НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК АЗЕРБАЙДЖАНА
ИНСТИТУТ КИБЕРНЕТИКИ им. акад. А.И.ГУСЕЙНОВА

УЛЬКАР ЭЛЬДАР кызы САТТАРОВА

АЛГОРИТМЫ, ТЕХНОЛОГИИ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ВЫЧИСЛЕНИЯ РОБАСТНЫХ НОРМИРОВАННЫХ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ФУНКЦИЙ И МАТРИЦ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ИДЕНТИФИКАЦИИ

3338.01 - Системный анализ, управление и обработка информации

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора философии по техническим наукам

Баку – 2013

Работа выполнена в Азербайджанском Университете Архитектуры и Строительства

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор **Н.Ф. МУСАЕВА**

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент НАНА **Мамедов Ф.И.**

доктор философии по техническим наукам **Рзаев А.Г.**

Ведущая организация: **Институт информационных технологий НАН Азербайджана**

Защита диссертации состоится « 19 » апреля 2013 г. в 15^{00} на заседании диссертационного совета Д01.121 при Институте Кибернетики НАН Азербайджана по адресу: ул. Б. Вахабзаде, 9, AZ 1141, Баку, Азербайджан.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Института Кибернетики НАН Азербайджана

Автореферат разослан « 18 » марта 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор философии по математике, доцент **Пашаев А.Б.**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. При применении традиционных технологий обработки информации получение более или менее приемлемых оценок характеристик исследуемых параметров возможно лишь в том случае, если анализируемые сигналы являются стационарными, подчиняются нормальному закону распределения, корреляция между помехой и полезным сигналом равна нулю и помеха представляет собой белый шум. Однако даже в этом случае погрешности найденных оценок зависят от изменения дисперсии помехи, от изменения корреляции между помехой и полезным сигналом или от изменения их закона распределения. Из-за этого, несмотря на выполнение указанных условий, адекватность описания многих анализируемых процессов с помощью вероятно-статистических методов оказывается неудовлетворительной, и при решении таких важнейших задач как мониторинг, контроль, диагностика, прогноз, управление, идентификация и т.д. получаются ошибочные результаты. Из-за этих причин в рамках классических теорий многие задачи, имеющие важнейшее значение, в настоящее время практически не решаются. Это приводит к тому, что их громадные возможности реализовываются недостаточно, тогда как реализация их потенциала позволила бы решить многочисленные задачи, имеющие колоссальное экономическое и социальное значение.

Например, устранение недостатков традиционной технологии позволило бы повысить достоверность и эффективность прогнозирования аварий на электростанциях, при бурении, диагностирования технического состояния самолетов, создания адекватных математических моделей, прогнозирования землетрясений и т. д. В связи с этим для использования колоссального потенциала рассматриваемых теорий созрела необходимость пересмотрения традиционных алгоритмов и создания новых технологий.

В данной работе предлагаются алгоритмы и технологии вычисления робастных нормированных корреляционных функций и матриц для решения задач идентификации, ориентированных на устранение влияния помехи. Благодаря этому появляется возможность устранения серьезных препятствий в использовании огромного потенциала вышеуказанных теорий для решения важнейших задач в различных областях. Поэтому данная диссертация является актуальной.

Целью работы является решение следующих задач:

– исключить влияние дисперсий помех зашумленных сигналов, состоящих из суммы полезных сигналов и помех, на оценки нормированных авто и взаимно корреляционных функций как при нарушении, так и соблюдении таких классических условий, как нормальность закона распределения, стационарность, отсутствие корреляции между полезным сигналом и помехой и т.д.;

– разработать алгоритмы, технологии и программные средства, позволяющие получить такие робастные оценки нормированных авто и взаимно корреляционных функций зашумленных сигналов, которые как при нарушении, так и соблюдении классических условий максимально приближались бы к оценкам нормированных корреляционных функций полезных сигналов;

– исключить влияние дисперсий помех на элементы нормированных корреляционных матриц, составленных из оценок нормированных корреляционных функций зашумленных сигналов, состоящих из суммы полезных сигналов и помех, используемых при решении задач идентификации статики и динамики;

– разработать алгоритмы, технологии и программные средства, позволяющие получить робастные нормированные корреляционные матрицы зашумленных сигналов, используемые при решении задач идентификации технологических процессов, совпадающие с нормированными корреляционными матрицами полезных сигналов;

Методы исследований. Проведенные в работе исследования базируются на вероятностно-статистических методах, методах корреляционного анализа, теории идентификации, методах и принципах информационных технологий, методах вычислительной математики и на многочисленных вычислительных экспериментах.

Научная новизна проведенных исследований и полученных в диссертационной работе результатов заключается в следующем:

– разработаны алгоритмы, технологии и программные средства, позволяющие определить величины дисперсий помех зашумленных сигналов, состоящих из суммы полезных сигналов и помех при различных нарушениях классических условий;

– разработаны алгоритмы, технологии и программные средства вычисления робастных оценок нормированных авто и взаимно корреляционных функций зашумленных сигналов, которые максимально приближаются к оценкам нормированных авто и взаимно корреляционных функций полезных сигналов;

– разработаны алгоритмы, технологии и программные средства, позволяющие получить робастные нормированные корреляционные матрицы, используемые при решении задач идентификации технологических процессов, элементы которых совпадают с элементами нормированных корреляционных матриц полезных сигналов;
— проведены вычислительные эксперименты, сравнительный анализ полученных результатов и подтверждена эффективность разработанных алгоритмов и технологий.

Эффективность разработанных алгоритмов подтверждается результатами вычислительных и экспериментальных исследований, и внедрением в различные области науки и промышленности.

Практическая значимость и реализация результатов работы. Основные результаты, полученные автором, были признаны Президиумом и отделением физико-математических и технических наук НАНА как важнейшие и включены в отчет за 2008-2011 годы.

Результаты диссертационной работы внедрены в робастной информационной системе оценки вибрационного состояния и прогнозированию аварий на устройстве каталитического крекинга компрессорной станции МК301/2 Бакинского нефтеперерабатывающего завода.

Апробация работы. Основные теоретические и практические результаты, приведенные в работе, докладывались и обсуждались на следующих международных и республиканских симпозиумах и конференциях:
- The international conference “PCI’ 2006, Baku, Azerbaijan
- IV Beynəl. simp. «Fövqəladə hallarda təhlükəsizliyin idarə olunması», Bakı, 2007
- Beynəl. simp. Natural cataclysms and Global problems of the modern civilization., Baku-Innsbruck-2007
- IKT və elekt. təhsillin aktual problemləri Elektron idarəetmə.,Gəncə, 2007
- The second international conference "PCI" Dedicated to the 50th Anniversary of the ICT in Azerbaijan, 2008
- Восьмой Международный Симпозиум «INTELS», Н.Новгород, 2008
- İnşaatın müasir problemləri və həll yolları elmi praktiki konf., Azərbaycan Respublikası təhsil nazirliyi. Azərbaycan memarlıq və Inşaat universiteti Bakı, 2009

Публикации. По теме диссертации опубликованы 19 научных работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Основное содержание работы изложено на 167 страницах, включая 2 рисунка и 3 таблицы, литературы из 94 наименований и 25 страниц приложений.

В первой главе отмечено, что в современных информационных системах корреляционный анализ применяется для решения ряда задач Для решения этих задач информационные системы должны обеспечить вычисление оценок статистических характеристик технологических параметров и определить собственные и взаимные корреляционные матрицы. Поэтому дан подробный анализ существующих методов и алгоритмов решения задач статистического анализа и идентификации. Описаны традиционные методы вычисления оценок статистических характеристик и решения задач статистической идентификации при помощи оценок авто и взаимно корреляционных функций.

В работе показано, что измерительная информация, получаемая от датчиков различных технических и биологических объектов, состоит из смеси полезного сигнала $X(t)$ и случайной помехи $\varepsilon(t)$, то есть $g(t)=X(t)+\varepsilon(t)$. Естественно, что тогда помеха оказывает влияние на оценки статистических характеристик, а также на элементы корреляционных матриц, используемых при решении задач идентификации.

Поэтому в существующей литературе при традиционном подходе к решению перечисленных практических задач статистическими методами предполагается, что выполняются классические ограничения, то есть исследуемый процесс является стационарным эргодическим, случайная помеха имеет нулевое математическое ожидание некоррелированные значения отчетов при $\mu \neq 0$, полезный сигнал и помеха подчиняются нормальному закону распределения и отсутствует корреляция.

Однако в диссертации показано, что при выполнении этих условий оценки автокорреляционных функций зашумленных сигналов при всех временных сдвигах на самом деле не содержат погрешностей, за исключением нулевого временного сдвига, где оценка состоит из суммы оценки автокорреляционной функции полезного сигнала и дисперсии помехи. Оценки же взаимно корреляционных функций не содержат погрешностей от помехи при всех временных сдвигах. В существующей литературе считается, что для устранения влияния помехи на оценку автокорреляционной функции при нулевом временном сдвиге целесообразно перейти к нормированным оценкам корреляционных функций. В работе показано, что нормирование позволяет исключить влияние помехи только на оценку автокорреляционной функции при нулевом временном сдвиге. Во всех остальных же случаях, то есть при временных сдвигах для оценок автокорреляционных функций и при всех временных сдвигах для оценок взаимно корреляционных функций нормирование наоборот приводит к появлению погрешности.

Исходя из проведенного анализа в первой главе была сформулирована постановка задачи, которая сводится к следующему: разработать методы, алгоритмы и технологии, которые позволили бы устранить выполнение следующих неравенств:

1) $\bar{r}_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{g}}(\mu) \neq \bar{r}_{\overset{\circ}{X}\overset{\circ}{X}}(\mu)$, $\bar{r}_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{\eta}}(\mu) \neq \bar{r}_{\overset{\circ}{X}\overset{\circ}{Y}}(\mu)$,где $\bar{r}_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{g}}(\mu)$, $\bar{r}_{\overset{\circ}{X}\overset{\circ}{X}}(\mu)$– нормированные авто корреляционные функции зашумленного и полезного центрированных сигналов $\overset{\circ}{g}_i(t)=g(t)-m_g$, $\overset{\circ}{X}(t)=X(t)-m_X$; $\vec{r}_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{\eta}}(\mu)$, $\vec{r}_{\overset{\circ}{X}\overset{\circ}{Y}}(\mu)$ – нормированные взаимно корреляционные функции между зашумленными сигналами $\overset{\circ}{g}_i(t)$ и $\overset{\circ}{\eta}_i(t)$, $\eta(t)=Y(t)+\varphi(t)$, $\overset{\circ}{\eta}_i(t)=\eta(t)-m_\eta$ и полезными сигналами $\overset{\circ}{X}(t)$ и $\overset{\circ}{Y}(t)=Y(t)-m_Y$; m_g, m_X, m_η, m_Y –математические ожидания соответственно $g(t)$, $X(t)$, $\eta(t)$, $Y(t)$;

2) $\vec{r}_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{g}}(0) \neq \vec{r}_{\overset{\circ}{X}\overset{\circ}{X}}(0)$, $\vec{r}_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{\eta}}(0) \neq \vec{r}_{\overset{\circ}{X}\overset{\circ}{Y}}(0)$, где $\vec{r}_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{g}}(0)$, $\vec{r}_{\overset{\circ}{X}\overset{\circ}{X}}(0)$ – корреляционные матрицы нормированных оценок авто и взаимно корреляционных функций при временном сдвиге $\mu=0$ соответственно зашумленных и полезных входных сигналов $\overset{\circ}{g}_i(t)$, $\overset{\circ}{X}_i(t)$; $\vec{r}_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{\eta}}(0)$, $\vec{r}_{\overset{\circ}{X}\overset{\circ}{Y}}(0)$ – матрица-столбцы оценок взаимно корреляционных функций при $\mu=0$ между входными и выходным сигналами $\overset{\circ}{g}_i(t)$, $\overset{\circ}{\eta}(t)$ и $\overset{\circ}{X}_i(t)$, $\overset{\circ}{Y}(t)$;

3) $\vec{r}_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{g}}(\mu) \neq \vec{r}_{\overset{\circ}{X}\overset{\circ}{X}}(\mu)$,$\vec{r}_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{\eta}}(\mu) \neq \vec{r}_{\overset{\circ}{X}\overset{\circ}{Y}}(\mu)$, где $\vec{r}_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{g}}(\mu)$, $\vec{r}_{\overset{\circ}{X}\overset{\circ}{X}}(\mu)$ – нормированные квадратные симметричные матрицы автокорреляционных функций размерностью $N \times N$ входных зашумленного и полезного сигналов $\overset{\circ}{g}(t)$, $\overset{\circ}{X}(t)$; $\vec{r}_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{\eta}}(\mu)$, $\vec{r}_{\overset{\circ}{X}\overset{\circ}{Y}}(\mu)$ – вектор-столбцы взаимно корреляционных функций между входными и выходными сигналами.

Добиться выполнения следующих приближенных равенств:
1) $r^R_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{g}}(\mu) \approx r_{\overset{\circ}{X}\overset{\circ}{X}}(\mu)$, $r^R_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{\eta}}(\mu) \approx r_{\overset{\circ}{X}\overset{\circ}{Y}}(\mu)$, где $r^R_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{g}}(\mu)$ – робастная нормированная авто корреляционная функция зашумленного сигнала $\overset{\circ}{g}(t)$; $r^R_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{\eta}}(\mu)$ – робастная нормированная взаимно корреляционная функция между зашумленными сигналами $\overset{\circ}{g}(t)$, $\overset{\circ}{\eta}(t)$; 2) $\vec{r}^R_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{g}}(0) \approx \vec{r}_{\overset{\circ}{X}\overset{\circ}{X}}(0)$, $\vec{r}^R_{\overset{\circ}{X}\overset{\circ}{Y}}(0) \approx \vec{r}_{\overset{\circ}{X}\overset{\circ}{Y}}(0)$, где $\vec{r}^R_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{g}}(0)$ – робастная корреляционная матрица нормированных оценок авто и взаимно корреляционных функций при временном сдвиге $\mu = 0$ зашумленных входных сигналов $\overset{\circ}{g}_i(t)$; $\vec{r}^R_{\overset{\circ}{X}\overset{\circ}{Y}}(0)$ – робастная матрица-столбец оценок взаимно корреляционных функций при $\mu = 0$ между входными и выходным зашумленными сигналами $\overset{\circ}{g}_i(t)$, $\overset{\circ}{\eta}(t)$; 3) $\vec{r}^R_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{g}}(\mu) \approx \vec{r}_{\overset{\circ}{X}\overset{\circ}{X}}(\mu)$, $\vec{r}^R_{\overset{\circ}{X}\overset{\circ}{Y}}(\mu) \approx \vec{r}_{\overset{\circ}{X}\overset{\circ}{Y}}(\mu)$, где $\vec{r}^R_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{g}}(\mu)$ – робастная нормированная квадратная симметричная матрица авто корреляционных функций размерностью $N \times N$ входного зашумленного сигнала $\overset{\circ}{g}(t)$; $\vec{r}^R_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{\eta}}(\mu)$ – вектор-столбец взаимно корреляционной функции между входным и выходным сигналами.

Во второй главе рассмотрены трудности, с которыми сталкиваются при вычислении оценок нормированной автокорреляционной функции.

Показано, что при отсутствии корреляции между полезным сигналом $X(t)$ и помехой $\varepsilon(t)$, а также между значениями помехи $\overset{\circ}{\varepsilon}(i\Delta t)$ и $\overset{\circ}{\varepsilon}((i+\mu)\Delta t)$ при $\mu \neq 0$, т.е. $R_{\overset{\circ}{x}\overset{\circ}{\varepsilon}}(\mu) \approx 0$, $R_{\overset{\circ}{\varepsilon}\overset{\circ}{x}}(\mu) \approx 0$

$$\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \overset{\circ}{\varepsilon}(i\Delta t)\overset{\circ}{\varepsilon}((i+\mu)\Delta t) \approx 0 \text{ при } \mu \neq 0, \tag{1}$$

при нулевом временном сдвиге $\mu=0$ нормированные корреляционные функции, как полезного сигнала $X(t)$, так и зашумленного сигнала $g(t)$, вычисляемые по формулам

$$r_{\overset{\circ}{X}\overset{\circ}{X}}(\mu=0)=R_{\overset{\circ}{X}\overset{\circ}{X}}(\mu=0)/D(x)=(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\overset{\circ}{X}(i\Delta t)\overset{\circ}{X}(i\Delta t))/(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\overset{\circ}{X}(i\Delta t)\overset{\circ}{X}(i\Delta t))=1 \quad (2)$$

$$r_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{g}}(\mu=0)=R_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{g}}(\mu=0)/D(g)=(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\overset{\circ}{g}(i\Delta t)\overset{\circ}{g}(i\Delta t))/(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\overset{\circ}{g}(i\Delta t)\overset{\circ}{g}(i\Delta t))=1 \quad (3)$$

совпадают и равны единице $r_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{g}}(\mu=0)=r_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{g}}(\mu=0)=1$, (4)

где $R_{\overset{\circ}{X}\overset{\circ}{X}}(\mu)=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\overset{\circ}{X}(i\Delta t)\overset{\circ}{X}((i+\mu)\Delta t)$, (5)

$$R_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{g}}(\mu)=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\overset{\circ}{g}(i\Delta t)\overset{\circ}{g}((i+\mu)\Delta t), \quad (6)$$

$$D(x)=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\overset{\circ}{X}(i\Delta t)\overset{\circ}{X}(i\Delta t),\ D(g)=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\overset{\circ}{g}(i\Delta t)\overset{\circ}{g}(i\Delta t). \quad (7)$$

При $\mu\neq 0$ оценки нормированных автокорреляционных функций зашумленного сигнала $g(t)$, вычисляемые по формулам

$$r_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{g}}(\mu\neq 0)=R_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{g}}(\mu\neq 0)/D(g)=R_{\overset{\circ}{X}\overset{\circ}{X}}(\mu\neq 0)/(D(x)+D(\varepsilon)), \quad (8)$$

отличаются от оценок нормированных автокорреляционных функций полезного сигнала $X(t)$. При выполнении условий некоррелированности между полезными сигналами $X_1(t)$, $X_2(t)$ и помехами $\varepsilon_1(t)$, $\varepsilon_2(t)$ для оценок авто и взаимно корреляционных функций $R_{\overset{\circ}{X}_1\overset{\circ}{\varepsilon}_2}(\mu)$, $R_{\overset{\circ}{\varepsilon}_1\overset{\circ}{X}_2}(\mu)$, $R_{\overset{\circ}{\varepsilon}_1\overset{\circ}{\varepsilon}_2}(\mu)$ выполняются равенства

$$R_{\overset{\circ}{X}_1\overset{\circ}{\varepsilon}_2}(\mu)\approx 0,\ R_{\overset{\circ}{\varepsilon}_1\overset{\circ}{X}_2}(\mu)\approx 0,\ R_{\overset{\circ}{\varepsilon}_1\overset{\circ}{\varepsilon}_2}(\mu)\approx 0, \quad (9)$$

и формула вычисления оценок нормированных взаимно корреляционных функций приобретает вид:

$$r_{\overset{\circ}{g}_1\overset{\circ}{g}_2}(\mu)=R_{\overset{\circ}{g}_1\overset{\circ}{g}_2}(\mu)/\sqrt{D(g_1)\cdot D(g_2)}=R_{\overset{\circ}{X}_1\overset{\circ}{X}_2}(\mu)/\sqrt{(D(X_1)+D(\varepsilon_1))\cdot(D(X_2)+D(\varepsilon_2))}$$

где $R_{\overset{\circ}{g}_1\overset{\circ}{g}_2}(\mu)=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\overset{\circ}{g}_1(i\Delta t)\overset{\circ}{g}_2((i+\mu)\Delta t)$, (10)

$$R_{\overset{\circ}{X}_1\overset{\circ}{X}_2}(\mu)=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\overset{\circ}{X}_1(i\Delta t)\overset{\circ}{X}_2((i+\mu)\Delta t), \qquad (11)$$

$$D(\varepsilon_1)=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\overset{\circ}{\varepsilon}_1(i\Delta t)\overset{\circ}{\varepsilon}_1(i\Delta t),\ D(\varepsilon_2)=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\overset{\circ}{\varepsilon}_2(i\Delta t)\overset{\circ}{\varepsilon}_2(i\Delta t), \qquad (12)$$

$$D(g_1)=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\overset{\circ}{g}_1(i\Delta t)\overset{\circ}{g}_1(i\Delta t)=D(x_1)+D(\varepsilon_1), \qquad (13)$$

$$D(g_2)=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\overset{\circ}{g}_2(i\Delta t)\overset{\circ}{g}_2(i\Delta t)=D(x_2)+D(\varepsilon_2). \qquad (14)$$

Из этого выражения следует, что оценки нормированной взаимно корреляционной функции $r_{\overset{\circ}{g}_1\overset{\circ}{g}_2}(\mu)$ при всех временных сдвигах μ отличаются от оценок нормированных взаимно корреляционных функций $r_{\overset{\circ}{X}_1\overset{\circ}{X}_2}(\mu)$ полезных сигналов на величины среднеквадратических отклонений $\sqrt{D(\varepsilon_1)}$, $\sqrt{D(\varepsilon_2)}$ помех $\varepsilon_1(t)$, $\varepsilon_2(t)$ в знаменателе. Поэтому в работе предлагается следующая формула определения дисперсии помехи технологических параметров:

$$D^*(\varepsilon)=R_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{g}}(\mu=0\cdot\Delta t)-2\,R_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{g}}(\mu=1\cdot\Delta t)+R_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{g}}(\mu=2\cdot\Delta t). \qquad (15)$$

Разработана технология вычисления робастных оценок нормированных авто и взаимно корреляционных функций. Показано, что, используя вычисленные оценки величин дисперсий помех D_ε, D_{ε_1}, D_{ε_2}, можно вычислить робастные оценки нормированных корреляционных функций по следующим формулам:

$$r^R_{\overset{\circ}{g}_1\overset{\circ}{g}_2}(\mu)==\frac{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\overset{\circ}{g}_1(i\Delta t)\overset{\circ}{g}_2((i+\mu)\Delta t)}{\sqrt{A(g_1)}\sqrt{A(g_2)}}, \qquad (16)$$

где $A(g_1)=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}2\,\overset{\circ}{g}_1(i\Delta t)\overset{\circ}{g}_1((i+1)\Delta t)-\overset{\circ}{g}_1(i\Delta t)\overset{\circ}{g}_1((i+2)\Delta t)$,

$$A(g_2)=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}2\,\overset{\circ}{g}_1(i\Delta t)\overset{\circ}{g}_1((i+1)\Delta t)-\overset{\circ}{g}_1(i\Delta t)\overset{\circ}{g}_1((i+2)\Delta t).$$

В третьей главе разработаны технологии вычисления робастных нормированных корреляционных матриц. Предложена методика формирования робастных нормированных корреляционных матриц $\vec{r}^{R}_{\overset{\circ}{X}\overset{\circ}{X}}(0)$, которые используются при решении задач идентификации статики, в следующем виде:

$$\vec{r}^{R}_{\overset{\circ}{X}\overset{\circ}{X}}(0)=\begin{bmatrix} 1 & \frac{R_{\overset{\circ}{g}_1\overset{\circ}{g}_2}(0)}{\sqrt{B(g_1)\cdot B(g_2)}} & \cdots & \frac{R_{\overset{\circ}{g}_1\overset{\circ}{g}_n}(0)}{\sqrt{B(g_1)\cdot B(g_n)}} \\ \frac{R_{\overset{\circ}{g}_2\overset{\circ}{g}_1}(0)}{\sqrt{B(g_2)\cdot B(g_1)}} & 1 & \cdots & \frac{R_{\overset{\circ}{g}_2\overset{\circ}{g}_n}(0)}{\sqrt{B(g_2)\cdot B(g_n)}} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \frac{R_{\overset{\circ}{g}_n\overset{\circ}{g}_1}(0)}{\sqrt{B(g_n)\cdot B(g_1)}} & \frac{R_{\overset{\circ}{g}_n\overset{\circ}{g}_2}(0)}{\sqrt{B(g_n)\cdot B(g_2)}} & \cdots & 1 \end{bmatrix}, \quad (17)$$

$$\vec{r}^{R}_{\overset{\circ}{X}\overset{\circ}{Y}}(0)=\begin{bmatrix} \frac{R_{\overset{\circ}{g}_1\overset{\circ}{\eta}}(0)}{\sqrt{B(g_1)\cdot B(\eta)}} & \frac{R_{\overset{\circ}{g}_2\overset{\circ}{\eta}}(0)}{\sqrt{B(g_1)\cdot B(\eta)}} & \cdots & \frac{R_{\overset{\circ}{g}_n\overset{\circ}{\eta}}(0)}{\sqrt{B(g_1)\cdot B(\eta)}} \end{bmatrix}, \quad (18)$$

где $B(g_i)=\left(D(g_i)-D^*(\varepsilon_i)\right), B(\eta)=\left(D(\eta)-D^*(\varphi)\right),$

$$R_{\overset{\circ}{g}_i\overset{\circ}{g}_j}(\mu)=\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\overset{\circ}{g}_i(k\Delta t)\overset{\circ}{g}_j((k+\mu)\Delta t),\; R_{\overset{\circ}{g}_i\overset{\circ}{\eta}}(\mu)=\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\overset{\circ}{g}_i(k\Delta t)\overset{\circ}{\eta}((k+\mu)\Delta t) \quad (19)$$

$$D^*(\varepsilon_i)=\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\left[\overset{\circ}{g}_i(k\Delta t)\overset{\circ}{g}_i(k\Delta t)-2\overset{\circ}{g}_i(k\Delta t)\overset{\circ}{g}_i((k+1)\Delta t)+\overset{\circ}{g}_i(k\Delta t)\overset{\circ}{g}_i((k+2)\Delta t)\right], \quad (20)$$

$$D^*(\varphi)=\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\left[\overset{\circ}{\eta}(k\Delta t)\overset{\circ}{\eta}(k\Delta t)-2\overset{\circ}{\eta}(k\Delta t)\overset{\circ}{\eta}((k+1)\Delta t)+\overset{\circ}{\eta}(k\Delta t)\overset{\circ}{\eta}((k+2)\Delta t)\right]. \quad (21)$$

Предложена методика формирования робастных нормированных корреляционных матриц $\vec{r}^{R}_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{g}}(\mu)$ $\vec{r}^{R}_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{\eta}}(\mu)$, которые используются при решении задач идентификации динамики, в следующем виде:

$$\vec{r}^{R}_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{g}}(\mu)=\begin{bmatrix} 1 & \frac{R_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{g}}(\Delta t)}{\left(D(g)-D^*(\varepsilon)\right)} & \cdots & \frac{R_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{g}}[(N-1)\Delta t]}{\left(D(g)-D^*(\varepsilon)\right)} \\ \frac{R_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{g}}(\Delta t)}{\left(D(g)-D^*(\varepsilon)\right)} & 1 & \cdots & \frac{R_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{g}}[(N-2)\Delta t]}{\left(D(g)-D^*(\varepsilon)\right)} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \frac{R_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{g}}[(N-1)\Delta t]}{\left(D(g)-D^*(\varepsilon)\right)} & \frac{R_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{g}}[(N-2)\Delta t]}{\left(D(g)-D^*(\varepsilon)\right)} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\vec{r}^{R}_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{\eta}}(\mu)=\left[\frac{R_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{\eta}}(0)}{\sqrt{(D(g)-D^*(\varepsilon))(D(\eta)-D^*(\varphi))}}\quad\frac{R_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{\eta}}(\Delta t)}{\sqrt{(D(g)-D^*(\varepsilon))(D(\eta)-D^*(\varphi))}}\quad\cdots\quad\frac{R_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{\eta}}[(N-1)\Delta t]}{\sqrt{(D(g)-D^*(\varepsilon))(D(\eta)-D^*(\varphi))}}\right] \tag{23}$$

где $R_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{g}}(\mu)=\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\overset{\circ}{g}(k\Delta t)\overset{\circ}{g}((k+\mu)\Delta t)$, $R_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{\eta}}(\mu)=\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\overset{\circ}{g}(k\Delta t)\overset{\circ}{\eta}((k+\mu)\Delta t)$, (24)

$$D^*(\varepsilon)=\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\left[\overset{\circ}{g}(k\Delta t)\overset{\circ}{g}(k\Delta t)-2\overset{\circ}{g}(k\Delta t)\overset{\circ}{g}((k+1)\Delta t)+\overset{\circ}{g}(k\Delta t)\overset{\circ}{g}((k+2)\Delta t)\right], \tag{25}$$

$$D^*(\varphi)=\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\left[\overset{\circ}{\eta}(k\Delta t)\overset{\circ}{\eta}(k\Delta t)-2\overset{\circ}{\eta}(k\Delta t)\overset{\circ}{\eta}((k+1)\Delta t)+\overset{\circ}{\eta}(k\Delta t)\overset{\circ}{\eta}((k+2)\Delta t)\right]. \tag{26}$$

Показано, что робастная технология улучшения обусловленности нормированных корреляционных матриц позволяет путем устранения влияния характеристик помех преобразовать исходные матрицы к виду, аналогичному виду матрицы, элементы которой не содержат погрешности от помех.

В четвертой главе разработана технология экспериментального исследования стохастических процессов и проведения вычислительных экспериментов. Вычислительные эксперименты проводились с использованием средства компьютерной математики MATLAB.

Для проверки эффективности технологии вычисления робастных нормированных авто корреляционных функций были вычислены:
1)оценки автокорреляционной функции центрированного полезного сигнала $X(t)$ по выражению (5). 2) оценки нормированной авто корреляционной функции центрированного полезного сигнала $X(t)$ по выражению: $r_{\overset{\circ}{X}\overset{\circ}{X}}(\mu)=R_{\overset{\circ}{X}\overset{\circ}{X}}(\mu)/D(x)$, где $D(x)=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\overset{\circ}{X}(i\Delta t)\overset{\circ}{X}(i\Delta t)$; 3)оценки автокорреляционной функции центрированного зашумленного сигнала $g(t)$ по выражению (6); 4) оценки нормированной автокорреляционной функции зашумленного сигнала $g(t)$ по выражению (4); 5) величина дисперсии $D^*(\varepsilon)$ помехи $\varepsilon(i\Delta t)$ по выражению (14); 6) робастные оценки нормированной авто корреляционной функции при $\mu\neq 0$ по выражению $r^{R}_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{g}}(\mu)=R_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{g}}(\mu)/\left(D(g)-D^*(\varepsilon)\right)$, 7)робастные оценки нормированной авто корреляционной функции при всех временных сдвигах μ по выражению (16). Затем проводился сравнительный ана-

лиз. Для этого были определены величины относительных погрешностей оценок нормированных авто корреляционных функций $r_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{g}}(\mu)$ зашумленных сигналов $g(t)$ и робастных оценок авто корреляционных функций $r^{R}_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{g}}(\mu)$ по выражениям:

$\Delta r_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{g}}(\mu)=\left|r_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{g}}(\mu)-r_{\overset{\circ}{X}\overset{\circ}{X}}(\mu)\right|/\left|r_{\overset{\circ}{X}\overset{\circ}{X}}(\mu)\right|*100\%$; $\Delta r^{R}_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{g}}(\mu)=\left|r^{R}_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{g}}(\mu)-r_{\overset{\circ}{X}\overset{\circ}{X}}(\mu)\right|/\left|r_{\overset{\circ}{X}\overset{\circ}{X}}(\mu)\right|*100\%$.

Для проверки эффективности технологии вычисления робастных нормированных взаимно корреляционных функций были вычислены: 1)оценки взаимно корреляционной функции центрированных полезных сигналов $\overset{\circ}{X}_1(t)$, $\overset{\circ}{X}_2(t)$ по формуле (11); 2)оценки нормированной взаимно корреляционной функции полезных сигналов $\overset{\circ}{X}_1(t)$, $\overset{\circ}{X}_2(t)$ по выражению:

$$r_{\overset{\circ}{X}_1\overset{\circ}{X}_2}(\mu)=R_{\overset{\circ}{X}_1\overset{\circ}{X}_2}(\mu)/\sqrt{D(X_1)\cdot D(X_2)}=\frac{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\overset{\circ}{X}_1(i\Delta t)\overset{\circ}{X}_2((i+\mu)\Delta t)}{\sqrt{\left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\overset{\circ}{X}_1(i\Delta t)\overset{\circ}{X}_1(i\Delta t)\right)\cdot\left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\overset{\circ}{X}_2(i\Delta t)\overset{\circ}{X}_2(i\Delta t)\right)}};$$

3)оценки взаимно корреляционной функции центрированных зашумленных сигналов $\overset{\circ}{g}_1(t)$, $\overset{\circ}{g}_2(t)$ по формуле (10); 4)оценки нормированной взаимно корреляционной функции зашумленных сигналов $\overset{\circ}{g}_1(t)$, $\overset{\circ}{g}_2(t)$ по формуле:

$$r_{\overset{\circ}{g}_1\overset{\circ}{g}_2}(\mu)=R_{\overset{\circ}{g}_1\overset{\circ}{g}_2}(\mu)/\sqrt{D(g_1)\cdot D(g_2)}=\frac{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\overset{\circ}{g}_1(i\Delta t)\overset{\circ}{g}_2((i+\mu)\Delta t)}{\sqrt{\left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\overset{\circ}{g}_1(i\Delta t)\overset{\circ}{g}_1(i\Delta t)\right)\cdot\left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\overset{\circ}{g}_2(i\Delta t)\overset{\circ}{g}_2(i\Delta t)\right)}};$$

5) вычисляются оценки дисперсий $D^*(\varepsilon_1)$, $D(\varepsilon_2)$ помех $\varepsilon_1(i\Delta t)$, $\varepsilon_2(i\Delta t)$ по формулам $D^*(\varepsilon_1)=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left[\overset{\circ}{g}_1(i\Delta t)\overset{\circ}{g}_1(i\Delta t)+\overset{\circ}{g}_1(i\Delta t)\overset{\circ}{g}_1((i+2)\Delta t)-2\overset{\circ}{g}_1(i\Delta t)\overset{\circ}{g}_1((i+1)\Delta t)\right]$,

$$D(\varepsilon_2)=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left[\overset{\circ}{g}_2(i\Delta t)\overset{\circ}{g}_2(i\Delta t)+\overset{\circ}{g}_2(i\Delta t)\overset{\circ}{g}_2((i+2)\Delta t)-2\overset{\circ}{g}_2(i\Delta t)\overset{\circ}{g}_2((i+1)\Delta t)\right];$$

6)вычисляются робастные оценки нормированной взаимно корреляционной функции $r^{R}_{\overset{\circ}{g}_1 \overset{\circ}{g}_2}(\mu)$ при всех временных сдвигах μ по выражению (16). Затем проводился сравнительный анализ. Для этого были определены:1) величины относительных погрешностей оценок нормированных взаимно корреляционных функций зашумленных сигналов и робастных оценок нормированных взаимно корреляционных функций по выражениям:

$$\Delta r_{\overset{\circ}{g}_1 \overset{\circ}{g}_2}(\mu)=\left|r_{\overset{\circ}{g}_1 \overset{\circ}{g}_2}(\mu)-r_{\overset{\circ}{X}_1 \overset{\circ}{X}_2}(\mu)\right| / \left|r_{\overset{\circ}{X}_1 \overset{\circ}{X}_2}(\mu)\right| * 100\%,\ \Delta r^{R}_{\overset{\circ}{g}_1 \overset{\circ}{g}_2}(\mu)=\left|r^{R}_{\overset{\circ}{g}_1 \overset{\circ}{g}_2}(\mu)-r_{\overset{\circ}{X}_1 \overset{\circ}{X}_2}(\mu)\right| / \left|r_{\overset{\circ}{X}_1 \overset{\circ}{X}_2}(\mu)\right| * 100\%.$$

Для проверки эффективности технологии вычисления робастных нормированных корреляционных матриц, используемых при решении задач идентификации статики, были вычислены: 1)элементы нормированной корреляционной матрицы $\vec{r}_{\overset{\circ}{X} \overset{\circ}{X}}(0)$ полезных сигналов по выражению:

$$\left\| r_{\overset{0}{X}_i \overset{0}{X}_j}(0) \right\| = \begin{bmatrix} 1 & \dfrac{R_{\overset{\circ}{X}_1 \overset{\circ}{X}_2}(0)}{\sqrt{D(X_1)\cdot D(X_2)}} & \cdots & \dfrac{R_{\overset{\circ}{X}_1 \overset{\circ}{X}_n}(0)}{\sqrt{D(X_1)\cdot D(X_2)}} \\ \dfrac{R_{\overset{\circ}{X}_2 \overset{\circ}{X}_1}(0)}{\sqrt{D(X_1)\cdot D(X_2)}} & 1 & \cdots & \dfrac{R_{\overset{\circ}{X}_2 \overset{\circ}{X}_n}(0)}{\sqrt{D(X_1)\cdot D(X_2)}} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \dfrac{R_{\overset{\circ}{X}_n \overset{\circ}{X}_1}(0)}{\sqrt{D(X_1)\cdot D(X_2)}} & \dfrac{R_{\overset{\circ}{X}_n \overset{\circ}{X}_2}(0)}{\sqrt{D(X_1)\cdot D(X_2)}} & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

2)элементы нормированной корреляционной матрицы по выражению (18);3) определитель и число обусловленности нормированной корреляционной матрицы. Для зашумленных сигналов вычислялись:1)элементы нормированной корреляционной матрицы по выражениям:

$$\left\| r_{\overset{\circ}{g}_i \overset{\circ}{g}_j}(0) \right\| = \begin{bmatrix} \dfrac{R_{\overset{\circ}{g}_1 \overset{\circ}{g}_1}(0)}{D(g_1)} & \dfrac{R_{\overset{\circ}{g}_1 \overset{\circ}{g}_2}(0)}{\sqrt{D(g_1)\cdot D(g_2)}} & \cdots & \dfrac{R_{\overset{\circ}{g}_1 \overset{\circ}{g}_n}(0)}{\sqrt{D(g_1)\cdot D(g_2)}} \\ \dfrac{R_{\overset{\circ}{g}_2 \overset{\circ}{g}_1}(0)}{\sqrt{D(g_2)\cdot D(g_1)}} & \dfrac{R_{\overset{\circ}{g}_2 \overset{\circ}{g}_2}(0)}{D(g_2)} & \cdots & \dfrac{R_{\overset{\circ}{g}_2 \overset{\circ}{g}_n}(0)}{\sqrt{D(g_2)\cdot D(g_n)}} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \dfrac{R_{\overset{\circ}{g}_n \overset{\circ}{g}_1}(0)}{\sqrt{D(g_n)\cdot D(g_1)}} & \dfrac{R_{\overset{\circ}{g}_n \overset{\circ}{g}_2}(0)}{\sqrt{D(g_n)\cdot D(g_1)}} & \cdots & \dfrac{R_{\overset{\circ}{g}_n \overset{\circ}{g}_n}(0)}{D(g_n)} \end{bmatrix}$$

2) элементы нормированной корреляционной матрицы $\vec{r}_{\overset{\circ}{g} \overset{\circ}{\eta}}(0)$ зашумленных сигналов $g_i(t)$, $\eta(t)$ по выражениям:

$$\left\| r_{\mathring{g}_i \mathring{\eta}}(0) \right\| = \left[R_{\mathring{g}_1 \mathring{\eta}}(0) \Big/ \sqrt{D(g_1)\cdot D(\eta)} \quad R_{\mathring{g}_2 \mathring{\eta}}(0) \Big/ \sqrt{D(g_2)\cdot D(\eta)} \quad \ldots \quad R_{\mathring{g}_n \mathring{\eta}}(0) \Big/ \sqrt{D(g_n)\cdot D(\eta)} \right]^T$$

3)определитель и число обусловленности нормированной корреляционной матрицы $\vec{r}_{\mathring{g}\mathring{g}}(0)$. После этого вычислялись робастные оценки:1) элементы робастной нормированной корреляционной матрицы:

$$\vec{r}^{\,R}_{\mathring{g}\mathring{g}}(0) = \begin{bmatrix} 1 & \dfrac{R_{\mathring{g}_1\mathring{g}_2}(0)}{\sqrt{(D(g_1)-D^*(\varepsilon_1))\cdot(D(g_2)-D^*(\varepsilon_2))}} & \cdots & \dfrac{R_{\mathring{g}_1\mathring{g}_n}(0)}{\sqrt{(D(g_1)-D^*(\varepsilon_1))\cdot(D(g_n)-D^*(\varepsilon_n))}} \\ \dfrac{R_{\mathring{g}_2\mathring{g}_1}(0)}{\sqrt{(D(g_2)-D^*(\varepsilon_2))\cdot(D(g_1)-D^*(\varepsilon_1))}} & 1 & \cdots & \dfrac{R_{\mathring{g}_2\mathring{g}_n}(0)}{\sqrt{(D(g_2)-D^*(\varepsilon_2))\cdot(D(g_n)-D^*(\varepsilon_n))}} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \dfrac{R_{\mathring{g}_n\mathring{g}_1}(0)}{\sqrt{(D(g_n)-D^*(\varepsilon_n))\cdot(D(g_1)-D^*(\varepsilon_1))}} & \dfrac{R_{\mathring{g}_n\mathring{g}_2}(0)}{\sqrt{(D(g_n)-D^*(\varepsilon_n))\cdot(D(g_2)-D^*(\varepsilon_2))}} & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

2)элементы робастной нормированной корреляционной матрицы:

$$\vec{r}^{\,R}_{\mathring{g}\mathring{\eta}}(0) = \left[\frac{R_{\mathring{g}_1\mathring{\eta}}(0)}{\sqrt{(D(g_1)-D^*(\varepsilon_1))\cdot(D(\eta)-D^*(\varphi))}} \quad \frac{R_{\mathring{g}_2\mathring{\eta}}(0)}{\sqrt{(D(g_2)-D^*(\varepsilon_2))\cdot(D(\eta)-D^*(\varphi))}} \quad \cdots \quad \frac{R_{\mathring{g}_n\mathring{\eta}}(0)}{\sqrt{(D(g_n)-D^*(\varepsilon_n))\cdot(D(\eta)-D^*(\varphi))}} \right]$$

3)определитель и число обусловленности робастной нормированной корреляционной матрицы $\vec{r}^{\,R}_{\mathring{g}\mathring{g}}(0)$. После проводился сравнительный анализ. Для этого были определены:1)величины относительных погрешностей оценок элементов нормированной матрицы зашумленных сигналов и робастной нормированной корреляционной матрицы:

$$\Delta r_{\mathring{g}_i\mathring{g}_j}(0) = \left| r_{\mathring{g}_i\mathring{g}_j}(0) - r_{\mathring{X}_i\mathring{X}_j}(0) \right| \Big/ \left| r_{\mathring{X}_i\mathring{X}_j}(0) \right| * 100\%; \quad \Delta r_{\mathring{g}_i\mathring{\eta}}(0) = \left| r_{\mathring{g}_i\mathring{\eta}}(0) - r_{\mathring{X}_i\mathring{Y}}(0) \right| \Big/ \left| r_{\mathring{X}_i\mathring{Y}}(0) \right| * 100\%$$

$$\Delta r^R_{\mathring{g}_i\mathring{g}_j}(0) = \left| r^R_{\mathring{g}_i\mathring{g}_j}(0) - r_{\mathring{X}_i\mathring{X}_j}(0) \right| \Big/ \left| r_{\mathring{X}_i\mathring{X}_j}(0) \right| * 100\%; \quad \Delta r^R_{\mathring{g}_i\mathring{\eta}}(0) = \left| r^R_{\mathring{g}_i\mathring{\eta}}(0) - r_{\mathring{X}_i\mathring{Y}}(0) \right| \Big/ \left| r_{\mathring{X}_i\mathring{Y}}(0) \right| * 100\%;$$

2) составлялись матрицы относительных погрешностей элементов нормированных корреляционных матриц зашумленных сигналов и робастных нормированных корреляционных матриц:

$$\Delta\vec{r}_{\mathring{g}\mathring{g}}(0) = \begin{bmatrix} \Delta r_{\mathring{g}_1\mathring{g}_1}(0) & \Delta r_{\mathring{g}_1\mathring{g}_2}(0) & \ldots & \Delta r_{\mathring{g}_1\mathring{g}_n}(0) \\ \Delta r_{\mathring{g}_2\mathring{g}_1}(0) & \Delta r_{\mathring{g}_2\mathring{g}_2}(0) & \ldots & \Delta r_{\mathring{g}_2\mathring{g}_n}(0) \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ \Delta r_{\mathring{g}_n\mathring{g}_1}(0) & \Delta r_{\mathring{g}_n\mathring{g}_2}(0) & \ldots & \Delta r_{\mathring{g}_n\mathring{g}_n}(0) \end{bmatrix}, \quad \Delta\vec{r}_{\mathring{g}\mathring{\eta}}(0) = \left[\Delta r_{\mathring{g}_1\mathring{\eta}}(0) \quad \Delta r_{\mathring{g}_2\mathring{\eta}}(0) \quad \ldots \quad \Delta r_{\mathring{g}_n\mathring{\eta}}(0) \right]^T;$$

$$\Delta\vec{r}^{\,R}_{\mathring{g}\mathring{g}}(0)=\begin{bmatrix}\Delta r^R_{\mathring{g}_1\mathring{g}_1}(0) & \Delta r^R_{\mathring{g}_1\mathring{g}_2}(0) & \dots & \Delta r^R_{\mathring{g}_1\mathring{g}_n}(0)\\ \Delta r^R_{\mathring{g}_2\mathring{g}_1}(0) & \Delta r^R_{\mathring{g}_2\mathring{g}_2}(0) & \dots & \Delta r^R_{\mathring{g}_2\mathring{g}_n}(0)\\ \dots & \dots & \dots & \dots\\ \Delta r^R_{\mathring{g}_n\mathring{g}_1}(0) & \Delta r^R_{\mathring{g}_n\mathring{g}_2}(0) & \dots & \Delta r^R_{\mathring{g}_n\mathring{g}_n}(0)\end{bmatrix},\ \Delta\vec{r}^{\,R}_{\mathring{g}\eta}(0)=\begin{bmatrix}\Delta r^R_{\mathring{g}_1\eta}(0) & \Delta r^R_{\mathring{g}_2\eta}(0) & \dots & \Delta r^R_{\mathring{g}_n\eta}(0)\end{bmatrix}.$$

3) вычислялась относительная величина погрешностей $p\Delta_{\mathring{g}\mathring{g}}(0)$, $p\Delta^R_{\mathring{g}\mathring{g}}(0)$ значений определителей матриц зашумленной нормированной корреляционной матрицы и робастной нормированной кореляционной матрицы. Для проверки эффективности технологии вычисления робастных нормированных корреляционных матриц, используемых при решении задач идентификации динамики, были вычислены: 1) Элементы нормированной корреляционной матрицы $\vec{r}_{\mathring{X}\mathring{X}}(\mu)$ по выражениям

$$\vec{r}_{\mathring{X}\mathring{X}}(\mu)=\begin{Vmatrix}1 & \frac{R_{\mathring{X}\mathring{X}}(\Delta t)}{D(X)} & \dots & \frac{R_{\mathring{X}\mathring{X}}[(N-1)\Delta t]}{D(X)}\\ \frac{R_{\mathring{X}\mathring{X}}(\Delta t)}{D(X)} & 1 & \dots & \frac{R_{\mathring{X}\mathring{X}}[(N-2)\Delta t]}{D(X)}\\ \vdots & \vdots & \dots & \dots\\ \frac{R_{\mathring{X}\mathring{X}}[(N-1)\Delta t]}{D(X)} & \frac{R_{\mathring{X}\mathring{X}}[(N-2)\Delta t]}{D(X)} & \dots & 1\end{Vmatrix},$$

2) элементы нормированной корреляционной матрицы $\vec{r}_{\mathring{X}\mathring{Y}}(\mu)$ по выражению: $\vec{r}_{\mathring{X}\mathring{Y}}(\mu)=\begin{bmatrix}\frac{R_{\mathring{X}\mathring{Y}}(0)}{\sqrt{D(X)\cdot D(Y)}} & \frac{R_{\mathring{X}\mathring{Y}}(\Delta t)}{\sqrt{D(X)\cdot D(Y)}} & \dots & \frac{R_{\mathring{X}\mathring{Y}}[(N-1)\Delta t]}{\sqrt{D(X)\cdot D(Y)}}\end{bmatrix}^T$, 3) определитель и число обусловленности нормированной корреляционной матрицы $\vec{r}_{\mathring{X}\mathring{X}}(\mu)$. Для зашумленного сигнала $g(t)$ вычислялись:1) элементы нормированной корреляционной матрицы $\vec{r}_{\mathring{g}\mathring{g}}(\mu)$ по выражениям:

$$\vec{r}_{\mathring{g}\mathring{g}}(\mu)=\begin{Vmatrix}1 & \frac{R_{\mathring{g}\mathring{g}}(\Delta t)}{D(g)} & \dots & \frac{R_{\mathring{g}\mathring{g}}[(N-1)\Delta t]}{D(g)}\\ \frac{R_{\mathring{g}\mathring{g}}(\Delta t)}{D(g)} & 1 & \dots & \frac{R_{\mathring{g}\mathring{g}}[(N-2)\Delta t]}{D(g)}\\ \vdots & \vdots & \dots & \dots\\ \frac{R_{\mathring{g}\mathring{g}}[(N-1)\Delta t]}{D(g)} & \frac{R_{\mathring{g}\mathring{g}}[(N-2)\Delta t]}{D(g)} & \dots & 1\end{Vmatrix}$$

2) элементы нормированной корреляционной матрицы $\vec{r}_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{\eta}}(\mu)$ по выражениям: $\vec{r}_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{\eta}}(\mu)=\left[\frac{R_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{\eta}}(0)}{\sqrt{D(g)\cdot D(\eta)}}\quad\frac{R_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{\eta}}(\Delta t)}{\sqrt{D(g)\cdot D(\eta)}}\quad\dots\quad\frac{R_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{\eta}}[(N-1)\Delta t]}{\sqrt{D(g)\cdot D(\eta)}}\right]^T$ 3) определитель и число обусловленности нормированной корреляционной матрицы $\vec{r}_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{g}}(\mu)$. После этого вычислялись робастные оценки: 1) элементы робастной нормированной корреляционной матрицы $\vec{r}^{\,R}_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{g}}(\mu)$:

$$\vec{r}^{\,R}_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{g}}(\mu)=\left\|\begin{matrix} 1 & \frac{R_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{g}}(\Delta t)}{(D(g)-D^*(\varepsilon))} & \dots & \frac{R_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{g}}[(N-1)\Delta t]}{(D(g)-D^*(\varepsilon))} \\ R_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{g}}(\Delta t) & 1 & \dots & R_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{g}}[(N-2)\Delta t]\big/[D(g)-D^*(\varepsilon)] \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{R_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{g}}[(N-1)\Delta t]}{(D(g)-D^*(\varepsilon))} & \frac{R_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{g}}[(N-2)\Delta t]}{(D(g)-D^*(\varepsilon))} & \dots & 1 \end{matrix}\right\|;$$

2)элементы робастной нормированной корреляционной матрицы $\vec{r}^{\,R}_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{\eta}}(\mu)$ по формуле (23); 3) определитель $\Delta^{R}_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{g}}(\mu)$ и число обусловленности $H\left(\vec{r}^{\,R}_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{g}}(\mu)\right)$ робастной нормированной корреляционной матрицы $\vec{r}^{\,R}_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{g}}(\mu)$. После этого проводился сравнительный анализ. Для этого были определены:1) величины относительных погрешностей оценок элементов нормированной матрицы зашумленных сигналов и робастной нормированной корреляционной матрицы.2) составлялись матрицы относительных погрешностей элементов нормированной корреляционной матрицы зашумленного сигнала и робастной нормированной корреляционной матрицы:

$$\Delta\vec{r}_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{g}}(\mu)=\begin{bmatrix} \Delta r_{\overset{\circ}{g}_1\overset{\circ}{g}_1}(\mu) & \Delta r_{\overset{\circ}{g}_1\overset{\circ}{g}_2}(\mu) & \dots & \Delta r_{\overset{\circ}{g}_1\overset{\circ}{g}_n}(\mu) \\ \Delta r_{\overset{\circ}{g}_2\overset{\circ}{g}_1}(\mu) & \Delta r_{\overset{\circ}{g}_2\overset{\circ}{g}_2}(\mu) & \dots & \Delta r_{\overset{\circ}{g}_2\overset{\circ}{g}_n}(\mu) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Delta r_{\overset{\circ}{g}_n\overset{\circ}{g}_1}(\mu) & \Delta r_{\overset{\circ}{g}_n\overset{\circ}{g}_2}(\mu) & \dots & \Delta r_{\overset{\circ}{g}_n\overset{\circ}{g}_n}(\mu) \end{bmatrix};\ \Delta\vec{r}^{\,R}_{\overset{\circ}{g}\overset{\circ}{g}}(\mu)=\begin{bmatrix} \Delta r^R_{\overset{\circ}{g}_1\overset{\circ}{g}_1}(\mu) & \Delta r^R_{\overset{\circ}{g}_1\overset{\circ}{g}_2}(\mu) & \dots & \Delta r^R_{\overset{\circ}{g}_1\overset{\circ}{g}_n}(\mu) \\ \Delta r^R_{\overset{\circ}{g}_2\overset{\circ}{g}_1}(\mu) & \Delta r^R_{\overset{\circ}{g}_2\overset{\circ}{g}_2}(\mu) & \dots & \Delta r^R_{\overset{\circ}{g}_2\overset{\circ}{g}_n}(\mu) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Delta r^R_{\overset{\circ}{g}_n\overset{\circ}{g}_1}(\mu) & \Delta r^R_{\overset{\circ}{g}_n\overset{\circ}{g}_2}(\mu) & \dots & \Delta r^R_{\overset{\circ}{g}_n\overset{\circ}{g}_n}(\mu) \end{bmatrix}.$$

В пятой главе приведены результаты вычислительных экспериментов. Первый вариант экспериментов. Входные полезные сигналы сформированы в виде суммы гармонических колебаний и для них соблюдаются классические условия. Помехи подчиняются различным законам распределения. Второй вариант экспериментов. Входные полезные сигналы сформированы в виде суммы гармонических колебаний и для них нарушаются условия. Законы распределения помех отличаются от нормального закона. Таким образом, для полезных сигналов и помех нарушаются классические условия. Проведен сравнительный анализ и сделаны следующие выводы.1) оценки дисперсий помех зашумленных сигналов вычисленные по предложенным в диссертации выражениям, практически совпадают с оценками дисперсий помех, заданными в экспериментах;2) оценки нормированных корреляционных функций зашумленных сигналов сильно отличаются от оценок нормированной корреляционной функции полезных сигналов;3) величины относительных погрешностей оценок нормированных корреляционных функций зашумленных сигналов колеблются 8%-30% и выше; 4) робастные оценки нормированных корреляционных функций практически совпадают с оценками нормированных корреляционных функций полезных сигналов;5) величины относительных погрешностей оценок робастных оценок нормированных корреляционных функций практически равны нулю или уменьшаются с 26-30% до 5-6% даже в том случае, когда нарушаются классические условия. Таким образом, применение разработанной робастной технологии позволяет получить робастные оценки нормированных корреляционных функций. Проведены вычислительные эксперименты для решения задачи идентификации. Сравнительный анализ позволил сделать следующие выводы.1)Оценки элементов нормированной корреляционной матрицы зашумленных сигналов сильно отличаются от оценок элементов нормированной корреляционной матрицы полезных сигналов. Однако робастные оценки элементов нормированной корреляционной матрицы зашумленных сигналов соизмеримы с оценками элементов нормированной корреляционной матрицы полезных сигналов;2)Значения элементов матрицы относительных погрешностей нормированной корреляционной матрицы зашумленных входных сигналов значительно превышают значения элементов матрицы относительных погрешностей робастной нормированной корреляционной матрицы.3)Значение числа обусловленности нормированной корреляционной матрицы зашумленных сигналов значительно отличается от значения числа обусловленности нормированной корреляционной матрицы полезных сигналов. Значение числа обусловленности робастной нормированной корреляционной матрицы практически совпадает со значением числа обусловленности нормированной корреляционной матрицы полезных сигналов.4)Значение определителя нормированной корреляционной матрицы зашумленных сигналов сильно отличается от значения определителя нормированной корреляционной матрицы полезных сигналов. Значение же определителя робастной нормированной корреляционной матрицы, построенной на основе разработанной технологии, практически совпадает со значением определителя нормированной корреляционной матрицы полезных сигналов. Таким образом, применение разработанной технологии позволяет улучшить обусловленность нормированных корреляционных матриц.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Определена величина погрешности оценок нормированных корреляционных функций зашумленных сигналов, состоящих из суммы полезных сигналов и помех, как при нарушении, так и соблюдении таких классических условий, как нормальность закона распределения, стационарность, отсутствие корреляции между полезным сигналом и помехой и т.д.
2. Предложены алгоритмы, технологии и программные средства, позволяющие получить такие робастные оценки нормированных корреляционных функций зашумленных сигналов, которые как при нарушении, так и соблюдении классических условий максимально приближаются к оценкам нормированных корреляционных функций полезных сигналов.
3. Предложены алгоритмы, технологии и программные средства, позволяющие получить робастные нормированные корреляционные матрицы входных и входных-выходного зашумленных сигналов, используемых при решении задач идентификации технологических процессов, совпадающие с нормированными корреляционными матрицами полезных сигналов.
4. Создан пакет программ вычисления робастных оценок нормированных корреляционных функций и робастных нормированных корреляционных матриц. Проведены многочисленные вычислительные эксперименты, подтверждена эффективность разработанных алгоритмов.

Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях:

1. T.A.Alizada, U.M.Mammadova, U.E.Rzayeva. Software for correction of Fourier coefficients of harmonics containing white noisy//Transactions of ANAS. Vol.3, 2005, Baku, pp.71-77.

2. T.A.Alizada, U.M.Mammadova, U.E.Rzayeva. Software for modelling and the spectral analysis of harmonics with correlating noise//Transactions of ANAS. Vol.3 2005, Baku, pp. 77- 83.
3. Н.Ф.Мусаева, Д.И.Масталиева, У.Э.Рзаева. Алгоритмы улучшения оценки коэффициента корреляции между зашумленными сигналами при нарушении классических условий//Известия НАН Азерб.,сер. Физ.техн. и мат.наук, Информатика и проблемы управления, т.XXV, №3, 2005, с. 60-65.
4. Н.Ф.Мусаева, Д.И.Масталиева, У.Э.Рзаева. Технология синхронного мини-кодирования многомерных сигналов//Известия НАН Азерб., сер. Физ. техн. и мат. наук, информатика и проблемы управления, т.XXV, №3, 2005, с. 66-70.
5. Н.Ф.Мусаева, Д.И.Масталиева, У.Э.Рзаева. Экспериментальные исследования методов конфлюэнтного анализа с помощью робастных оценок//Известия НАН Азерб., сер. Физ. техн. и мат. наук, информатика и проблемы управления, т. XXVI, №3, 2006, с. 133-138.
6. T.A.Alizada, U.M.Mammadova, U.E.Rzayeva. Information technology of vibromonitoring and diagnostics of offshore oil platforms using multispectral method//The international conference «Problems of cybernetics and informatics» Vol.1 October 24-26, 2006, Baku, Azerbaijan, pp. 33-37.
7. Т.А.Алиев, Э.Р.Алиев, Д.И.Масталиева, У.Э.Рзаева. Адаптивная аппаратно-программная технология дискретизации зашумленных сигналов//IV Beynəlxalq simpozium «Fövqəladə hallarda təhlükəsizliyin idarə olunması», 15-16 noyabr, Bakı, 2007, s. 94-96.
8. Musaeva N.F., Aliev E.R., Mastaliyeva D.I., Rzayeva U.E. Correlation Indicators of failures origin. Natural cataclysms and Global problems of the modern civilization. Special edition of Transactions of the International Academy of Science H & E, Baku-Innsbruck-2007, pp.600-603
9. Э.Р.Алиев, Д.И.Масталиева, У.Э.Рзаева. Адаптивная аппаратно-программная технология дискретизации зашумленных сигналов//Известия НАН Азерб.,сер.Физ.техн. и мат.наук,т. XXVII, №2-3, 2007, с.162-167.
10. Т.А.Алиев, Е.Р.Алиев, Р.М.Кадымов, У.Э.Рзаева. Теоретические и прикладные проблемы анализа зашумленных сигналов. İnformasiya-kommunikasiya texnologiyaları və elektron təhsillin aktual problemləri Elektron idarəetmə. Elmi-praktik konfransın materialları, 29-30 noyabr, Gəncə, 2007, s.3-15

11. Т.А.Алиев, Э.Р.Алиев, Д.И.Масталиева, У.Э.Рзаева. Цифровая помехотехнологии анализа корреляционных сигналов//Известия НАН Азерб., сер. Физ. техн. и мат. наук, т. XXVII, №2-3, 2007, с.134-138.
12. T.A.Aliev, E.R.Aliev, D.I.Mastaliyeva, U.E.Rzayeva Adaptive technology of discretization of noisy signals//Automatic Control and Computer Sciences,Allerton Press,Inc.,New York 2008, Vol. 42,No.1, pp.20–25.
13. E.R.Aliev, N.F.Musaeva, R.M.Gadimov, D.İ.Mastalieva, U.E.Rzayeva. System of monitoring high-altitude buildings with intellectual block of identification of abnormal seismic processes//The second international conference "Problems of Cybernetics and Informatics", 2008, Dedicated to the 50th Anniversary of the ICT in Azerbaijan, pp.86-88.
14. T.A.Aliev, E.R.Aliev, D.I.Mastaliyeva, U.E.Rzayeva Интеллектуальная система идентификации аномальных сейсмических процессов//Восьмой Международный Симпозиум «Интеллектуальные системы», 30 июня - июля, Нижний Новгород, 2008, стр. 560-563.
15. T.A.Alizade, U.E.Rzayeva, Method for estimating the correlated noise variance using position-witdh-impulse-analisis. Transactions of ANAS. Vol.XXVIII,#3, 2008, Baku, pp.146-151
16. У.Э.Саттарова. Результаты вычислительных экспериментов по определению робастных оценок нормированных корреляционных функций//Известия НАН Азерб., сер. Физ. техн. и мат. наук, т.XXIX, №3, 2009, с.91-96.
17. Н.Ф.Мусаева, Д.И.Масталиева У.Э.Саттарова. Аппаратурные способы устранения временного сдвига, возникающего между отсчетами при аналого-цифровом преобразовании многомерных сигналов. Известия НАН Азерб., сер.Физ.техн. и мат.наук,т.XXIX,№ 6, 2009, с.109-113
18. У.Э.Саттарова, И.Р.Саттаров, Н.Э.Рзаева. Технология проведения вычислительных экспериментов для вычисления робастных оценок нормированных статистических характеристик параметров строительных конструкций//İnşaatın müasir problemləri və həll yolları elmi praktiki konfransın materialları, 2009, 178-180.
19. T.A.Aliev, N.F.Musaeva, U.E.Sattarova. Robust technologies for calculating normalized correlation functions//Cybernetics and Systems Analysis, New-York,Vol. 46, No. 1, 2010, pp. 153-166.

Личный вклад соискателя в трудах, опубликованных в соавторстве: [1-19] – Разработка алгоритмов и программных средств, проведение вычислительных экспериментов.

SƏTTAROVA ÜLKƏR ELDAR QIZI

İDENTİFİKASİYA MƏSƏLƏLƏRİNİN HƏLLİ ÜÇÜN ROBAST NORMALLAŞMIŞ KORRELYASİYA FUNKSİYALARIN VƏ MATRİSLƏRİN HESABLANMA ALQORİTMLƏRİ, TEXNOLOGİYALARI VƏ PROQRAM VASİTƏLƏRİ

Xülasə

Dissertasiyada identifikasiya məsələlərinin həlli üçün küyün təsirini aradan qaldırmağa yönəlmiş robast normallaşmış korrelyasiya funksiyaların və robast normallaşmış korrelyasiya matrislərin hesablanma alqoritmləri, texnologiyaları və proqram vasitələr təklif olunur. Bunun sahəsində monitorinq, kontrol, diaqnostika, proqnoz, idarəetmə, identifikasiya və s. kimi məsələlərin həlli zamanı əmələ gələn ciddi maneələrin aradan qaldırılması mümkünatı göstərilir.

Dissertasiyada aşağıdakı alqoritmlər, texnologiyalar və proqram vasitələri işlənilib: klassik qaydaların müxtəlif pozulma zamanı faydalı siqnallarla küyün cəmindən ibarət olan küylü siqnalın küyünün dispersiyasının kəmiyyətlərinin hesablanması, faydalı siqnalların normallaşmış avto və qarşılıqlı korrelyasiya funksiyalarının qiymətlərinə maksimal yaxınlaşan küylü siqnalların normallaşmış avto və qarşılıqlı korrelyasiya funksiyalarının robast qiymətlərinin hesablanması, texnoloji proseslərin statikasının və dinamikasının identifikasiya məsələlərinin həlli zamanı istifadə olunan və faydalı siqnalların normallaşmış korrelyasiya matrislərin elementləri ilə üst üstə düşən robast normallaşmış korrelyasiya matrislərin formalaşması. Nəzəri hesablamaların dürüstlüyünü təsdiqi etmək üçün alınan nəticələrin hesablama eksperimentləri və müqayisə analizi aparılıb.

SATTAROVA ULKAR ELDAR

ALGORITHMS, TECHNOLOGIES AND SOFTWARE FOR CALCULATION OF ROBUST NORMALIZED CORRELATION FUNCTIONS AND MATRICES FOR SOLVING OF IDENTIFICATION PROBLEMS

Summary

The paper offers algorithms, technologies and software for calculation of robust normalized correlation matrices for solving of identification problems aimed at eliminating noise effect. It is demonstrated that this makes it possible to eliminate serious obstacles in solving of such important problems as monitoring, control, diagnostics, forecasting, management, identification, etc.

The following algorithms, technologies and software are developed in the thesis: calculation of values of noise variance of noisy signals, which is the sum of the useful signal and the noise under different types of violation of classical conditions; calculation of robust estimates of normalized auto- and cross-correlation functions of noisy signals, which are maximally approximated to the estimates of normalized auto- and cross-correlation functions of useful signals; formation of robust normalized correlation matrices used in static and dynamic identification problems of technological processes, elements of which coincide with elements of normalized correlation matrices of useful signals. Computational experiments and comparative analysis of obtained results have been carried out to support the reliability of the theoretical part.

Заказ 317 Тираж 100

Участок подготовки информационных материалов

Институт Кибернетики НАН Азербайджана

Г. Баку, ул. Б.Вахабзаде, 9

.

AZƏRBAYCAN MİLLİ ELMLƏR AKADEMİYASI
Akademik Ə.İ.HÜSEYNOV adına KİBERNETİKA İNSTİTUTU

Əlyazması hüququnda

SƏTTAROVA ÜLKƏR ELDAR QIZI

İDENTİFİKASİYA MƏSƏLƏLƏRİNİN HƏLLİ ÜÇÜN ROBAST NORMALLAŞMIŞ KORRELYASİYA FUNKSİYALARIN VƏ MATRİSLƏRİN HESABLANMA ALQORİTMLƏRİ, TEXNOLOGİYALARI VƏ PROQRAM VASİTƏLƏRİ

3338.01– Sistemli analiz, idarəetmə və
informasiyanın işlənməsi

Texnika elmləri üzrə fəlsəfə doktoru alimlik dərəcəsi
almaq üçün təqdim olunmuş dissertasiyanın

AVTOREFERATI

BAKI - 2013