon} = 30,058$; $\sigma_{\varepsilon^e} = 30,077$; относительная погрешность составила $\Delta\sigma_{\varepsilon} = 0,061025 \, \%$; для полезного сигнала $X(t)$ и эквивалентного полезного сигнала $X^e(t)$ их значения соответствуют $\sigma_X = 42,749$; $\sigma_{X^e} = 43,071$; относительная погрешность составила $\Delta\sigma_X = 0,75278 \, \%$.

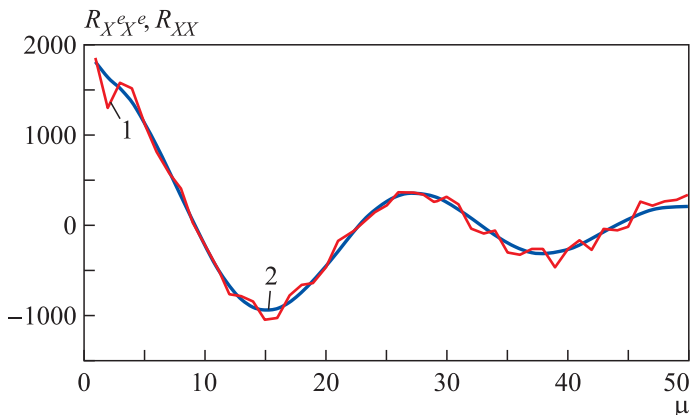


Рис. 2. Автокорреляционная функция эквивалентного (1) и сгенерированного (2) полезных сигналов

Fig. 2. Autocorrelation function of the equivalent (1) and the generated (2) useful signals

автокорреляционную функцию эквивалентного полезного сигнала

$$R_{X^eX^e}(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [X^e(i\Delta t) - m_{X^e}] \{X^e[(i+\mu)\Delta t] - m_{X^e}\}.$$

Результаты вычисления автокорреляционной функции $R_{X^eX^e}(\mu)$ приведены в таблице, график функции представлен на рис. 2 (кривая 1).

На следующем шаге из выражения (16) вычислим оценки взаимно-корреляционной функции между эквивалентным полезным сигналом $X^e(i\Delta t)$ и эквивалентной помехой $\varepsilon^e(i\Delta t)$.

Рассчитаем аналогичные характеристики для сгенерированных дискретных значений помехи $\varepsilon(t)$ и полезного сигнала $X(t)$:

$$\text{средние значения } m_{\varepsilon} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t); \quad m_X = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t);$$

$$\text{СКО } \sigma_{\varepsilon} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\varepsilon(i\Delta t) - m_{\varepsilon}]^2; \quad \sigma_X = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [X(i\Delta t) - m_X]^2;$$

3. Значения сумм квадратов отсчётов сгенерированной помехи и эквивалентной помехи составляют $S_{\varepsilon} = 903,67$; $S_{\varepsilon^e} = 934,17$, а относительная погрешность

$$\Delta S_{\varepsilon} = \frac{|S_{\varepsilon} - S_{\varepsilon^e}|}{S_{\varepsilon}} \cdot 100 = 3,3747 \, \%.$$

4. Значения оценок автокорреляционных функций сгенерированного полезного сигнала $X(t)$ и эквивалентного полезного сигнала $X^e(t)$ практически совпадают, т. е. $R_{X^e X^e}(\mu) \approx R_{XX}(\mu)$ (см. таблицу и рис. 2), а относительные погрешности колеблются в пределах $0,6\% < \Delta R_{XX}(\mu) < 11\%$, исключение составляют лишь точки вблизи нуля.

5. Значения оценок автокорреляционных функций сгенерированной помехи $\varepsilon(t)$ и эквивалентной помехи $\varepsilon^e(t)$ практически совпадают, т. е. $R_{\varepsilon^e \varepsilon^e}(\mu) \approx R_{\varepsilon \varepsilon}(\mu)$ (см. таблицу и рис. 1); относительная погрешность $R_{\varepsilon \varepsilon}(0) = 4,9818 \, \%$ при $\mu = 0$. В остальных точках (см. рис. 1) несмотря на фактическое совпадение $R_{\varepsilon^e \varepsilon^e}(\mu)$, $R_{\varepsilon \varepsilon}(\mu)$ относительная погрешность может варьироваться в широких пределах из-за малости абсолютного значения.

6. Оценки взаимно-корреляционных функций между сгенерированными полезным сигналом и помехой, а также эквивалентными полезным сигналом и помехой практически совпадают:

$$R_{X\varepsilon}(\mu) \approx R_{X^e \varepsilon^e}(\mu);$$

$$R_{\varepsilon X}(\mu) \approx R_{\varepsilon^e X^e}(\mu).$$

Из приведённых выводов следует, что оценки для сгенерированных и эквивалентных сигналов практически совпадают.

Аналогичные результаты авторы получили и при проведении других вычислительных экспериментов. Таким образом, результаты множества вычислительных экспериментов подтвердили достоверность и эффективность алгоритмов уменьшения погрешностей результатов корреляционного анализа зашумлённых сигналов с помощью эквивалентных отсчётов их помех.

Заключение. Предложенные новые технологии позволяют устранить основные недостатки технологии корреляционного анализа зашумлённых сигналов и дают возможность широко и успешно применять новые технологии в областях, в которых требуется статистический анализ измерительной информации. Разработанные технологии можно использовать в системах контроля, диагностики и управления, где применение традиционных алгоритмов и методов корреляционного анализа зашумлённых сигналов из-за больших погрешностей затруднительно. Кроме того, новейшие технологии более широко используются в навигационных системах, радиолокационных системах, в сейсмоакустических системах разведки полезных ископаемых, медицине и т. д. Их применение также возможно при коррекции погрешностей результатов анализа экспериментальных данных в информационно-измерительных комплексах и системах, что значительно улучшит их метрологические характеристики. Статья будет полезна исследователям,

инженерам и метрологам, работающим с зашумлёнными цифровыми сигналами.

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. Aliev T. A., *Digital Noise Monitoring of Defect Origin*, Springer, 2007, 223 p. DOI: 10.1007/978-0-387-71754-8
3. Aliev T. A., Musaeva N. F., Suleymanova M. T., *Automatic Control and Computer Science*, 2018, vol. 52, no. 3, pp. 231–242. DOI: 10.3103/S0146411618030021
4. Aliyev T. A., Musaeva N. F., *Automation and Remote Control*, 1998, vol. 59, no. 5, pp. 679–688.
5. Aliev T. A., Rzayeva N. E., *Measurement Techniques*, 2018, vol. 61, no. 5, pp. 440–446. DOI: 10.1007/s11018-018-1449-7
6. Aliev T. A., Musaeva N. F., Suleymanova M. T., Gazizade B. I., *Journal of Automation and Information Sciences*, 2016, vol. 48, no. 4, pp. 35–55. DOI: 10.1615/JAutomatInfScien.v48.i4.0
7. Пупков К. А., Езупов Н. Д. Методы классической и современной теории автоматического управления. Т. 2. Статическая динамика и идентификация систем автоматического управления. М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 640 с.
8. Bendat J. S., Piersol A. G., *Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis*, 2-nd ed, N. Y., Wiley, 1993, 458 p. DOI: org/10.2514/3.49131
9. Раннев Г. Г. Измерительные информационные системы. М.: Приборостроение, 2010. 336 с.
10. Алексеев А. А., Кораблев Ю. А., Шестопалов М. Ю. Идентификация и диагностика систем. М.: Академия, 2009. 352 с.
11. Mehdiyeva G. Y., Ibrahimov V. R., Imanova M. N., *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2016, vol. 306, pp. 1–9, DOI: org/10.1016/j.cam.2016.03.026
12. Сандомирский С. Г. Влияние точности измерения и диапазона изменения физической величины на коэффициент корреляции между её истинными значениями и результатами измерений // Измерительная техника. 2014. № 10. С. 13–17.
13. Сандомирский С. Г. Зависимость коэффициента корреляции между результатами измерения параметра и его истинными значениями от приведённой погрешности измерения // Приборы и методы измерений. 2019. Т. 10. № 1. С. 90–98. DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-90-98
14. Burkatovskaya Yu., B., Vorobeichikov S. E., *Automation and Remote Control*, 2000, vol. 61, no. 3, pp. 425–437.
15. Guseynov S. E., Aleksejeva J. V., Andreyev S. A., *Advanced Materials Research*, 2015, no. 1117, pp. 254–257. DOI: org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1117.254
16. Bila G. D., *Cybernetics and Systems Analysis*, 2016, vol. 52, no. 1, pp. 160–172. DOI: 10.1007/s10559-016-9811-8
17. Stoikova L. S., *Cybernetics and Systems Analysis*, 2017, vol. 53, no. 2, pp. 217–224. DOI: org/10.1007/s10559-016-9892-4
18. Vishnyakov A. N., Tsyppin Ya. Z., *Automation and Remote Control*, 1991, vol. 52, no. 12, pp. 1744–1751.
19. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория случайных процессов и её инженерные приложения, 5-е изд. М.: КНОРУС, 2013. 448 с.

20. Abbasov A. M., Mamedova M. H., Orujov G. H., Aliyev H. B., *Mechatronics*, 2001, no. 11, pp. 439–449.
DOI: org/10.1016/S0957-4158(00)00027-1

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. Aliev T. A., *Digital Noise Monitoring of Defect Origin*, Springer, 2007, 223 p. DOI: 10.1007/978-0-387-71754-8
3. Aliev T. A., Musaeva N. F., Suleymanova M. T., *Automatic Control and Computer Science*, 2018, vol. 52, no. 3, pp. 231–242. DOI: 10.3103/S0146411618030021
4. Aliyev T. A., Musaeva N. F., *Automation and Remote Control*, 1998, vol. 59, no. 5, pp. 679–688.
5. Aliev T. A., Rzayeva N. E., *Measurement Techniques*, 2018, vol. 61, no. 5, pp. 440–446. DOI: 10.1007/s11018-018-1449-7
6. Aliev T. A., Musaeva N. F., Suleymanova M. T., Gazizade B. I., *Journal of Automation and Information Sciences*, 2016, vol. 48, no. 4, pp. 35–55. DOI: 10.1615/JAutomatInfScien.v48.i4.0
7. Pupkov K. A., Yegupov N. D., *Metody klassicheskoi i sovremennoi teorii avtomaticheskogo upravleniya, Vol. 2. Staticheskaya dinamika i identifikatsiya sistem avtomaticheskogo upravleniya*, Moscow, MGTU im. N. E. Bauman Publ., 2004, 640 p. (in Russian).
8. Bendat J. S., Piersol A. G., *Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis*, 2-nd ed, N. Y., Wiley, 1993, 458 p. DOI: org/10.2514/3.49131
9. Rannev G. G., *Izmeritel'nye informatsionnye sistemy*, Moscow, Priboorostroenie Publ., 2010, 336 p. (in Russian).

10. Alekseev A. A., Korablev Yu. A., Shestopalov M. Yu., *Identifikatsiya i diagnostika system*, Moscow, Akademiya Publ., 2009, 352 p. (in Russian).

11. Mehdiyeva G. Y., Ibrahimov V. R., Imanova M. N., *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2016, vol. 306, pp. 1–9. DOI: org/10.1016/j.cam.2016.03.026

12. Sandomirskii S. G., *Measurement Techniques*, 2014, no. 10, pp. 13–17 (in Russian).

13. Sandomirski S. G., *Devices and Methods of Measurements*, 2019, vol. 10, no. 1, pp. 90–98 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-90-98

14. Burkatovskaya Yu., B., Vorobeichikov S. E., *Automation and Remote Control*, 2000, vol. 61, no. 3, pp. 425–437.

15. Guseynov S. E., Alekseyeva J. V., Andreyev S. A., *Advanced Materials Research*, 2015, no. 1117, pp. 254–257.
DOI: org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1117.254

16. Bila G. D., *Cybernetics and Systems Analysis*, 2016, vol. 52, no. 1, pp. 160–172. DOI: 10.1007/s10559-016-9811-8

17. Stoikova L. S., *Cybernetics and Systems Analysis*, 2017, vol. 53, no. 2, pp. 217–224. DOI: org/10.1007/s10559-016-9892-4

18. Vishnyakov A. N., Tsytkin Ya. Z., *Automation and Remote Control*, 1991, vol. 52, no. 12, pp. 1744–1751.

19. Venttsel' E. S., Ovcharov L. A., *Teoriya sluchainykh protsessov i ee inzhenernye prilozheniya*, Moscow, KNORUS Publ., 2013, 448 p. (in Russian).

20. Abbasov A. M., Mamedova M. H., Orujov G. H., Aliyev H. B., *Mechatronics*, 2001, no. 11, pp. 439–449.
DOI: org/10.1016/S0957-4158(00)00027-1

Дата поступления: 12.02.2020.

Дата принятия: 03.03.2020.

Development of technologies for reducing the error of traditional algorithms of correlation analysis of noisy signals

Telman A. Aliev^{1,2}, Naila F. Musaeva², Narmin E. Rzayeva², Ana I. Mammadova¹

¹Institute of Control Systems of Azerbaijan National Academy of Science, Baku, Azerbaijan,
e-mail: telmancyber@gmail.com, anahaciyeva@gmail.com

²Azerbaijan University of Architecture and Construction, Baku, Azerbaijan,
e-mail: musanaila@gmail.com, nikanel1@gmail.com

The authors analyze the factors affecting the errors in the estimates of the correlation functions of the noisy signals when using traditional calculation algorithms. It is shown that the sum noise of the noisy signal in many cases consists of the noise caused by external factors and the noise caused by the initiation of various defects during the operation of control objects. For this reason, in order to eliminate the error in the results of the correlation analysis of noisy signals, it is necessary to create algorithms and technologies for determining the estimate of the noise variance and the cross-correlation functions between the useful signal and the noise. For this purpose, appropriate algorithms and technologies are proposed that open up the possibility of reducing the error of traditional technologies for determining the estimates of correlation functions. With the purpose of reducing the error of the results of correlation analysis, a technology is proposed for determining the approximate equivalent samples of the noise of the noisy signals. It is shown that using the equivalent noise samples, it is possible to obtain results that are identical to the results of using real samples of the noise in the correlation analysis of the same signals. Moreover, by extracting the equivalent noise samples from the noisy signal, the equivalent samples of the useful signal are also determined, which allow determining the estimates equivalent to the estimates of the correlation functions of the useful signal. At the same time, having equivalent noise samples and useful signal samples, the estimates of the cross-correlation function between the useful signal and the noise are determined. The study have shown that despite certain errors in the equivalent samples compared to the true samples, with a sufficient observation time using equivalent samples, the error of traditional technologies for the correlation analysis of noisy signals can be significantly reduced. These technologies can also be used to correct errors in the results of the analysis of experimental data in information-measuring and other measuring complexes and systems, which will significantly improve their metrological characteristics.

Key words: signal, noise, noisy signal, correlation function, object, diagnostics, identification, estimate, error, noise samples, equivalent samples, useful signal.