



На правах рукописи

ПАЛЬЧИК Олег Викторович

**ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ ПЕРВИЧНОЙ ОБРАБОТКИ  
СИГНАЛОВ ЛАЗЕРНЫХ ТРИАНГУЛЯЦИОННЫХ  
ИЗМЕРИТЕЛЕЙ**

05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие системы  
(в технических системах)

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Рязань 2006

Работа выполнена на кафедре радиотехнических систем  
Рязанского государственного радиотехнического университета.

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент  
Андреев В.Г.

Официальные оппоненты: д-р техн. наук, профессор  
Костров В.В.,

канд. техн. наук, доцент  
Виноградов А.Л.

Ведущая организация: Всероссийский научно-  
исследовательский конструкторско-  
технологический институт (ВНИКТИ)

Защита состоится «09» февраля 2007 г. в 12 часов на заседании  
диссертационного совета Д212.211.04 в Рязанском государственном ра-  
диотехническом университете по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина,  
59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Рязан-  
ского государственного радиотехнического университета.

Автореферат разослан «25» 12 2006 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доцент, к.т.н.



Борисов А.Г.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В технике часто поднимается вопрос оценки геометрических параметров для решения задач технической диагностики и неразрушающего контроля. При этом исследователи и разработчики измерительных систем обычно ориентируются на три основных принципа бесконтактной (оптической) регистрации в измерительных процессах: интерференционный, теневой и триангуляционный.

Сенсоры, основанные на использовании интерференции (например, коноскопические приборы), обладают высокой точностью. Однако для достижения потенциальных возможностей интерферометров требуются точное позиционирование и предсказуемая форма поверхности объекта (кривизна поверхности, её шероховатость). Кроме того, характерна проблема позиционирования сенсоров, когда незначительное его смещение приводит к отражению луча в сторону от приёмника. Сходная проблема и у теневых сенсоров, использующих эффект дифракции Фраунгофера.

Поэтому часто единственно возможным средством является применение лазерной триангуляции, что подтверждается многочисленными публикациями в нашей стране (например, фирм «Агроэл», КТИ СО РАН), и за рубежом (Optical Metrology Center, Великобритания; MEL Mikroelektronik, Германия; LMI Technologies, США; MTI Instruments, США), посвящёнными промышленному применению триангуляционных систем. Однако научная сторона этого вопроса, как правило, остаётся открытой: скромный математический аппарат, недостаточное число обобщающих выводов и рекомендаций не дают возможности решать ряд специфических задач, возникающих на предприятиях железнодорожной отрасли. К таким задачам в первую очередь относится оценка геометрических параметров движущихся объектов (как, например, колёс вагонов), а также объектов с различной отражающей способностью поверхности (колёса и обрабатываемые механически и наплавкой литьевые элементы вагонной тележки, тормозного и рессорного узлов вагонов).

Сложности связаны с отсутствием анализа возникающих погрешностей на этапе первичной обработки и низкой точностью применяемых вычислительных алгоритмов (под первичной обработкой понимаются задачи оценки положения и ширины лазерного «пятна» на фотоприёмнике – одиночного видеоимпульса – и при калибровке измерителей). Следует отметить, что в известных исследованиях их авторы оперируют с недостаточно обоснованными моделями сигналов (как правило, гауссианой, не учитывающей абберации изображения, формируемого на фотоприёмнике); оптимальные и квазиоптимальные методы обработки, рассматриваемые, например, в фундаментальных трудах Тихонова В.И.,

Вайнштейна Л.А., Зубакова В.Д., Тартаковского Г.П., Репина В.Г., Прэтта У., Уайлда Д.Дж., Крамера Г., используются только для получения эталонных оценок и не применяются на практике ввиду значительных вычислительных затрат, а нашедшие применение методы чрезвычайно чувствительны к искажениям формы сигнала, не обладая адаптивными свойствами к его параметрам. Отметим также большой вклад в развитие и популяризацию триангуляционного подхода авторов Плотникова С.В. (КТИ СО РАН, Россия) и Smith K.B. (The Ohio State University, USA), посвятивших данному вопросу крупные научные исследования.

**Актуальность темы** оптимизации алгоритмов первичной обработки сигналов лазерных триангуляционных сенсоров, связанной с разработкой гибкого подхода к построению моделей сигналов, сравнительного анализа известных методов первичной обработки, их совершенствования и синтезу новых, в том числе и адаптивных, определяется необходимостью повышения точностных характеристик и показателей надёжности средств технической диагностики и неразрушающего контроля при изменяющихся условиях эксплуатации, т.е. при непредсказуемых факторах формирования сигналов.

Методы первичной обработки в отличие от вторичной (построение сечения объекта плоскостями триангуляции нескольких сенсоров и оценка по сечению геометрических параметров объекта) универсальны и могут быть обобщены для большинства конструкций датчиков. Вторичная обработка носит узкоспециализированный характер, зависит от решаемой задачи и, как правило, не имеет жёстких временных и аппаратных ограничений. Поэтому наибольший интерес представляет исследовательская деятельность в направлении оптимизации алгоритмов именно первичной обработки сигналов лазерных триангуляционных измерителей.

Значимость вопроса моделирования сигналов триангуляционных датчиков в рамках поставленной темы исследования обусловлена тем, что эффективный анализ методов первичной обработки может быть произведен только с использованием аналитических моделей сигналов, вариация параметров которых даёт возможность имитировать формирование реального сигнала.

Таким образом, тема диссертации, направленная на повышение эффективности систем технической диагностики, основанных на принципе лазерной триангуляции, является актуальной, имеет прикладную направленность.

**Цель работы** заключается в исследовании, совершенствовании известных и разработке новых методов первичной обработки сигналов лазерных триангуляционных датчиков и направлена на повышение точности оценки геометрии сканируемых объектов, упрощение разработки и

настройки триангуляционных измерительных систем.

Для достижения данной цели необходимо решение следующих задач:

- разработка модели сигнала с фотоприёмника оптического триангуляционного датчика;
- сравнительный анализ известных (оптимальных и практических) методов первичной обработки на основе модельных сигналов;
- синтез и анализ новых алгоритмов определения положения одиночного импульса в составе аддитивной смеси;
- анализ вычислительной эффективности различных методов первичной обработки и вычислительная оптимизация методов первичной обработки;
- структурно-параметрическая оптимизация методов первичной обработки;
- анализ погрешностей, возникающих на этапе первичной обработки;
- разработка методики калибровки измерителя, адаптивной к параметрам сигнала;
- разработка программного обеспечения, служащего для моделирования и проектирования триангуляционных измерителей;
- анализ эффективности внедрения результатов исследования в системы технической диагностики.

**Методы исследований**, использованные в диссертационной работе, основаны на статистической теории радиотехнических систем, параметрическом моделировании случайных процессов, численных алгоритмах поиска экстремума, математическом моделировании. Основные числовые результаты получены на основе аналитических и вычислительных математических методов.

#### **Основные положения, выносимые на защиту**

- Методика моделирования сигнала с выхода лазерного триангуляционного датчика, позволяющая имитировать воздействие факторов, влияющих на формирование сигнала, что даёт возможность оценить эффективность методов его первичной обработки для конкретных типов триангуляционных измерителей.
- Косвенный метод нахождения положения одиночного импульса, основанный на процедуре циклической свёртки, оптимизированной по вычислительным затратам с помощью рекурсивного преобразования, и дающий возможность в 3...5 раз улучшить оценку положения пятна по критерию СКО на фоне белого шума.
- Двухпараметрический метод калибровки, основанный на оценке пары параметров одиночного импульса с использованием косвенного мето-

да, дающий возможность расширить в 1,5...2 раза динамический диапазон измерителя по сравнению с однопараметрической калибровкой путём учёта формы и ширины импульса при сохранении вычислительных затрат.

**Научная новизна** диссертации заключается в следующих результатах:

- разработана процедура моделирования сигнала, учитывающая особенности как полезного импульса, так и шумовых составляющих; показаны случайный характер формы полезного импульса с триангуляционного датчика и его принципиальная несимметричность, что часто приводит к неприменимости известных методов первичной обработки;
- разработан алгоритм адаптации уровня пороговой обработки к параметрам сигнала, основанный на учете статистических свойств полезного импульса с предварительным маскированием сигнала, обеспечивающий минимальное смещение и низкую дисперсию оценки положения импульса;
- синтезирован беспороговый метод определения положения полезного импульса, дающий возможность оценивать ширину импульса и его положение в едином алгоритмическом цикле;
- разработана процедура двухпараметрической калибровки триангуляционных измерителей, адаптивная к ширине лазерного пятна с поверхности объекта;
- разработана методика параметрической оптимизации цифровых линейных фильтров произвольной структуры, которая позволяет снизить вычислительные затраты на реализацию процедуры фильтрации.

**Научное и практическое значение** полученных результатов состоит в повышении эффективности обработки сигналов различными методами в условиях долговременных изменений факторов формирования сигналов лазерным триангуляционным измерителем. Это достигается за счет адаптивных свойств методов первичной обработки, что приближает точность триангуляционных систем к их потенциальной величине.

**Реализация результатов** диссертационной работы состоит в разработке программно-алгоритмического и аппаратного обеспечения устройств первичной обработки, а также в разработке специализированной математической библиотеки и прикладной программы визуального конструирования триангуляционных измерителей, предназначенных для оперативной разработки и детального исследования триангуляционных систем.

**Внедрение научных результатов** диссертационной работы произведено в опытно-конструкторские работы и промышленные разработки ООО «Агроэл» (Рязань), в разработки вагонной службы «Московской железной дороги» филиала ОАО «Российские железные дороги» и ЗАО «Отраслевой центр внедрения новой техники и технологий».

**Апробация работы** произведена в форме научных докладов, дискуссий по основным результатам диссертационной работы, которые проходили на следующих научных конференциях: 38-й научно-технической конференции РГРТА, II и VI международных научно-технических конференциях «Цифровая обработка сигналов и её применения».

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 48 печатных и 5 рукописных научных работ, в том числе 26 публикаций в центральной печати (статьи, патенты, зарегистрированные программы и алгоритмы в Отраслевом фонде алгоритмов и программ Государственного координационного центра информационных технологий Минобробразования России), 22 тезисов докладов на конференциях.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка из 142 наименований и трёх приложений. Диссертационная работа содержит 156 страниц, в том числе 108 страниц основного текста, 4 таблицы, 64 рисунка.

## **СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертации, приводится краткий обзор основных работ по обработке сигналов триангуляционных сенсоров, а также по оценке их параметров. Представлены основные положения, выносимые на защиту. Определены цель и задачи исследования, изложены новые результаты, полученные в ходе исследований, их научное и практическое значение, а также реализация и внедрение.

**В первой главе** рассматривается вопрос построения аналитической модели сигнала триангуляционного датчика, описывающей шумовые и информационные компоненты. Особое внимание уделено внесению в модель полезной составляющей сигнала физически обоснованных параметров, которые имитируют факторы его формирования.

Выходной сигнал  $\mathbf{s} = \{s[j]\}$  триангуляционного датчика представляет

собой три основных аддитивных компоненты: фоновый шум  $\mathbf{f} = \{f[j]\}$  (в общем случае с ненулевой постоянной составляющей), полезная составляющая сигнала в виде одиночного видеоимпульса  $\mathbf{x} = \{x[j]\}$ , где  $j = 0 \dots N-1$ ,  $N$  – число отсчётов сигнала, и дополнительный шум в пределах импульса, преимущественно оптического происхождения. Отметим, что сигнал с выхода триангуляционного датчика характеризуется низким отношением сигнал/шум ( $A/\sigma$  обычно  $5 \dots 10$ , где  $A$  – амплитуда импульса,  $\sigma$  – среднеквадратическое значение шума).

Экспериментальное и теоретическое исследование шумов показало, что наиболее значимая их компонента с высокой степенью точности может быть описана в виде белого шума. Моделью полезного импульса является его аналитическое описание. При моделировании импульса предъявляются требования к гибкости изменения параметров модели, определяющих форму модельного импульса. Известно, что интенсивность в сечении луча лазера близка к гауссовой кривой. Описание такой формы импульса наиболее целесообразно рядом Эджворта, что даёт возможность по отдельности учитывать составляющие асимметрии и эксцесса:

$$x_c[j] = P_x \cdot \frac{1}{L} \left[ \Phi' \left( \frac{j - \mu_1}{L} \right) - \frac{\gamma_1}{3!} \Phi^{(4)} \left( \frac{j - \mu_1}{L} \right) + \frac{\gamma_2}{4!} \Phi^{(6)} \left( \frac{j - \mu_1}{L} \right) \right],$$

где  $\Phi^{(n)}(\bullet)$  – производная интеграла вероятности,  $P_x$  – площадь реального импульса  $\mathbf{x}$  длительностью  $\Delta j$ :

$$P_x = \sum_{i=0}^{\Delta j} x[i + j_x].$$

Для обнаруженного импульса численно определяются его центр тяжести  $\mu_1$  как первый начальный момент, а также его ширина  $L$  и коэффициенты асимметрии  $\gamma_1$  и эксцесса  $\gamma_2$  как центральные моменты  $\mu_k$ :  $L = \mu_2$ ,  $\gamma_1 = \mu_3$ ,  $\gamma_2 = \mu_4 - 3L^4$ .

На рис. 1 тонкой линией показан увеличенный фрагмент реального сигнала  $\mathbf{s}$ , соответствующий импульсу, жирной линией – аппроксимация импульса рядом Эджворта. Как видно из рисунка, реальный импульс имеет несимметричный характер, и аппроксимация  $\mathbf{x}_c$  с достаточной степенью передала эту особенность.

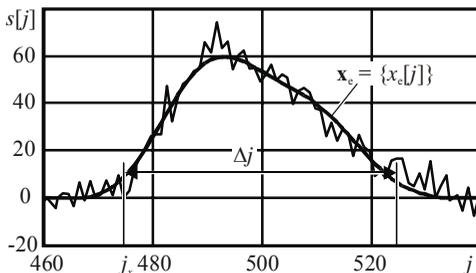


Рис. 1. Модель Эджворта импульса

Далее проводится анализ популярного метода центра тяжести с пред-

варительной пороговой обработкой с привлечением разработанной модели. Анализ показал наглядность и удобство использования модели сигнала, полученной с использованием предложенной методики.

Данная модель позволила имитировать различные практические ситуации: изменение ширины отражённого от объекта лазерного пучка, что может быть обусловлено флюктуациями мощности лазера или изменением отражающей способности поверхности объекта; изменение асимметрии полезного импульса, происхождение которой обусловлено особенностями лазера и конструкции датчика. В результате анализа получены характеристики оценки положения импульса – смещение и СКО в зависимости от отношения сигнал/шум для различных коэффициентов асимметрии и эксцесса.

**Во второй главе** предлагаются классификация методов оценки положения одиночного видеоимпульса, обзор оптимальных методов оценивания, приводятся синтез, анализ и оптимизация линейного беспорогового метода обработки сигнала с датчика. Анализ производится с использованием модели сигнала, полученной в соответствии с материалами первой главы для различных мешающих воздействий.

В результате исследований было получено обобщение известных интегральных методов оценивания положения одиночного видеоимпульса методом циклической свёртки, основанным соответственно на записи

$$v[j] = \sum_{g=0}^{N-1} g \cdot s[(g+j) \bmod N]. \quad (1)$$

На основе исследования свойств циклической свёртки (1) был найден метод получения оценок, характеризующихся меньшей дисперсией за счет косвенного выделения информации из набора значений циклической свёртки.

На рис. 2 приведены зависимости СКО оценки положения импульса от отношения сигнал/шум, полученные различными методами: длинный пунктир – оптимальный (оценка соответствует границе Рао-Крамера), короткий пунктир – косвенный, сплошной линией – центр тяжести без предварительной пороговой обработки сигнала  $s$ .

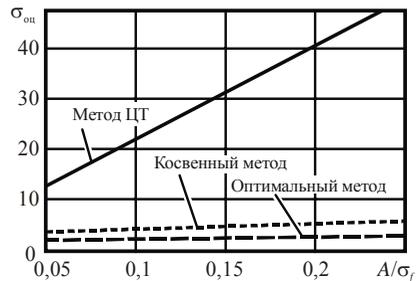


Рис. 2. СКО различных методов

Как видно из рисунка, косвенный метод незначительно уступает оптимальному методу и выигрывает от 35 до 80 раз у метода центра тяжести в отсутствие пороговой обработки. Аналогичный анализ, но после пороговой обработки показал стремление качества косвенной оценки к

оптимальной при расширении импульса.

Также были получены зависимости СКО и смещения от относительного положения  $\rho = M \cdot j_g$  импульсной помехи, где  $j_g$  – абсолютное положение помехи в массиве данных  $\mathbf{s}$ , и вероятностные характеристики события сбоя, при котором косвенный метод оказывается практически неэффективен. Проиллюстрирована высокая устойчивость косвенного метода по сравнению с методом центра тяжести при наличии интенсивной импульсной помехи.

В рамках задачи параметрической оптимизации косвенного метода синтезирована оптимальная дискриминационная характеристика  $\mathbf{g} = \{g[j]\}$ , проведено исследование влияния различных нелинейных форм нечётной дискриминационной характеристики  $\mathbf{g} = \{g[j]\}$  на СКО оценки, на её смещение и на полную вероятность сбоя косвенного метода. Показано, что при использовании оптимальной (прямоугольной) формы дискриминационной характеристики может быть получен выигрыш в величине СКО 3 % и уменьшена вероятность сбоя в 40 раз по сравнению с исходной (линейной)  $\mathbf{g}$ .

**В третьей главе** рассматривается отдельный подход в методах первичной обработки – калибровка триангуляционного измерителя. Проводится анализ причин возникновения погрешностей при известных методах калибровки и предлагается адаптивный метод, учитывающий вариации условий эксплуатации измерителя.

На основе классической оптической схемы измерителя были получены основные соотношения, связывающие конструктивные параметры измерителя ( $P_L$  – полуширина импульса):

$$P_L(H, D) = \frac{D}{2Q(H)} \cdot \frac{\sin\left(\arctg\left(\frac{H}{S(H) \pm D/2}\right)\right)}{\sin\left(\arctg\left(\frac{H}{S(H) \pm D/2}\right) + \alpha\right)}, \quad (2)$$

где  $H$  – дальность до объекта, знаки «+» и «-» служат для получения полуширин левой и правой частей импульса соответственно,  $D$  – ширина пятна на поверхности объекта. Прочие входящие в выражение  $P_L(H, D)$  функционалы и параметры приведены ниже:

$$Q(H) = \frac{H}{F} - 1, \quad S(H) = H \cdot \operatorname{tg}(\beta) - B, \quad \alpha = \arctg\left(\frac{p}{B}\right), \quad p = \left(\frac{1}{F} - \frac{\operatorname{tg}(\beta)}{B}\right)^{-1},$$

где  $F$  – фокус объектива,  $\alpha$  – угол наклона фотоприемника (ФП).

На основе геометрических построений получены выражения для моды  $M$  импульса и координат ФП:

$$M(H) = \sqrt{(X(H) + B)^2 + Y(H)^2} - C_1, \quad X(H) = -\frac{S(H)}{Q(H)}, \quad Y(H) = -\frac{H}{Q(H)},$$

где  $C_1$  – расстояние от точки пересечения плоскости линзы с направлением излучения до начала ФП,  $X(H)$  и  $Y(H)$  – координаты точки на ФП относительно оптического центра  $O$ .

Выражение (2) показывает принципиальную несимметричность импульса, подтверждая экспериментальные исследования, проведенные в главе 1. Несимметричность импульса требует исследования допустимости традиционной калибровки для каждой конструкции, которая выполняется построением экспериментальной табулированной зависимости, связывающей реальную дальность до объекта с оценкой положения полезного импульса на фотоприёмнике. На рис. 3 показаны обратные однопараметрические калибровочные зависимости  $\hat{M}(H)$  в пикселях фотоприёмника для различных  $D$ , а на рис. 4 – разница калибровочных зависимостей  $\Delta_{10,2}(H) = \hat{M}_{10}(H) - \hat{M}_2(H)$  при минимальном (2 мм) и максимальном (10 мм) значениях  $D$  и  $\Delta_{5,2}(H) = \hat{M}_5(H) - \hat{M}_2(H)$  при минимальном (2 мм) и среднем (5 мм) значениях  $D$ .

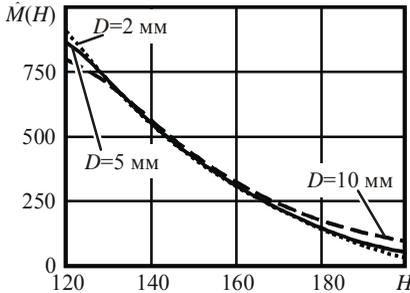


Рис. 3. Одномерные калибровочные зависимости для различной ширины импульса

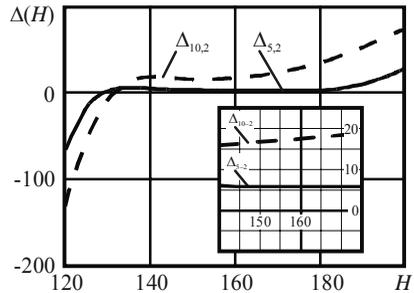


Рис. 4. Разность одномерных калибровочных зависимостей

При использовании одномерной калибровки диапазон дальностей снижается в два раза (ограничен диапазоном 140...180 мм), а погрешность при этом составляет до 6 пикселей (см. рис. 4, кривая  $\Delta_{5,2}$ ). Это иллюстрирует неприменимость традиционной калибровки при возможной вариации ширины пятна.

Расширение динамического диапазона достигается применением калибровки, адаптивной к ширине импульса. Оценка ширины находится в едином алгоритмическом цикле с косвенной оценкой положения импульса:

$$\hat{L} = N - (\max(\mathbf{v}) - \min(\mathbf{v})),$$

что следует из формы свёртки  $\mathbf{v}$ , особенностью которой является то, что с увеличением ширины импульса в составе сигнала  $\mathbf{s}$  уменьшается перепад экстремумов свёртки  $\mathbf{v}$ .

В общем случае адаптивная калибровка, так же как и традиционная, сводится к построению эмпирической табличной зависимости, но, в отличие от известных подходов, для двух параметров –  $\hat{M}$  и  $\hat{L}$ . Очевидно, что затруднительно построить калибровочную зависимость  $H(\hat{M}, \hat{L})$  в виде таблицы для всех возможных дальностей и ширин пятна. Поэтому возникает необходимость интерполяции и экстраполяции таблицы. В рамках разрешения этой проблемы разработана процедура триангуляции, т.е. разбиения калибровочной зависимости на треугольники с последующей линейной интерполяцией в пределах полученных примитивов.

**В четвертой главе** приводятся процедуры вычислительной оптимизации методов и устройств первичной обработки, которые способствуют повышению практической значимости проведенных исследований:

- разработан алгоритм комбинированного метода определения положения полезного импульса; экспериментальное исследование ряда конструкций триангуляционных сенсоров показало высокую эффективность комбинированного метода, поскольку типичный выигрыш в вычислительных затратах составляет не менее 5...10 раз;
- разработана рекурсивная процедура вычисления циклической свёртки, которая обеспечила практическую реализуемость разработанного косвенного метода;
- предложена оптимизированная структурная схема логического блока, входящего в состав устройства, реализующего косвенный алгоритм, которая позволила сократить временные затраты на принятие решения с  $N$  до 3 тактов.
- разработана процедура параметрической оптимизации цифровых фильтров произвольной структуры с квантованными коэффициентами; параметрическая оптимизация цифровых фильтров даёт возможность сократить вычислительные затраты на рекурсивное вычисление циклической свёртки с сохранением нелинейной формы  $\mathbf{g}$ .

Наибольшее значение имеет процедура рекурсивного преобразования косвенного метода, основанная на представлении циклической свёртки  $\mathbf{v}$  суммой линейных:  $v[j] = v_{\text{пр}}[j] + v_{\text{обр}}[j]$ , где  $v_{\text{пр}}[j]$  и  $v_{\text{обр}}[j] = v_{\text{пр}}[j + N]$ , условно названных прямой и обратной соответственно.

Линейная свёртка  $v_{\text{пр}}[j]$  может быть осуществлена посредством не-рекурсивного фильтра с импульсной характеристикой (ИХ)  $\mathbf{g}$ . Для снижения вычислительных затрат произведено рекурсивное преобразование

этой свёртки на основе условия соответствия ИХ заданной:  $\mathbf{G}\mathbf{a} = \mathbf{e}$ , где  $\mathbf{G}$  – верхняя треугольная матрица, составленная из отсчётов  $g[k]$ ,  $\mathbf{a}$  – искомый вектор коэффициентов цифрового рекурсивного фильтра (ЦРФ),  $\mathbf{e}^T = \{1, 0, \dots, 0\}$ .

Модифицированное условие соответствия  $\mathbf{G}_m \mathbf{a}_1 = \mathbf{e}$ , служащее снижению порядка фильтра ( $p < N$ ), не может быть решено точно, т.к.  $\mathbf{G}_m$  – прямоугольная  $(p+1) \times N$ -мерная матрица, полученная из  $\mathbf{G}$  путем вычеркивания последних  $N-p$  столбцов,  $\mathbf{a}_1$  –  $(p+1)$ -мерный вектор коэффициентов.

На основе формального критерия качества – минимума длины вектора невязок  $\mathbf{w} = \mathbf{e} - \mathbf{G}_m \mathbf{a}_1$  искомые коэффициенты ЦРФ находятся как решение системы нормальных уравнений:

$$\mathbf{a}_{1\_opt} = (\mathbf{G}_m^H \mathbf{G}_m)^{-1} \mathbf{G}_m^H \mathbf{e}.$$

ИХ полученного ЦРФ уже при порядке  $p = 2$  точно совпала с исходной линейной  $g[k] = \{0, 1, \dots, N-1\}$ . Обратная свёртка вычисляется ЦРФ (названным «обратным фильтром» ОФ) с импульсной характеристикой  $g'[k] = \{N-1, N-2, \dots, 0\}$ . Входным сигналом этого фильтра является последовательность  $s'[k] = \{s[N-1], s[N-2], \dots, s[0]\}$ . Затухающая до 0-го значения ИХ  $\mathbf{g}'$  не может быть описана выходом ЦРФ низкого порядка, поэтому можно ограничиться порядком  $p = 1$  (экспоненциальная ИХ). Погрешность аппроксимации полностью компенсируется адаптивной калибровкой.

Вычислительная нагрузка после получения всех  $N$  отсчётов  $\mathbf{s}$  составит только  $2N$  умножений, что значительно меньше аналогичного показателя известных методов вычисления циклической свёртки.

**В пятой главе** рассматриваются аспекты практического применения результатов проведенных исследований в задачах технической диагностики, возникающих в железнодорожном хозяйстве с учетом их специфики.

Разработана процедура обработки сигналов триангуляционных датчиков, основанная на маскировании внешней засветки по технике блинкования. Для обеспеченных этой процедурой определённых статистических характеристик сигнала разработан алгоритм адаптации уровня пороговой обработки сигнала. Результат работы данной процедуры адаптации является предпочтительнее, чем алгоритмы, основанные на использовании отношения правдоподобия, т.к. обеспечивают меньшее смещение оценок при несимметричных импульсах. Проиллюстрирована эффективность решений на примере оценки геометрических параметров колеса железнодорожного вагона на ходу поезда.

Рассмотрен вопрос построения оптических измерителей вибропе-

ремещения, для которых, при сохранении разрешающей способности, достигается больший динамический диапазон за счет применения адаптивной калибровки. Также для обоснования применения измерителей именно виброперемещения предложена процедура вторичной обработки, основанная на относительной пороговой обработке логарифмической спектральной плотности мощности сигнала вибрации.

Разработана программа визуального конструирования лазерных триангуляционных измерителей. Интуитивно понятный интерфейс с максимальным приближением к оптической схеме даёт возможность быстро рассчитать параметры оптической схемы, чтобы далее определить основные конструктивные параметры измерителя.

**В заключении** подведены итоги диссертационной работы и сформулированы её основные научные и практические результаты, которые сводятся к следующему:

- разработана процедура построения аналитической модели с фотоприёмника триангуляционного измерителя, учитывающая особенности полезного импульса и статистические свойства типичных шумов; произведено сопоставление параметров модели с возможными условиями эксплуатации измерителя (поляризация излучения, изменения отражающей способности сканируемой поверхности и настроек измерителя); исследованы качественные характеристики популярного метода центра тяжести с использованием построенной модели и показаны оптимальная по критерию минимума СКО величина порога и минимальное отношение сигнал/шум для метода центра тяжести;
- проанализированы известные оптимальные и практические методы оценки положения импульса и выявлены их недостатки путем сравнительного анализа численно определенных характеристик оценок – СКО и смещения;
- синтезирован косвенный алгоритм оценки положения одиночного видеоимпульса в составе массива данных, дающий возможность в 3...5 раз уменьшить СКО оценки по сравнению с методом центра тяжести с предварительной пороговой обработкой;
- получен метод оценивания ширины импульса, выполняющийся в едином алгоритмическом цикле с косвенным алгоритмом;
- исследованы статистические характеристики косвенного алгоритма при наличии белого шума и импульсных помех;
- произведена оптимизация логического блока, входящего в состав устройства, реализующего косвенный алгоритм, основанная на параллельном выполнении однотипных операций;
- показаны принципиальная несимметричность полезного импульса в составе сигнала с фотоприёмника и, как следствие, ограниченная при-

менимость традиционной неадаптивной калибровки и на примере оценена величина погрешности, возникающей вследствие вариации ширины пятна;

- разработана процедура двухпараметрической калибровки, адаптивной к ширине пятна, позволяющая в 2...3 раза расширить динамический диапазон измерителя, исключив влияние ширины пятна; проанализирован вопрос интерполяции и экстраполяции трёхмерной калибровочной зависимости;
- разработана процедура триангуляции поверхности калибровки с последующей линейной интерполяцией калибровочной зависимости;
- разработан комбинированный метод оценки положения полезного импульса, основанный на двухэтапной процедуре, использующей методы медианы и центра тяжести, позволяющий в 5...10 раз сократить вычислительные затраты на оценку центра тяжести одиночного импульса; получено выражение для оценки относительного выигрыша комбинированного метода и показана монотонность функции выигрыша от параметров сигнала;
- разработана рекурсивная процедура вычисления циклической свёртки;
- разработана процедура параметрической оптимизации цифровых рекурсивных фильтров произвольной структуры с квантованными коэффициентами, основанная на использовании двух шкал квантования и пересчете ошибок грубой шкалы в точные коэффициенты;
- проанализирована задача оценки геометрических параметров колес железнодорожного вагона в пути следования с использованием маскирования внешней засветки измерителя и с эффективной в смысле невысоких вычислительных и аппаратных затрат процедурой адаптации уровня пороговой обработки, близкой к оптимальной по критерию СКО и обеспечивающей минимальное смещение оценки положения асимметричного импульса;
- предложен вариант вторичной обработки выходного сигнала оптического виброметра, дающий возможность использовать виброметры триангуляционного типа;
- разработана прикладная программа визуального конструирования оптической схемы триангуляционных измерителей.

Все разработанные алгоритмы подходят для реализации на ПЛИС, что при сравнительно невысокой стоимости устройств обработки позволяет достичь максимальной вычислительной эффективности данных алгоритмов.

Таким образом, достигнута цель работы – разработаны новые и оптимизированы известные алгоритмы первичной обработки сигналов триангуляционных измерителей, служащие более точному и/или экономически выгодному преобразованию выходных сигналов триангуляционных

датчиков в реальную дальность.

**В приложениях** приведены список аббревиатур и условных обозначений, копии актов о внедрении, внешний вид одного из устройств первичной обработки.

**Основные результаты диссертации опубликованы в работах**

1. Андреев В.Г., Пальчик О.В. Моделирование сигнала с фотоприемника лазерного триангуляционного измерителя // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2005. № 1. С. 34-37.
2. Андреев В.Г., Пальчик О.В. Анализ эффективности математического моделирования лазерных триангуляционных измерителей // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2005. № 2. С. 32-35.
3. Андреев В.Г., Пальчик О.В. Теоретико-экспериментальное исследование лазерных триангуляционных измерителей (депонированная рукопись) / Рязан. гос. радиотехн. академия. Рязань, 2004. 17 с. 5 ил. Библиогр.: 7 назв. Рус. Деп. в ВИМИ, 12.10.2004, №Д08974.
4. Андреев В.Г., Пальчик О.В. Метод нахождения энергетического центра одиночного импульса // Известия вузов. Радиоэлектроника. 2005. Т. 48. № 7. С. 47-55.
5. Пальчик О.В., Горкин В.Н. Обобщение интегральных методов оценки положения импульса методом циклической свёртки // Информационные технологии моделирования и управления. 2005. № 3(21). С. 375-383.
6. Пальчик О.В., Андреев В.Г. Обработка данных триангуляционного измерителя // Цифровая обработка сигналов и ее применения: Материалы докладов VI международной конференции. Москва, 2004. Т. II. С. 197-200.
7. Пальчик О.В. Оценка параметров самосветящихся объектов // Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций: Материалы 13-й международной научно-технической конференции. Рязань, 2004. С. 78-80.
8. Венедиктов А.З., Пальчик О.В. Параметрическая оптимизация алгоритма оценивания положения одиночного видеоимпульса // Цифровая обработка сигналов и ее применения: Материалы докладов VII Международной конференции. Москва, 2005. Т. II. С. 283-285.
9. Венедиктов А.З., Пальчик О.В. Проблемы калибровки лазерных триангуляционных измерителей // В мире неразрушающего контроля. 2004. № 4 (26). С. 62-63.
10. Венедиктов А.З., Андреев В.Г., Пальчик О.В. Адаптивная калибровка систем промышленного зрения // Материалы докладов III меж-

- дисциплинарной конференции с международным участием НБИТТ-21. Петрозаводск, 2004. С. 59.
11. Венедиктов А.З., Пальчик О.В. Метод триангуляции неравномерной гладкой зависимости // Методы и средства измерений физических величин: Материалы XI всероссийской научно-технической конференции. Н. Новгород, 2005. С. 20.
  12. Венедиктов А.З., Тирёшкин В.Н., Пальчик О.В. Компенсация погрешностей в информационно-управляющей системе // Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития: Сборник научных трудов по материалам Международного радиоэлектронного форума. Харьков, 2005. Часть 7. С. 97-98.
  13. Андреев В.Г., Венедиктов А.З., Пальчик О.В., Тирёшкин В.Н. Двухпараметрическая калибровка лазерных триангуляционных измерителей (депонированная рукопись) / Рязан. гос. радиотехн. академия. Рязань, 2004. 14 с. 8 ил. Библиогр.: 8 назв. Рус. Деп. в ВИМИ, 12.10.2004, №Д08975.
  14. Кошелев В.И., Андреев В.Г., Пальчик О.В. Компенсация ошибок определения коэффициентов моделирующих АРСС-фильтров // Известия вузов. Радиоэлектроника. 2001. Т. 44. №7. С. 50-55.
  15. Пальчик О.В. Эффективная процедура вычисления циклической свертки // Методы и устройства формирования и обработки сигналов в информационных системах: Межвузовский сборник научных трудов. Рязань, 2004. С. 77-81.
  16. Кошелев В.И., Андреев В.Г., Пальчик О.В. Оптимизация авторегрессионных моделей с квантованными коэффициентами // Цифровая обработка сигналов и ее применения: Материалы докладов II международной конференции. Москва, 2000. Т. III. С. 217-218.
  17. Андреев В.Г., Пальчик О.В. Комбинированный метод поиска центра тяжести в лазерных триангуляционных системах // Физика и технические приложения волновых процессов: Труды III международной научно-технической конференции. Волгоград, 2004. С. 186.
  18. Венедиктов А.З., Тирёшкин В.Н., Пальчик О.В. Алгоритм вычисления центра тяжести, оптимизированный под архитектуру микроконтроллеров IP2022. М.: ВНТИЦ, 2004. № ГР50200401286.
  19. Андреев В.Г., Пальчик О.В. Повышение точности измерения геометрических параметров движущихся объектов методом лазерной триангуляции // Датчики и системы. 2004. № 9. С. 6-9.
  20. Пальчик О.В., Доков Д.С. Анализ методов статистической обработки и оценивания параметров одиночного видеоимпульса // Информационные технологии моделирования и управления. 2005. № 1 (19). С. 58-64.
  21. Метод неразрушающего контроля состояния подшипников / Вене-

- диктов А.З., Дёмкин В.Н., Пальчик О.В., Белокрылов А.Г. // Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития: Сборник научных трудов по материалам Международного радиоэлектронного форума. Харьков, 2002. Часть 2. С. 475-476.
22. Андреев В.Г., Венедиктов А.З., Пальчик О.В. Оптический виброметр с высокой разрешающей способностью // Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем: Труды IV всероссийской научно-технической конференции. Ульяновск, 2004. С. 147-148.
  23. Венедиктов А.З., Пальчик О.В. Принцип обработки сигналов виброперемещения в оптических измерителях виброперемещения // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2005. № 6. С. 54-56.
  24. Пальчик О.В. Программное средство проектирования лазерных триангуляционных измерителей // Современные проблемы информатизации в технике и технологиях: Сборник трудов X международной научной конференции. Воронеж, 2005. Вып. 10. С. 195-196.
  25. Пальчик О.В., Тирёшкин В.Н. Проектирование лазерных триангуляционных измерителей с помощью визуального конструктора // Информационные технологии в науке, проектировании и производстве: Материалы XIV всероссийской научно-технической конференции. Н. Новгород, 2005. С. 21-23.
  26. Пальчик О.В., Тирёшкин В.Н. Программа визуального конструирования лазерных триангуляционных измерителей. М.: ВНИИЦ, 2004. № ГР50200400896.
  27. Венедиктов А.З., Пальчик О.В. Измерение геометрических параметров сложных цилиндрических объектов // Датчики и системы. 2005. №1. С. 24-28.
  28. Многокритериальная процедура минимизации собственной засветки триангуляционных измерителей / Венедиктов А.З., Пальчик О.В., Тирёшкин В.Н., Доков Д.С. // Приборы. 2004. № 10. С. 39-41.
  29. Венедиктов А.З., Пальчик О.В., Горбылёв М.С. Анализ физических характеристик тел вращения // Мир измерений. 2005. № 7. С. 15-18.
  30. Венедиктов А.З., Пальчик О.В., Власов Д.А. Опыт внедрения оптикоэлектронных измерительных средств на ремонтных предприятиях // Современные промышленные технологии: Материалы II всероссийской научно-технической конференции. Н. Новгород, 2005. С. 21-22.
  31. Пальчик О.В., Власов Д.А. Спектральный анализ как инструмент прогресса в современном приборостроении // Составляющие научно-технического прогресса: Материалы Международной научно-практической конференции. Тамбов, 2005. С. 137-138.

32. Пальчик О.В. Особенности контурной обработки изображений в лазерных триангуляционных системах // Информационные технологии в науке, проектировании и производстве: Материалы XIV всероссийской научно-технической конференции. Н. Новгород, 2005. С. 19-20.
33. Венедиктов А.З., Пальчик О.В., Горбылёв М.С. Восстановление изображения поверхности объектов методом наименьших квадратов // Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития: Сборник научных трудов по материалам Международного радиоэлектронного Форума. Харьков, 2005. Часть 3. С. 301-302.
34. Многоуровневая схема обработки измерительной информации в лазерных триангуляционных системах / Венедиктов А.З., Доков Д.С., Андреев А.Г., Пальчик О.В. // Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития: Сборник научных трудов по материалам Международного радиоэлектронного форума. Харьков, 2005. Часть 7. С. 273-274.
35. Венедиктов А.З., Пальчик О.В. Лазерные системы диагностики колесных пар // Перспективы развития лазерных технологий: Труды научно-технической конференции с международным участием. Владимир, 2005. С. 139-141.
36. Венедиктов А.З., Пальчик О.В., Горбылёв М.С. Библиотека математических функций Cyclometry. М.: ВНИИЦ, 2005. № ГР50200500156.
37. Современное состояние и перспективы развития измерительно-диагностических систем на железнодорожном транспорте / Венедиктов А.З., Тирёшкин В.Н., Пальчик О.В., Доков Д.С. // Наука и техника транспорта. 2005. №4. С. 18-25.
38. Анализ и диагностика локомотивных колёс: автоматический комплекс «Экспресс-Локомотив» / Венедиктов А.З., Тирёшкин В.Н., Пальчик О.В., Доков Д.С. // Локомотив. 2005. № 12. С. 28-29.
39. Экспресс-анализ пульсограмм для оценки адаптационных возможностей организма человека: Отчёт о НИР (закл.) / РГРТА; Науч. рук. Андреев В.Г. Тема №10-03Г; №ГР01200303808. Рязань, 2004. 70 с. Соисполн.: Тимофеев В.Е., Кошелев В.И., Горкин В.Н. и др.
40. Аппаратно-программный комплекс автоматизированного управления функциональными узлами административных, жилых и специальных помещений: Отчёт о НИР (закл.) / РГРТА; Науч. рук. Андреев В.Г. Тема №20-03Г; №ГР01200303807. Рязань, 2004. 85 с. Соисполн.: Тимофеев В.Е., Кошелев В.И., Горкин В.Н. и др.

П а л ь ч и к Олег Викторович

Оптимизация алгоритмов первичной обработки сигналов  
лазерных триангуляционных измерителей

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать 20.12.2006. Формат бумаги 60x84 1/16.  
Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л.1,0.  
Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз.

Рязанский государственный радиотехнический университет.  
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.  
Редакционно-издательский центр ГОУВПО «РГРТУ».