

Mathematical Programming. Recent Developments and Applications / Edited by M. Iri, K. Tanabe. Kluwer Academic Publisher, 1989. P. 83–108.

9. **ГОСТ 6651–2009.** Термопреобразователи сопротивления из платины, никеля, меди и никеля.

10. **МЭК 60751:2008.** Термометры сопротивления промышленные платиновые и платиновые температурные датчики.

Дата принятия: 13.06.2017.

629.7.05.621.398

Фильтрация измерительных данных при структурно-алгоритмических преобразованиях

В. И. КУЗНЕЦОВ, С. С. КУКУШКИН

Федеральный центр науки и высоких технологий «Специальное научно-производственное объединение «Элерон», Москва, Россия, e-mail: info@eleron.ru

Представлены результаты исследований нетрадиционного представления данных образами-остатками при различных вариантах их вхождения в состав слов-измерений. Исследовано влияние зашумляющей помехи на информативность выборки данных телеизмерений. Показан уровень влияния искажений при реализации различных структур формирования передаваемых сообщений. Рассмотрены варианты применения методов фильтрации в решении задач обработки и анализа данных о результатах измерений. Описана возможность повышения временной плотности контроля измеряемого параметра, уменьшения погрешностей оценок, получаемых из анализа данных о результатах измерений, предъявлены требования к пропускной способности канала передачи данных.

Ключевые слова: информация, искажение, помеха, потери, телеметрия.

The results of the study of non-traditional presentation of data images of residues in different variants of its entry into the word-dimensions. The effect of noise on the information content of the sample data telemetry. It shows the level of influence of distortions in the implementation of the various structures of formation of the transmitted messages. Reviewed applications of filtering techniques in solving problems of processing and analysis of measurement data. The possibility of obtaining a number of advantages: a temporary increase in the density control parameter being measured, reducing error estimates obtained from the analysis of measurement data, the immutability of the requirements for data throughput of the channel.

Key words: information, distortion, noise, losses, telemetry.

Повышение сложности функционирования современных технических средств и комплексов, рост числа нештатных ситуаций и аварий при их эксплуатации приводит к необходимости совершенствования систем телеизмерений, увеличению числа контролируемых параметров и событий. В результате растут объёмы данных и скорости их передачи по каналам связи. При ограниченной пропускной способности радиоканалов передачи данных это приводит к ухудшению показателей достоверности получаемой измерительной информации. Возникающее противоречие ещё более обостряется при наличии помех, количество источников которых только увеличивается. Возможности традиционных методов, которые можно было бы использовать для противодействия подобным кризисным явлениям, не безграничны. Поэтому нужны новые резервы для разрешения отмеченного противоречия. Возможности их поиска, как показали ранее проведённые исследования, определяются уровнем разработки прикладных математических методов и

расширенным внедрением этих методов в практику. Такую возможность предоставляет конструктивная теория конечных полей, которая является модифицированным вариантом одноимённой классической теории Э. Галуа, но при этом лишена многих её недостатков [1, 2]. В настоящее время существуют многочисленные результаты апробации нового математического аппарата для формирования информационных сообщений, передачи, обработки и комплексного анализа измерительных данных, ориентированные на применение с учётом особенностей реализуемых на практике процессов эксплуатации технических средств и комплексов.

В последние годы наиболее востребованы в практике телеизмерений и передачи информации методы структурно-алгоритмических преобразований (САП) цифровых сообщений. Данные методы базируются на выводах и практических рекомендациях конструктивной теории конечных полей [1]. Их основу составляют образы-остатки (b_i), $i \in (1, n)$, которые получаются при делении исходных значений параметров (y)

на определённым образом выбранные модули сравнения $(m_i), i \in (1, n)$ [1], т. е.

$$y_i \equiv b_i (\text{mod } m_i), i \in (1, n).$$

Актуальность этого направления обусловлена, прежде всего, потребностями использования больших объёмов данных измерений при решении различных задач контроля и управления в условиях повышенной неопределённости. Такая неопределённость возникает из-за возмущений, которые воздействуют на контролируемые объекты и приводят к появлению искажений при передаче информации. В настоящее время наблюдается обострение противоречий между практическими потребностями, которые заключаются в повышении полноты контроля, точности и качества управления и приводят к необходимости увеличения объёмов передаваемых данных, и ограниченными возможностями каналов связи, связанными с их пропускной способностью. Одна из причин усугубления данных разногласий заключается в том, что возможности радиоканалов не беспредельны, а ограничены физическими законами передачи информации, поэтому повышение скорости информационного обмена существенно ограничивает временной резерв, за счёт которого ранее предъявляемые требования удовлетворялись. Высокая скорость передачи информации требует, чтобы и осуществляемые при этом САП были быстродействующими: затраченное время не должно превышать временной интервал, определяемый периодом опроса значений телеметрируемого параметра. Поэтому основная доля корректирующих способностей телеметрического комплекса, позволяющая очищать содержательную информацию от помех, принадлежит системам обработки информации, что приводит к необходимости совершенствования методов обработки и анализа измерительных данных, подверженных САП. Один из эффективных подходов для разрешения возникающего противоречия – применение методов САП цифровых сообщений для их сжатия и повышения помехоустойчивости [2]. Кроме того, применение методов САП позволит извлекать дополнительные преимущества и на последующих этапах обработки и анализа данных.

В настоящей статье приведены результаты исследований, относящихся к применению САП измерительной информации при решении задач обработки и комплексного анализа данных с использованием методов динамической фильтрации. Ориентация на динамическую фильтрацию связана с тем, что в большинстве практических задач обработка и анализ информации выполняются в отношении систем или процессов, относящихся к классу динамических, т. е. таких, функционирование или протекание которых рассматривается во временной области [3].

Следует отметить, что теоретическую основу методов оптимальной динамической фильтрации составляет фильтр Калмана [4], различные реализации которого ориентированы на решение конкретных практических задач, в том числе, в условиях априорной неопределённости параметров

информационной обстановки. К ним относятся следующие неопределённости: параметров распределения случайных возмущений в уравнениях моделей состояний; случайной помехи в уравнениях измерений; объёма и качества данных о результатах измерений [5].

В общем виде уравнения фильтрации в отношении динамической системы для заданных начальных условий $x(t_0) = x_0$, матрицы ковариаций этого вектора $K_x(t=0) = K_{x,0}$ и ковариационной матрицы случайных возмущений K_w определяются моделью состояний

$$x(t_k) = F(t_k/t_{k-1})x(t_{k-1}) + G(t_k/t_{k-1})w(t_{k-1}), \quad (1)$$

где $x(t_k) = (x_1(t_k), x_2(t_k), \dots, x_n(t_k))^T$ – вектор состояний размерности n ; $F(\cdot)$, $G(\cdot)$ – переходные матрицы состояний $x(\cdot)$ и возмущений $w(\cdot)$, соответственно; $t_k \in T \subset \mathbb{R}$ – дискретный момент времени с индексом k .

Уравнение измерений описывается следующей моделью:

$$y(t_k) = h(t_k)x(t_k) + v(t_k), \quad (2)$$

где $h(\cdot)$ – матрица измерений; $v(\cdot)$ – случайная зашумляющая помеха с нулевым средним $M\{v\} = 0$ и ковариационной матрицей $\text{cov}\{\|v\|^2\} = K_v$.

В результате применения моделей (1), (2) можно получить зависимости, используемые для решения следующих задач:

прогнозирования вектора состояния

$$x(t_k/t_{k-1}) = F(t_k/t_{k-1})x(t_{k-1})$$

и его ковариационной матрицы

$$K_x(t_k/t_{k-1}) = F(t_k/t_{k-1})K_x(t_{k-1})F^T(t_k/t_{k-1}) + G(t_k/t_{k-1})K_w(t_{k-1})G^T(t_k/t_{k-1});$$

расчёта матричного коэффициента усиления фильтра

$$\gamma_x(t_k) = K_x(t_k/t_{k-1})h^T(t_k) \times [h(t_k)K_x(t_k/t_{k-1})h^T(t_k) + K_v(t_k)]^{-1};$$

определения отклонения прогнозируемой оценки от измеренных значений

$$\varepsilon(t_k/t_{k-1}) = y(t_k) - h(t_k)x(t_k/t_{k-1});$$

вычисления текущей оценки вектора состояний

$$x(t_k) = x(t_k/t_{k-1}) + \gamma_x(t_k)\varepsilon(t_k/t_{k-1})$$

и ковариационной матрицы погрешностей оценок

$$K_x(t_k) = [I - \gamma_x(t_k)h(t_k)]K_x(t_k/t_{k-1}).$$

Представленные уравнения фильтрации подводят к выводу, что основные трудности их реализации при непосредственном использовании результатов измерений, подверженных САП (без обратных преобразований результатов измерений, т. е. без приведения в исходным представлениям), связаны с необходимостью однозначной интерпретации отклонений прогнозируемой оценки вектора состояний от измеренного значения. Формально такое уравнение следует записать в виде:

$$\tilde{\varepsilon}(t_k/t_{k-1}) = b(t_k) - h(t_k)x(t_k/t_{k-1}). \quad (3)$$

Из соотношения (3) возникает необходимость введения отображения, переводящего отклонения $\tilde{\varepsilon}(\cdot)$ в требуемые значения $\varepsilon(\cdot)$ ($\varphi: \tilde{\varepsilon}(\cdot) \rightarrow \varepsilon(\cdot)$), которые появляются при нетрадиционном кодировании данных образами-остатками, полученными в результате сравнений исходных значений $y(t_k)$ по модулю m .

Такое отображение можно представить как

$$\varphi: \begin{cases} \varepsilon_j(t_k) = \tilde{\varepsilon}_j(t_k), & \text{если } |\tilde{\varepsilon}_j(t_k)| < \text{int}(m/2); \\ \varepsilon_j(t_k) = \tilde{\varepsilon}_j(t_k) - \text{sign}(\tilde{\varepsilon}_j(t_k))m, & \text{если } |\tilde{\varepsilon}_j(t_k)| \geq \text{int}(m/2). \end{cases} \quad (4)$$

Отображение (4) позволяет учесть особенности циклического перевода значений измеряемого параметра при вычислении его остатка по модулю m . Данное отображение отличается простотой и может быть встроено непосредственно в уравнения фильтрации.

Другой вариант преобразований, который не требует перевода отклонений $\tilde{\varepsilon}(\cdot)$ в их действительные значения $\varepsilon(\cdot)$, можно рассматривать в отношении модели измерений, общий вид которой должен быть представлен с учётом выполняемых САП:

$$y(t_k) \equiv b(t_k) = [h(t_k)x(t_k) + v(t_k)](\text{mod } m). \quad (5)$$

В этом случае определение отклонения прогнозируемой оценки от измеренного значения будет описываться соотношением

$$\varepsilon(t_k/t_{k-1}) = b(t_k) - [h(t_k)x(t_k/t_{k-1})](\text{mod } m),$$

что не требует применения дополнительного отображения, рассмотренного ранее.

Можно отметить, что второй вариант преобразований (5) позволяет реализовать более лаконичные алгоритмы фильтрации, поскольку обеспечивает возможности использования данных о результатах измерений, подверженных САП, непосредственно и в том виде, который они приобрели после выполненных преобразований, что не требует введения алгоритмов обратных САП. Это означает, что регистрация принятых данных осуществляется в том виде, в котором они поступили, без декодирования экономных безызычных кодов, применяемых для передачи информации.

В практическом плане представляют интерес возможные варианты использования методов фильтрации при решении задач обработки и анализа данных, подвергнутых САП.

Среди них можно выделить следующие базовые варианты:

данные от одного измерительного цифрового датчика преобразуются в единственный остаток от деления по модулю, размещённый в одном информационном слове;

данные от одного измерительного цифрового датчика преобразуются в несколько модулей-остатков (образуя систему остаточных классов), размещённых в одном информационном слове, т. е. реализуется когерентный результат измерений;

результаты измерений одного и того же параметра от нескольких цифровых измерительных датчиков преобразуются в модули-остатки по каждому измерению отдельно и размещаются в одном информационном слове, т. е. реализуется некогерентный результат измерений.

Возможны и другие варианты, определяемые выбранным способом комбинирования преобразованных результатов измерений при формировании цифровых групповых сигналов, которые используют для последующей модуляции видео- и радиосигналов. Однако все они не выходят за пределы существующих внешних структур представления данных $S_{\text{внш}}$ и замещают эти структуры, образуя вторую ступень структурной организации, которую называют внутренней структурой данных $S_{\text{внт}}$. Поэтому подобные варианты можно рассматривать в качестве основных.

Для представленных выше вариантов преобразования данных о результатах измерений возможно достижение различных положительных эффектов. Они классифицируются как общие и частные. К числу общетеоретических новых результатов можно отнести:

применение системы остаточных классов для экономного помехоустойчивого кодирования и повышения эффективности вычислений за счёт перехода к независимым информационным и вычислительным элементам малой разрядности их представления. При этом система измерений, передачи информации или компьютер работают лишь с ограниченными по величине данными;

использование внутренних структур представления данных $S_{\text{внт}}$, когда такие структуры по разрядности представления могут не отличаться от заданных или уже имеющихся внешних структур представления информации $S_{\text{внш}}$. Такое решение позволяет повысить эффективность систем и комплексов измерений, не изменяя алгоритмы функционирования их аппаратной части. В то же время не всегда аппаратура, в том числе морально устаревшая, может быть модернизирована за счёт внедряемых программных средств с обеспечением требуемых результирующих (эквивалентных) показателей её эффективности.

Также можно получить множество частных результатов, имеющих значительную научную и практическую значимость. По отношению к примерам формирования внутренних структур представления данных $S_{\text{внт}}$ частные результаты могут заключаться в следующем:

для первого варианта формирования $S_{\text{внт}}$ когда данные от одного датчика преобразуются в остаток от деления по одному модулю сравнения m и размещаются в одном информационном слове, основной эффект проявляется в том, что достигается уменьшение объёма передаваемых данных;

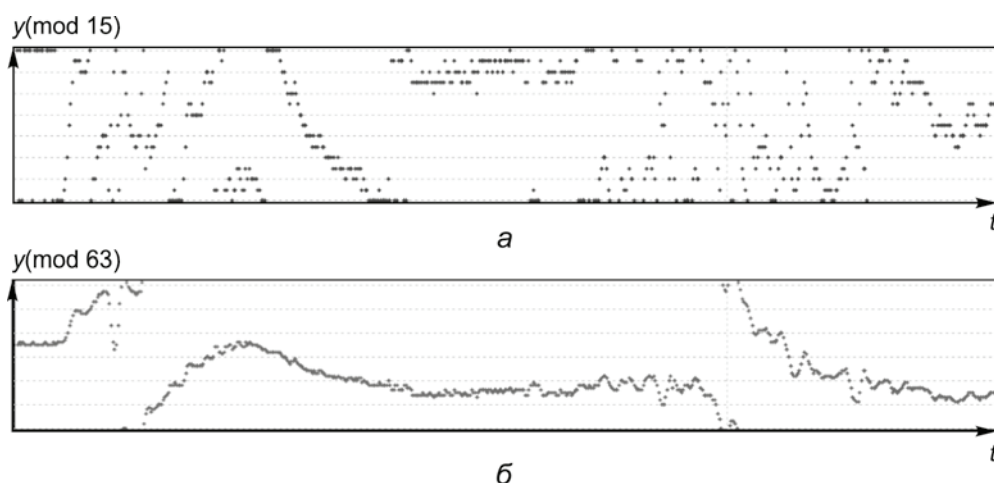


Рис. 1. Графики результата измерений одного и того же параметра, представленного образами-остатками двумя измерительными датчиками с последующим преобразованием полученных результатов измерений в остатки от деления по модулям сравнения 15 (а) и 63 (б) и формированием одного 10-разрядного слова

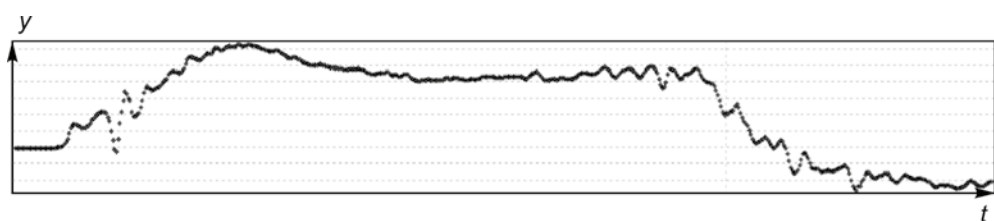


Рис. 2. Полученная в результате применения метода адаптивной фильтрации оценка значений параметра:
y – результат измерений; t – время

для второго варианта формирования $S_{\text{внт}}$, когда измерительные данные от одного датчика преобразуются в несколько остатков от деления по модулям сравнения $m_1, \dots, m_n$, т. е. систему остаточных классов, и размещаются в одном информационном слове, основной эффект заключается в том, что измеряемая реализация значений параметра передаётся более одного раза: столько раз, сколько остатков от сравнения по модулям размещено в информационном слове. В результате реализуется режим формирования когерентного результата измерений;

для третьего варианта формирования $S_{\text{внт}}$, когда результаты измерений одного и того же параметра от нескольких датчиков преобразуются в остатки от деления по нескольким модулям сравнения $m_1, \dots, m_n$ и по каждому измерению отдельно, при этом все они размещаются в одном информационном слове, основной эффект заключается в том, что достигается возможность передачи большего количества измерений без увеличения пропускной способности канала передачи данных. В результате реализуется режим формирования некогерентного результата измерений, что полезно с точки зрения обработки полученных данных при их приеме.

Исходя из практических потребностей наиболее ценным представляется третий вариант, реализация которого обеспечивает:

повышение временной плотности контроля измеряемого

параметра, поскольку опрос измерительных датчиков, как правило, производится в различные моменты времени;

уменьшение погрешностей оценок, получаемых из анализа данных о результатах измерений, поскольку обеспечивается увеличение объема данных, привлекаемых к анализу;

неизменность требований к пропускной способности канала передачи данных, так как передаче подлежат не полные слова от каждого отдельного измерительного датчика, а только остатки от соответствующих модулей сравнения.

Ниже приведены некоторые результаты экспериментальных исследований. На рис. 1 представлены графики результатов измерений одного и того же параметра двумя измерительными датчиками с последующим преобразованием результатов измерений в остатки от деления по модулям сравнения 15 и 63 и формированием одного 10-разрядного слова. Найденная в результате применения метода адаптивной фильтрации [5] оценка значений параметра

представлена в виде графика на рис. 2. Из сравнения дисперсий погрешностей оценок, полученных при традиционной передаче и при объединении образов-остатков в подобное по разрядности слово, следует, что качество информации выше во втором случае. Аналогичные эксперименты проведены и для других измеряемых параметров, отличающихся, в частности, частотными свойствами.

Закключение. Совместное применение методов САП цифровых сообщений (телеметрических данных) для сжатия и повышения помехоустойчивости этих сообщений с последующей фильтрацией без выполнения обратных САП позволяет получить дополнительные преимущества на последующих этапах обработки и анализа данных о результатах измерений в зависимости от того или иного варианта их преобразования. К таким преимуществам можно отнести уменьшение объема передаваемых данных, многократную передачу измеряемой реализации значений параметра, увеличение количества передаваемых измерений без повышения пропускной способности канала передачи данных.

Отметим, что исходя из практических соображений наиболее оправданным представляется вариант, когда результаты измерений одного и того же параметра от нескольких цифровых измерительных датчиков преобразуются в остатки от деления по модулям сравнения для каждого измерения

отдельно и размещаются в одном информационном слове-измерении. Реализация этого варианта обеспечивает:

повышение временной плотности контроля измеряемого параметра;

уменьшение погрешностей оценок, получаемых из анализа результатов измерений;

неизменность требований к пропускной способности канала передачи данных.

Л и т е р а т у р а

1. **Кукушкин С. С.** Теория конечных полей и информатика. Т. 1. Методы и алгоритмы, классические и нетрадиционные, основанные на использовании конструктивной теоре-

мы об остатках. М.: МО РФ, 2003.

2. **Макклеллан Дж., Рейдер Ч.** Применение теории чисел в цифровой обработке сигналов / Перевод с английского. М. Радио и связь, 1983.

3. **Калман Р., Фалб П., Арбиб М.** Очерки по математической теории систем / Перевод с английского. М.: Мир, 1971.

4. **Сейдж Э., Мелс Дж.** Теория оценивания и её применение в связи и управлении / Перевод с английского. М.: Связь, 1976.

5. **Кузнецов В. И.** Статистическая идентификация. Адаптивная фильтрация // Промышленные АСУ и контроллеры. 2014. № 7. С. 20–27.

Дата принятия: 22.09.2017.

ИЗМЕРЕНИЯ В ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

656.25+06

Аналитический синтез адаптивного фильтра Калмана на основе нерегулярных точных измерений

С. В. СОКОЛОВ, М. В. ПОЛЯКОВА, П. А. КУЧЕРЕНКО

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
Ростов-на-Дону, Россия, e-mail: poliakova.marianna@yandex.ru

Аналитически решена задача построения адаптивного дискретного фильтра Калмана с использованием нерегулярных точных измерений. Показано, что возможность нерегулярных точных измерений позволяет в такте их появления точно определять параметры фильтра (коэффициент усиления и коэффициент адаптации), обеспечивающие нулевую погрешность оценивания. Подобная перестройка параметров алгоритма оценивания резко увеличивает его сходимость.

Ключевые слова: нерегулярные точные измерения, комплексированные измерительные системы, адаптивный фильтр Калмана, коэффициент усиления, коэффициент адаптации.

The problem of creation of the adaptive discrete filter of Kallman with use of irregular exact measurements is analytically solved. The possibility of irregular exact measurements allows to determine precisely in a step of their emergence filter parameters (coefficient of strengthening and coefficients of his adaptation) providing a zero error of estimation. Similar reorganization of parameters of an algorithm of estimation sharply increases his convergence that is illustrated by the corresponding example.

Key words: irregular exact measurements, kompleksirovanny measuring systems, adaptive filter of Kallman, strengthening coefficient, adaptation coefficient.

Основой построения различных комплексированных измерительных систем является коррекция первичных измерений датчиков, погрешности которых растут со временем, по некоторым другим измерениям, выступающих в качестве эталонных. Коррекция, как правило, производится через некоторые, не всегда одинаковые (зачастую случайные) интервалы времени, превышающие такт первичных измерений. Необходимость повышения точности оценивания фазовых переменных объекта за счёт точных результатов измерений, полученных в некоторые произвольные моменты времени,

возникает во многих технических системах. Среди них можно отметить:

инерциально-спутниковые навигационные системы, в которых осуществляется коррекция результатов измерений инерциальной системы, погрешности которой растут со временем, по измерениям спутниковой системы, выступающей в качестве эталонной [1, 2];

системы, оценивающие навигационные параметры робота (или человека) с учётом нулевой скорости в момент касания ступни (или нижней точки колеса) поверхности земли [3];