

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КАРТОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ПЭВМ ОТ НЕСАНКЦИОНИРОВАННОГО ДОСТУПА

УДК 004.312

А.С. Афанасенков, Д.С. Пылило, Г.Ф. Астапенко, П.В. Кучинский, А.П. Петрунин, НИИ ПФП им. А.Н. Севченко, г. Минск

Аннотация

Разработан и изготовлен программно-аппаратный комплекс, позволяющий с использованием электронных пластиковых карт обеспечить защиту обрабатываемой и хранимой на ПЭВМ информации от несанкционированного доступа. Комплекс реализует генерацию и защищенное хранение криптографических ключей, шифрование информации, электронную цифровую подпись, доступ к ПЭВМ авторизованных пользователей.

Введение

При обработке и хранении информации в ПЭВМ необходимо обеспечить ее конфиденциальность и целостность, а при обмене информацией – подтверждение авторства и целостности. На сегодняшний день во всех отраслях промышленности, министерствах и ведомствах, банках и коммерческих организациях для обработки и хранения информации широко используются персональные электронные вычислительные машины (ПЭВМ) с операционными системами (ОС) семейства Windows и Linux.

В общем случае, комплекс программно-технических средств и организационных решений по защите информации от НСД в ПЭВМ может быть реализован в рамках системы защиты информации от НСД, условно состоящей из четырех подсистем [1]: управления доступом, регистрации и учета, криптографической защиты и обеспечения целостности.

Для решения задач, связанных с использованием электронной цифровой подписи (ЭЦП), имеется целый ряд отчуждаемых устройств с USB-интерфейсом [2–4], которые обеспечивают идентификацию пользователей, формирование и проверку ЭЦП, хранение ключевой информации.

В идентификаторах «Rutoken ЭЦП» и «Rutoken Magistra» [2] реализованы алгоритм ГОСТ Р 34.10-2001 (формирование и проверка электронной цифровой подписи) и алгоритм ГОСТ 34.11-94 (вычисление значения хеш-функции). Дополнительно реализованы поддержка алгоритма криптопреобразования ГОСТ 8147-89, выработка сессионных ключей и случайной числовой последовательности с использованием физического источника шума, идентификация пользователей. Идентификатор «Rutoken ЭЦП» реализован на микроконтроллере, «Rutoken Magistra» реализован с использованием ЭПК.

Электронные ключи «eToken PRO (Java)» [3] являются персональным средством аутентификации и защищенного хранения пользовательских данных, аппаратно поддерживающим работу с цифровыми сертификатами и ЭЦП. Реализованы на микросхеме смарт-карты.

Устройство «ШИПКА-2.0» [4] реализовано на мощном микропроцессоре и обеспечивает формирование и проверку электронной цифро-

вой подписи (ГОСТ Р 34.10-2001), вычисление значения хеш-функции (ГОСТ 28147-89), формирование ключа и криптопреобразование (ГОСТ 28147-89).

Данные изделия не могут быть использованы в Республике Беларусь, так как не обеспечивает выработку и проверку ЭЦП по СТБ 1176.2-99, вычисление функции хэширования по СТБ 1176.1-99 и криптопреобразования по СТБ 34.101.31-2011.

Структурная схема и функции

аппаратно-программного комплекса «Подпись»

Разработанный и изготовленный программно-аппаратный комплекс (ПАК) «Подпись» (рисунок 1) обеспечивает:

- защиту обрабатываемой и хранимой в ПЭВМ информации с применением криптографических преобразований;
- защиту от НСД к ПЭВМ неавторизованных пользователей;
- защищенное хранение криптографических ключей, информации о пользователе и аутентификационных данных в USB-ключе;
- создание криптографических ключей с использованием генератора случайной числовой последовательности (ГСЧП) ЭПК;
- аутентификацию в сетях под управлением Active Directory (для серверов под управлением ОС Windows 2003 и рабочих станций под управлением ОС Windows 2000/XP/7).

Программно-аппаратный комплекс «Подпись» также реализует ЭЦП; использует технологии, базирующиеся на электронных пластиковых картах (ЭПК); функционирует в ОС Windows 2000/XP/7 и ОС Linux (Ubuntu 9.10 с ядром 2.6).

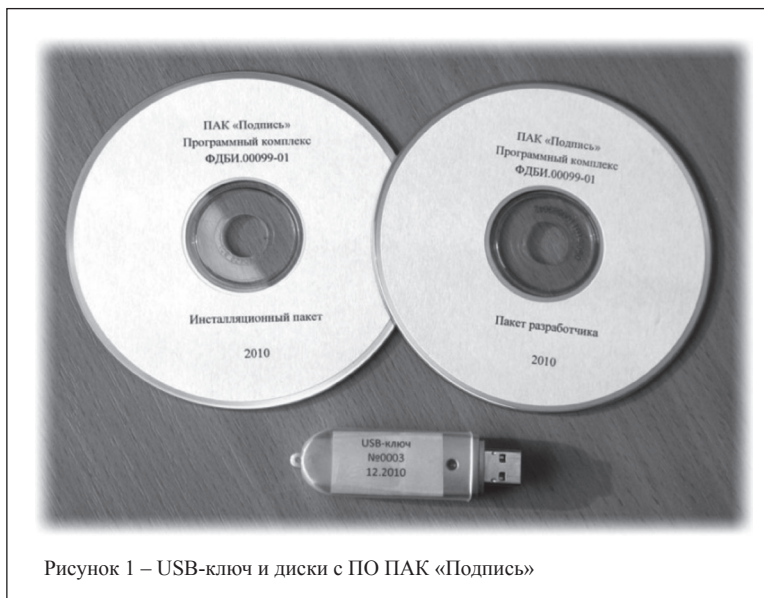


Рисунок 1 – USB-ключ и диски с ПО ПАК «Подпись»

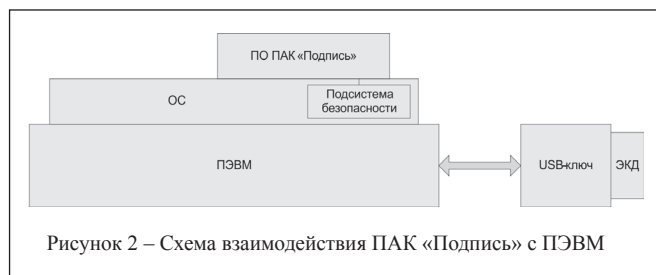


Рисунок 2 – Схема взаимодействия ПАК «Подпись» с ПЭВМ

ПАК «Подпись» предоставляет пользователю ПЭВМ следующие криптографические функции:

- шифрование по ГОСТ 28147-89 (аппаратная и программная реализации);
- шифрование по СТБ П 34.101.31-2007 (программная реализация);
- вычисление и проверка ЭЦП по СТБ 1176.2-99, а также хэш-значения по СТБ 1176.1-99 и СТБ П 34.101.31-2007 (программная реализация).

ПАК «Подпись» представляет собой комплекс, который в аппаратной части взаимодействует с ПЭВМ посредством USB-интерфейса, а в программной части встраивается в подсистему безопасности ОС (рисунок 2).

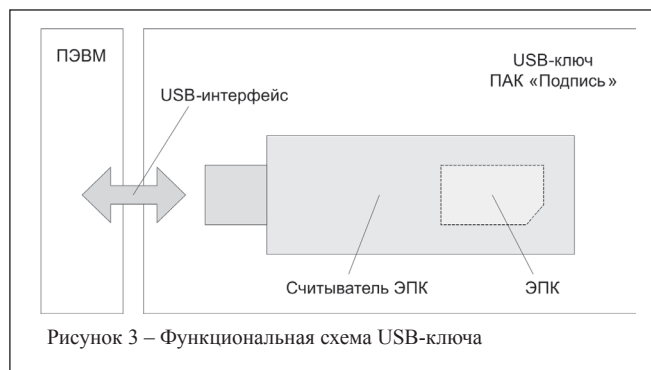


Рисунок 3 – Функциональная схема USB-ключа

Аппаратная часть ПАК «Подпись» состоит из USB-ключа, который содержит отчуждаемый портативный карт-ридер с USB-интерфейсом и встроенную в него ЭПК доступа (ЭКД), представляющую собой ЭПК формата SIM-PLUGIN (рисунок 3).

В качестве ЭПК в ПАК «Подпись» выбрана ЭПК с ОС «Магистра» на базе микроконтроллера ST19NR66 [5, 6].

Применение ЭПК с ОС «Магистра» на базе микроконтроллера ST19NR66 позволяет использовать аппаратное шифрование по алгоритму ГОСТ 28147 и реализовать

разграничение доступа к криптографическим ключам, информации о пользователе и аутентификационным данным.

В ПАК «Подпись» также реализована возможность использования полноразмерной ЭПК и стационарного считывателя ЭПК вместо USB-ключа, что значительно уменьшает стоимость комплекса и позволяет использовать дуальные ЭПК.

Программное обеспечение ПАК «Подпись»

Программная часть ПАК «Подпись» включает следующее программное обеспечение (ПО): модуль администрирования, модуль конфигурирования, модуль тестирования, модуль управления подсистемой защиты данных, модуль управления подсистемой контроля доступа, защищенный журнал аудита, криптографический сервер, модуль аутентификации, модуль работы с USB-ключами и другие (рисунок 4). На рисунке 5 представлена реализация интерфейса ПО комплекса.

ПАК «Подпись» обеспечивает защиту ПЭВМ от НСД со стороны неавторизованных пользователей посредством двухфакторной аутентифика-

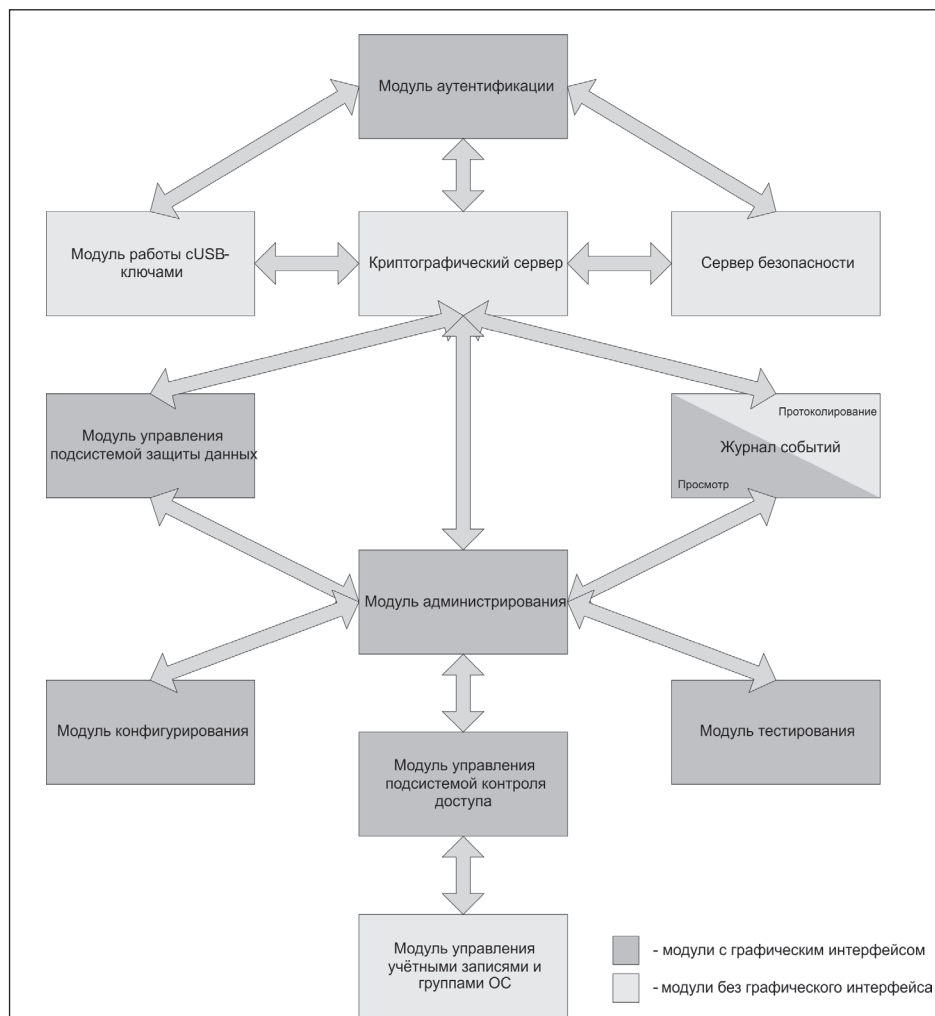


Рисунок 4 – Функциональная схема ПО ПАК «Подпись»

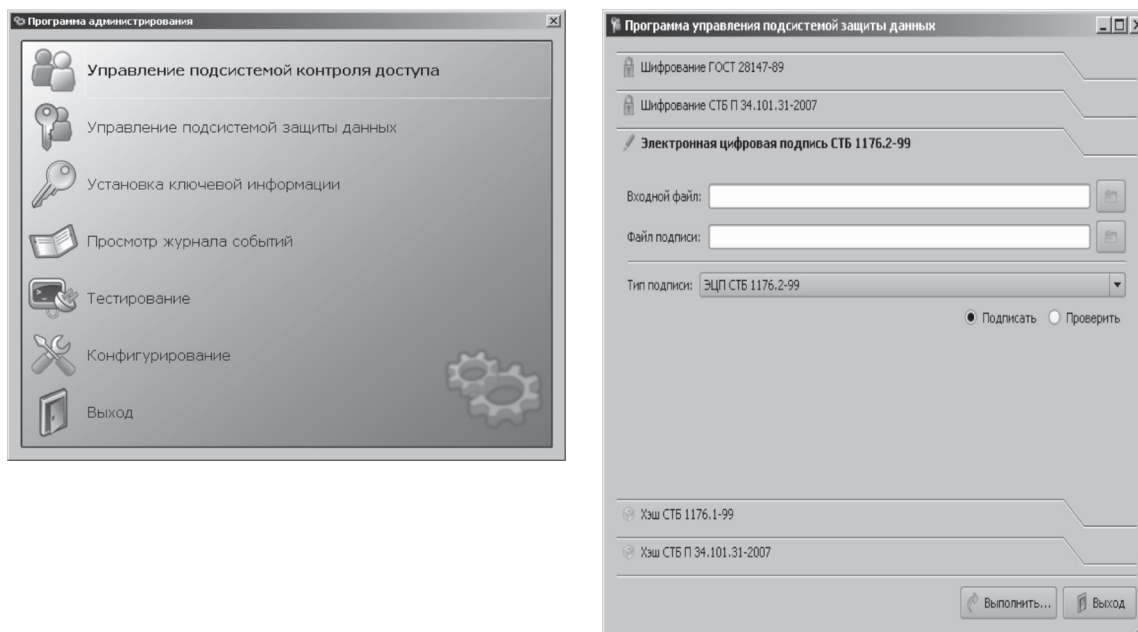


Рисунок 5 – Примеры интерфейса ПО ПАК «Подпись»

ции. В ПАК «Подпись» используются два элемента аутентификации: персональный идентификационный объект и персональный пароль пользователя, что предотвращает НСД к ПЭВМ при хищении одного из них.

В качестве персонального идентификационного объекта в ПАК «Подпись» используется USB-ключ, а в качестве персонального пароля пользователя – короткий ПИН-код, который хранится пользователем в тайне. Защищенность от атаки перебором поддерживается за счет ограничения числа попыток ввода ПИН-кода, после чего ЭКД переходит в фазу блокирования, выход из которой возможен только по предъявлению пользователем персонального разблокировочного кода (ПРК-кода), также хранимого пользователем в тайне. Количество попыток ввода ПРК-кода ограничено, после чего наступает необратимое блокирование ЭКД.

В современных ОС общего назначения реализуется однофакторная модель аутентификации, в которой необходимо задание сложного пароля для предотвращения атаки перебором, что делает его трудным для запоминания. Пользователь часто прибегает к использованию упрощенного пароля или к его записи на каком-либо носителе, что создает дополнительные возможности хищения пароля.

Двухфакторная модель аутентификации, реализованная в ПАК «Подпись», позволяет исключить выше перечисленные уязвимости.

Кроме того, в ОС, использующих шифрование файловой системы, ключи шифрования файловых объектов связаны с паролем пользователя. Как правило, алгоритмы усложнения для выработки ключа с использованием пароля являются известными, а это приводит к тому, что злоумышленнику достаточно взломать лишь пароль пользователя, чтобы получить доступ к зашифрованным данным.

В ПАК «Подпись» ключевая информация не зависит от пароля пользователя, а создается на основе случай-

ной числовой последовательности, полученной с ГСЧП ЭПК, и хранится в защищенной от НСД области ЭПК, что снижает риски компрометации зашифрованной информации.

ПО ПАК «Подпись» встраивается в ОС и внедряется в ее политику разграничения доступа. Для разграничения доступа к объектам на этапе активации создаются две группы операторов ПАК «Подпись»:

- администраторы, обладающие полномочиями по управлению подсистемой контроля доступа, настройками безопасности и аудита;
- пользователи, которым доступны только криптографические функции.

Информация, занесенная в USB-ключ администратором на конкретной ПЭВМ с установленным ПО ПАК «Подпись», привязывает USB-ключ к определенной учетной записи ОС данной ПЭВМ. Имеется также возможность многопользовательской привязки для использования администратором одного USB-ключа на разных ПЭВМ.

ПО ПАК «Подпись» встраивается в ОС и внедряется в ее политику разграничения доступа. Для разграничения доступа к объектам на этапе активации создаются две группы операторов ПАК «Подпись»:

- администраторы, обладающие полномочиями по управлению подсистемой контроля доступа, настройками безопасности и аудита;
- пользователи, которым доступны только криптографические функции.

Информация, занесенная в USB-ключ администратором на конкретной ПЭВМ с установленным ПО ПАК «Подпись», привязывает USB-ключ к определенной учетной записи ОС данной ПЭВМ. Имеется также возможность многопользовательской привязки для использования администратором одного USB-ключа на разных ПЭВМ.

Заключение

Разработанный ПАК «Подпись» не имеет полных аналогов в Республике Беларусь. К его достоинствам относятся:

- встраиваемость в ОС семейства Windows и Linux, что позволяет в полной мере использовать их политику безопасности;

- двухфакторная аутентификация оператора, что позволяет освободить пользователя от необходимости запоминания различных имен и паролей – достаточно знать только свой ПИН-код;

- реализация национальных стандартов криптопреобразований;

- генерация и защищенное хранение ключевой информации в ЭПК USB-ключа.

ПАК «Подпись», являясь современным техническим средством защиты информации, имеет потенциал для дальнейшего развития в следующих направлениях:

- создание вместо стандартного считывателя ЭПК собственной высокопроизводительной аппаратной платформы, реализующей национальные алгоритмы криптографических преобразований;

- встраивание и/или подключение к аппаратному устройству флэш-памяти для организации защищенного хранения пользовательских данных (создание открытого и закрытого для доступа извне разделов);

- загрузка ОС в режиме «только чтение» с аппаратного устройства для работы с защищаемыми данными

закрытого раздела (шифрование, подпись) с возможностью их выгрузки на открытый раздел устройства;

- создание криптопровайдера для ОС Windows и использование возможностей аппаратного устройства в протоколе SSL.

Литература:

1. Автоматизированные системы. Защита от несанкционированного доступа к информации. Классификация автоматизируемых систем и требования по защите информации / Материал Гостехкомиссии России // – М.: Военное издательство, 1992.

2. Сайт компании «Рутокен»/ <http://www.rutoken.ru>

3. Сайт компании «Аладдин Р.Д.»/ <http://www.aladdin-rd.ru>.

4. Сайт компании «ОКБ САПР»/ <http://www.bit-info.com>.

5. Информационный листок ООО «ПрограмПарк» «ОС «Магистр», 2010.

6. Сайт ООО «ПрограмПарк»/ <http://www.programpark.ru/smart>.

Abstract

We designed and manufactured a smart card system for protecting information processed and stored on a PC from an unauthorized access. The system integrates hardware and software components to generate and securely store cryptographic keys, encrypt information, provide digital signing capabilities, and control computer logon and access.

Поступила в редакцию 27.05.2013 г.

VECTOR OF A TECHNOLOGIES

**Предлагаем поставки со склада и под заказ:
ЧАСТОТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ, СЕРВОДВИГАТЕЛЕЙ,
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ, ИНДУКТИВНЫХ ДАТЧИКОВ, ФОТОДАТЧИКОВ,
ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ РЕЛЕ И ДРУГОГО ОБОРУДОВАНИЯ
ОТ ВЕДУЩИХ МИРОВЫХ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ.**



**Компания «Вектор Технологий»
является официальным дистрибьютором
на территории Республики Беларусь компаний
YASKAWA, DATALOGIC, STEUTE, FOTEK, WEG и VIPA.**

Наши специалисты с радостью помогут решить ваши задачи.
Tel: +375-17-265-60-15, fax: +375-17-265-60-16, mob: +375-29-685-60-15.
info@vec-tech.by, web: <http://www.vec-tech.by>

МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ДАЛЬНОМЕРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВУХВОЛНОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ

УДК 621.375.826

В.Л. Козлов,
БГУ, г. Минск

Аннотация

Приводятся методы повышения точности измерения лазерных дальномеров, основанные на использовании двухволнового инжекционного лазера в качестве источника излучения и физических принципов, которые ранее не использовались для измерения расстояний. Измерители позволяют получить информацию о скорости распространения излучения в среде вдоль линии наблюдения и учесть ее значение при расчете дальности по величине оптической задержки, что повышает точность измерения расстояний.

Введение

Относительная погрешность измерения расстояний одноволновыми лазерными дальномерами по величине оптической задержки сигнала на дистанции ограничена значениями порядка 10^{-5} из-за отсутствия информации о скорости распространения излучения вдоль линии наблюдения в конкретных метеоусловиях. Так, например, для излучения на длине волны 0,8 мкм при изменении температуры на один градус коэффициент преломления воздуха изменяется на $0,9 \cdot 10^{-6}$. Для прецизионных лазерных дальномерных систем среднеквадратичная погрешность измерений, обусловленная дисперсионными свойствами атмосферы, может быть снижена до единиц сантиметров путем расчета группового показателя преломления, если известны давление, температура и влажность [1, 2]. Однако эта операция достаточно трудоемка и требует привлечения дополнительных метеорологических средств и вычислительной техники.

Для учета состояний среды при распространении зондирующего излучения вдоль линии наблюдения [3] предлагается использование зондирующего излучения двухволнового лазера [4] на двух различных оптических длинах волн. Это позволяет получить информацию о скорости распространения излучения на трассе и учесть ее значение при вычислении дальности.

Влияние дисперсии воздуха и атмосферных газовых компонент на выбор длин волн зондирующих сигналов

Вдали от полос поглощения основных газов, содержащихся в атмосфере, в спектральной области видимого и ближнего инфракрасного света для расчета дисперсии воздуха можно использовать выражение [3]:

$$n = 1 + \frac{n_c - 1}{1 + \frac{\alpha}{1 + 15\alpha}(t - 15)} \cdot \frac{p}{760} - \frac{55 \cdot 10^{-9} e}{1 + \alpha t}, \quad (1)$$

где $\alpha = 0,00367$ – коэффициент объемного расширения воздуха; t – температура ($^{\circ}\text{C}$); p – барометрическое давление (мм рт. ст.); e – параметр, учитывающий влажность воздуха; n_c – дисперсия сухого воздуха ($e = 0$) при условиях

$t = 15^{\circ}\text{C}$ и $p = 760$ мм рт. ст. Дисперсия сухого воздуха при некоторых температурах и нормальном давлении в диапазоне длин волн 0,5–1,0 мкм представлена на рисунке 1. Из графика следует, что для излучения на длине волны 0,8 мкм при изменении температуры на один градус коэффициент преломления воздуха изменяется на $0,9 \cdot 10^{-6}$. Очевидно, при наличии флуктуаций температуры и давления на трассе под величинами t и p подразумеваются средние значения.

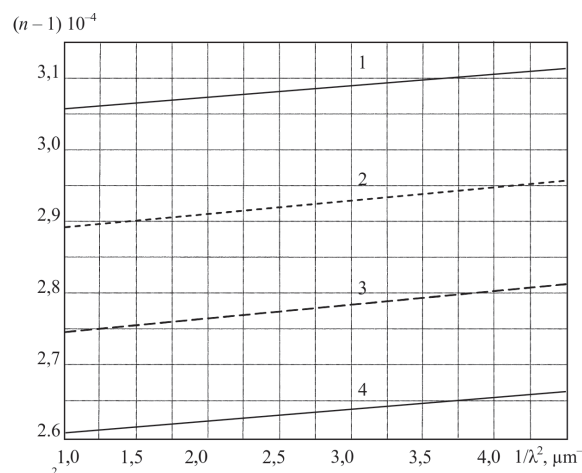


Рисунок 1 – Дисперсия сухого воздуха при $p = 760$ мм рт. ст. и температурах $t = -15^{\circ}\text{C}$ (1), 0°C (2), $+15^{\circ}\text{C}$ (3) и $+30^{\circ}\text{C}$ (4)

Чтобы избежать влияния аномальной дисперсии, длины волн генерации двухволнового лазера должны выбираться вне полос поглощения основных газов, содержащихся в атмосфере, в спектральной области видимого и ближнего инфракрасного диапазона. Были рассчитаны спектры пропускания для основных газов, содержащихся в атмосфере. Коэффициент поглощения i -ой линии газовой компоненты [2] определялся как:

$$\alpha_i(\nu) = \frac{S_i N}{\pi} \frac{\gamma_i}{(\nu - \nu_i)^2 + \gamma_i^2}, \quad (2)$$

где S_i , ν_i , γ_i – интенсивность, частота и спектральная полуширина выделенной i -ой линии соответственно, N – концентрация газа ($N = 2,479 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ при нормальном атмосферном давлении и $T = 296 \text{ K}$).

Спектр показателя преломления газа находился из выражения:

$$\Delta n_i(\nu) = -\frac{1}{4\pi\nu} \frac{S_i N P_a}{\pi} \frac{(\nu - \nu_i)^2}{(\nu - \nu_i)^2 + \gamma_i^2}, \quad (3)$$

где P_a – парциальное давление газа.

Анализ рассчитанных спектральных зависимостей коэффициентов пропускания и дисперсии показателя прелом-

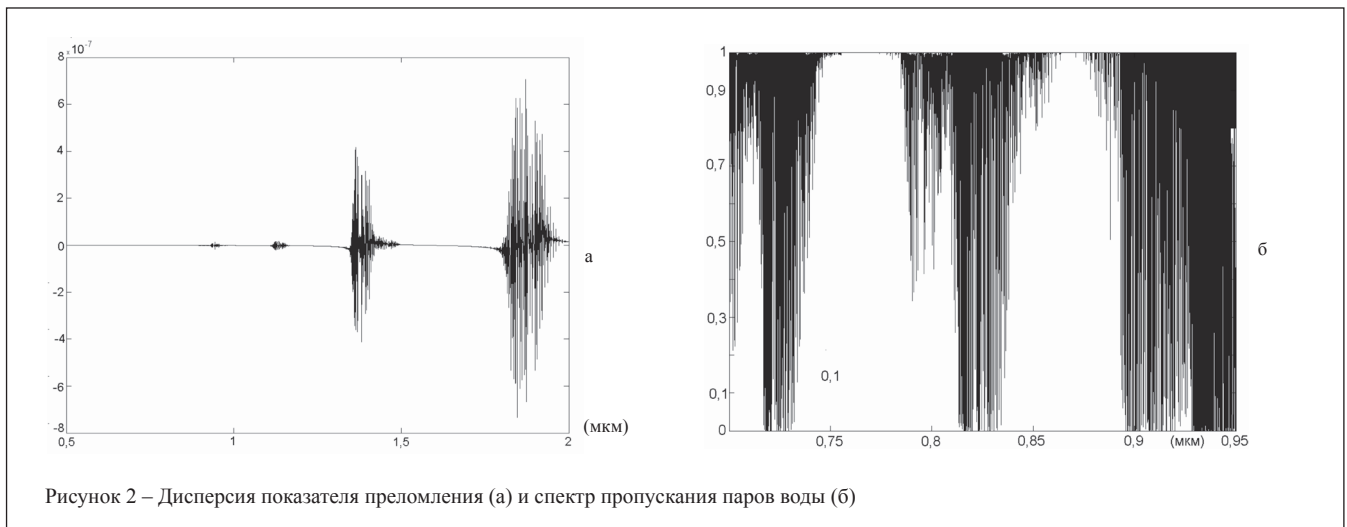


Рисунок 2 – Дисперсия показателя преломления (а) и спектр пропускания паров воды (б)

ления $\Delta n_i(\nu)$ основных газов, содержащихся в атмосфере, показал, что для азота аномальная дисперсия проявляется лишь на длинах волн более 4 мкм, а для кислорода и углекислого газа имеются полосы аномальной дисперсии на длинах волн 0,75 мкм и 1,9 мкм, соответственно, однако, их влияние на показатель преломления невелико ($10^{-9} \dots 10^{-10}$), поэтому дисперсию этих газов можно не учитывать при выборе длин волн зондирующего излучения.

Спектральные зависимости коэффициентов пропускания (ν) и дисперсии показателя преломления $\Delta n_i(\nu)$ паров воды представлены на рисунке 2. Пары воды имеют большее число линий аномальной дисперсии в ближнем ИК-диапазоне и большую интенсивность линий ($10^{-5} \dots 10^{-6}$), поэтому зондирующие длины волн следует выбирать вне полос поглощения воды. Руководствуясь приведенными доводами, длины волн двухволнового лазера были выбраны: $\lambda_1 = 843$ нм, $\lambda_2 = 793$ нм.

Двухволновой рециркуляционный дальномер

Для учета дисперсии среды разработан рециркуляционный метод измерения дальности, основанный на оптоэлектронной рециркуляции одновременно на двух оптических длинах волн [5]. Функциональная схема двухволнового лазерного дальномера, реализующего рециркуляционный метод построения, показана на рисунке 3. В качестве излучателя дальномера используется лазерный диод на основе асимметричной квантоворазмерной гетероструктуры [4].

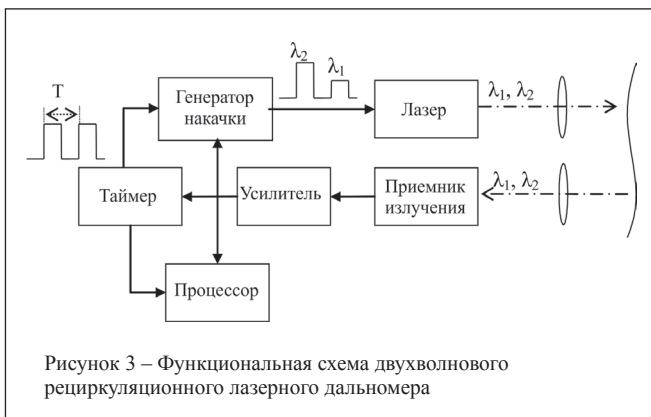


Рисунок 3 – Функциональная схема двухволнового рециркуляционного лазерного дальномера

Для рециркуляционных дальномеров измеряемое расстояние играет роль оптической линии задержки в петле обратной связи. При замыкании оптической обратной связи в системе устанавливается процесс рециркуляции с частотой, которая определяется задержкой излучения на дистанции и постоянной электрической задержки в функциональных блоках системы. На дистанцию поочередно посылаются оптические импульсы на разных длинах волн λ_1 и λ_2 . Так как скорость распространения излучения в воздухе зависит от длины волны, причем $\lambda_2 < \lambda_1$, то задержка на дистанции излучения на длине волны λ_2 будет больше, чем на λ_1 . Разность оптических задержек за один период рециркуляции составляет

$$\Delta t = \frac{2L}{c} (n_2 - n_1), \quad (4)$$

где L – измеряемое расстояние; n_1 и n_2 – показатели преломления воздуха на длинах волн λ_1 и λ_2 соответственно.

При разности длин волн $\Delta \lambda = 20$ нм величина Δt на расстоянии $L = 1$ км составляет порядка 1 пс. Очевидно, что измерение таких коротких временных интервалов вызывает большие сложности. Однако в режиме рециркуляции происходит накопление разности временных задержек и за число периодов рециркуляции $N = 10^4 \dots 10^5$ разность задержек становится равной $T = N \cdot \Delta t$ и достигает десятки или сотни наносекунд. В разработанной системе для измерения Δt определяется число периодов рециркуляции N , за которое разность задержек станет равной $T = 100$ нс. В этом случае дальность вычисляется по формуле

$$L = \frac{c}{2n_1} t_{\text{opt}} = \frac{c}{2} \left(t_{\text{opt}} - \frac{n_1 - 1}{\Delta n_1} \frac{T}{N} \right), \quad (5)$$

где t_{opt} – время задержки на дистанции излучения на длине волны λ_1 , $\Delta n_1 = n_2 - n_1$ – разность показателей преломления на λ_2 и λ_1 в условиях измерений.

Можно показать [3], что если заданы длины волн излучения λ_1 и λ_2 , то обратная относительная дисперсия воздуха, равная отношению $(n_1 - 1)/(n_2 - n_1)$, оказывается практически постоянной и не зависит от условий окружающей среды. Далее для удобства используем значения

n_o и Δn_o при определенных условиях окружающей среды, например, $t = 0^\circ\text{C}$ и $p = 760$ мм рт. ст. Эти значения можно рассчитать или найти из справочных данных. Тогда на основании соотношения

$$\frac{n_1 - 1}{\Delta n_1} = \frac{n_o - 1}{\Delta n_o}, \quad (6)$$

получаем окончательную формулу для расчета длины трассы:

$$L = \frac{c}{2} \left(t_{\text{opt}} - \frac{n_o - 1}{\Delta n_o} \cdot \frac{T}{N} \right). \quad (7)$$

На рисунке 4а приведены значения числа периодов рециркуляции N , необходимых для измерения дальности с учетом дисперсии на трассе, для дистанции $L \sim 3$ км в зависимости от температуры окружающей среды при $\Delta\lambda = 50$ нм.

Величина N показывает число периодов рециркуляции, за которые разность оптических задержек на дистанции Δt на длинах волн $\lambda_1 = 843$ нм и $\lambda_2 = 793$ нм достигнет $T = 100$ нс. Для расстояний $L \sim 0,5 \dots 5$ км и $\Delta\lambda = 20 \dots 70$ нм величина разности оптических задержек излучения на дистанции Δt в зависимости от температуры окружающей среды изменяется в пределах 1...15 пс. Для частот рециркуляции порядка сотен килогерц время определения дальности с учетом дисперсии на трассе составит менее 1 с.

Основным источником погрешности измерений в таком дальномере является зависимость точности измерений от амплитуды дистанционного импульса. Метод учета влияния амплитуды дистанционного импульса на точность описан в [6]. Сущность метода заключается в использовании динамического порога регистрации сигнала. Выражение для расчета дальности, учитывающее влияние амплитуды импульса на точность измерений, имеет вид

$$L = \frac{c}{2} \left(\frac{1}{f} - t_e - \frac{T}{(1-k)N_1} - \frac{T}{N\Delta n_o} (n_o - 1) \right), \quad (8)$$

где N_1 – число периодов рециркуляции при измененном пороге регистрации в k раз ($k = 0,2 \dots 0,9$), f – частота

рециркуляции, t_e – время электрической задержки, c – скорость света в вакууме. В формуле вычисления дальности (8) третий член в квадратных скобках учитывает влияние порога регистрации импульса, а четвертый член – дисперсии коэффициента преломления на результат измерений. В расчетную формулу не входят амплитуда дистанционных импульсов, порог компаратора, длительность фронта импульса, что обеспечивает независимость результата измерений от параметров приемно-передающего тракта и окружающей среды. Суммарную погрешность двухволнового рециркуляционного метода измерений дальности можно представить в следующем виде:

$$\delta L = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{1}{f_2} \right)^2 \Delta f^2 + \left(\frac{T^2}{0,25 N_1^2 U_p t_{\phi}} \right)^2 \Delta U_s^2 + \left(\frac{(n_o - 1)}{\Delta n_o} \right)^2 \left[\left(\frac{T^2 c}{N^2 L \Delta n^2} \right)^2 \Delta(\Delta n)^2 + \left(\frac{T^2 c}{N^2 L^2 \Delta n} \right)^2 \Delta L^2 \right]}. \quad (9)$$

В приведенном выражении (9) второй член под знаком корня представляет погрешность, обусловленную флуктуациями амплитуды зондирующих сигналов, третий член – погрешность, обусловленная девиацией разностной длины волны, а четвертый член – погрешность, обусловленная не точным совмещением оптических путей. Очевидно, что использование двухволнового лазера в рециркуляционном дальномере позволит минимизировать вклад в суммарную погрешность последних трех членов в формуле (9), что обеспечит повышение точности измерения дальности более чем на порядок, по сравнению с дискретным набором лазеров [3].

Двухволновой импульсно-фазовый дальномер

Принцип измерения двухволнового импульсно-фазового дальномера заключается в установлении такой частоты следования зондирующих импульсов на различных оптических длинах волн, при которой на дистанции будет укладываться ее целое число периодов, т.е. фаза оптического импульса, прошедшего измеряемое расстояние, будет

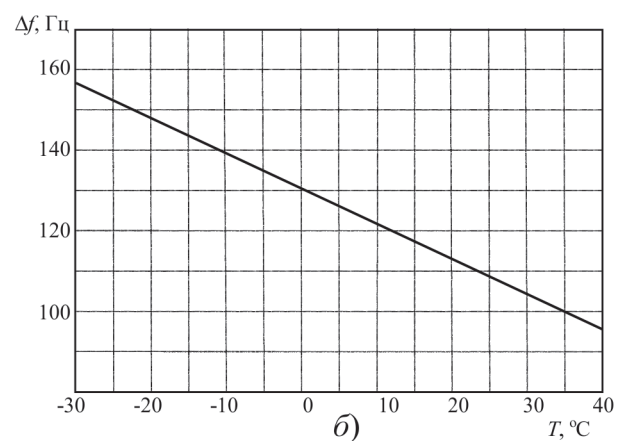
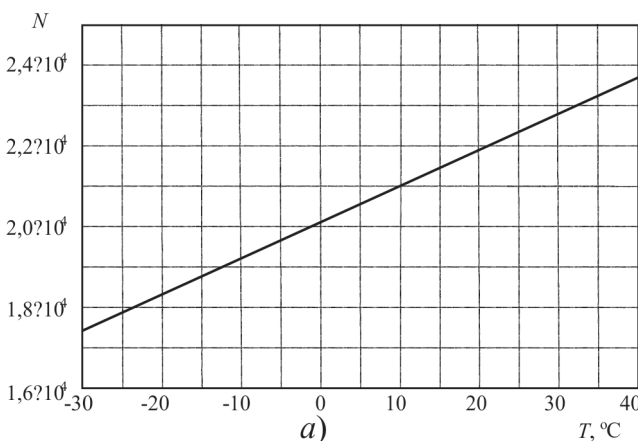


Рисунок 4 – Число периодов рециркуляции N (а) и разность частот $f_{\lambda_1} - f_{\lambda_2} = \Delta f$ (б) в зависимости от температуры окружающей среды для $\Delta\lambda = 50$ нм, $L = 3$ км

равна фазе опорного импульса, прошедшего контрольную линию задержки. Функциональная схема лазерного дальномера, реализующего разработанную методику, представлена в [7]. Лазер излучает на дистанцию оптические импульсы на длинах волн λ_1, λ_2 , частота следования которых [4] следующим образом зависит от тока накачки:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{vk_1}{\tau} \left(\frac{j}{j_{th}} - 1 \right)}, \quad (10)$$

где v – скорость света, k_1 – коэффициент потерь в резонаторе, τ – время жизни носителей тока, j – плотность тока накачки, j_{th} – плотность порогового тока. Значение частоты f находится в пределах сотни МГц – 1 ГГц, и с помощью тока легко обеспечивается перестройка частоты на 10–20 %. Выражение для расчета дальности в таком дальномере будет иметь вид

$$L = \frac{cK}{2} \left[\frac{1}{f_{\lambda_1}} - \frac{n_o - 1}{\Delta n_o} \left(\frac{1}{f_{\lambda_2}} - \frac{1}{f_{\lambda_1}} \right) \right], \quad (11)$$

где $f_{\lambda_1}, f_{\lambda_2}$ – частоты импульсов на длинах волн λ_1 и λ_2 , K – число периодов за время распространения излучения на дистанции.

На рисунке 4б приведены значения разности $\Delta f = f_{\lambda_1} - f_{\lambda_2}$ для дистанции $L \sim 3$ км в зависимости от температуры окружающей среды t при $\Delta\lambda = 50$ нм на длинах волн $\lambda_1 = 843$ нм и $\lambda_2 = 793$ нм.

Сравнение результатов измерения дальности одноволновым дальномером ($\lambda = 843$ нм) и двухволновыми импульсно-фазовым и рециркуляционным дальномерами ($\lambda_1 = 843$ нм, $\lambda_2 = 793$ нм) представлено на рисунке 5, где показана зависимость разности показаний дальномеров $\Delta L = L_1 - L_2$ от измеряемого расстояния L при различных температурах окружающей среды t и давлении $p = 760$ мм рт. ст. Очевидно, показания дальномеров будут совпадать лишь при $t = 0$ °С. При других температурах одноволновой дальномер дает погрешность до 20 см, что связано с отсутствием информации о скорости распространения излучения на трассе. Значения дистанции при одноволновых измерениях будут завышены при минусо-

вых температурах Цельсия и занижены при плюсовых температурах по сравнению с показаниями двухволнового дальномера [3].

Погрешность измерений одноволновым дальномером по сравнению с двухволновыми измерениями [3] можно оценить по формуле

$$\Delta L = -L(n_c - 1)(1 + 15\alpha) \frac{p}{760} \alpha t. \quad (12)$$

Как видно, ошибка ΔL растет линейно с длиной измеряемой трассы L , слабо изменяется с атмосферным давлением p и практически не зависит от длины волны лазерного излучения λ . При $p = 760$ мм рт. ст. на длинах волн вблизи $\lambda = 1$ мкм приближенно находим

$$\Delta L = -L\delta t \quad (13)$$

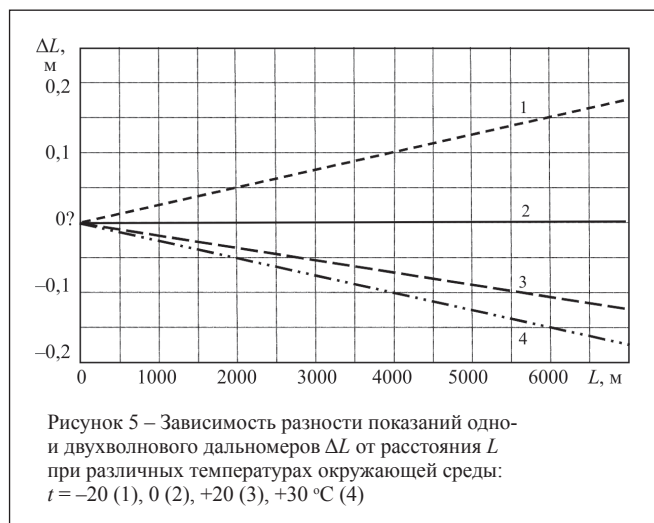
где $\delta = 1,06 \cdot 10^{-6}$.

Метод построения двухволнового рециркуляционного дальномера с линейной частотной модуляцией

Известны лазерные дальномеры [8], в которых используется линейная частотная модуляция (ЛЧМ) зондирующего излучения с последующим фотогетеродинным приемом отраженного объектом излучения и обработкой полученного сигнала согласованным фильтром. Дальность до объекта в такой системе определяется по времени задержки импульса на выходе согласованного фильтра относительно зондирующего импульса. Длительность импульса на выходе согласованного фильтра составляет десятки-сотни наносекунд. Для обеспечения высокой точности измерения дальности необходимо измерять время задержки излучения на дистанции с точностью десятки-сотни пикосекунд, что для импульса длительностью фронта в десятки наносекунд вызывает большие сложности и значительно ограничивает точность измерений.

Разработанный метод повышения точности измерения дальности основывается на использовании рециркуляции линейно-частотно-модулированного (ЛЧМ) импульса длительностью несколько десятков микросекунд, который формируется и обрабатывается согласованными фильтрами. Для таких сигналов можно использовать известные методы оптимальной обработки, например, с помощью согласованных фильтров, существенно улучшающих отношение сигнал/шум и обладающих высокой стабильностью электрической задержки. При их применении легко осуществляется автоматическая регулировка коэффициента передачи фотоприемного тракта, что устраняет необходимость использования пороговых устройств в петле обратной связи и, следовательно, необходимость системы временной привязки [9].

В известных дальномерах ограниченная точность измерений обусловлена зависимостью скорости распространения излучения на дистанции от условий окружающей среды. Использование в качестве источника излучения двухволнового лазера позволяет получить информацию о скорости распространения излучения на трассе и учесть ее значение при вычислении дальности [9]. На рисунке 6 представлена функциональная схема двухволнового дальномера с рециркуляцией ЛЧМ-сигнала. В качестве излучателя дальномера используется двухволновой полупроводниковый лазер [4].



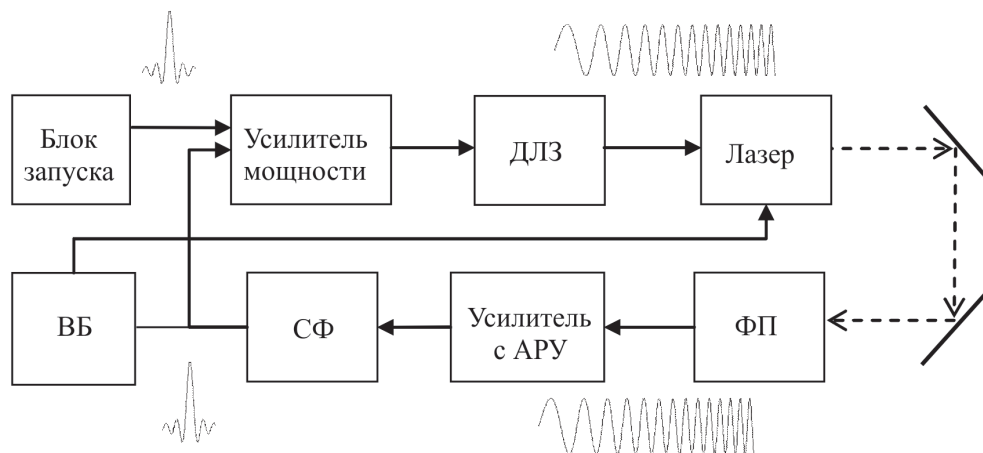


Рисунок 6 – Функциональная схема двухволнового дальномера с рециркуляцией линейно-частотно-модулированного (ЛЧМ)-сигнала: дисперсионная линия задержки (ДЛЗ), фотоприемник (ФП), усилитель с АРУ (автоматической регулировкой усиления), согласованный фильтр (СФ), вычислительный блок (ВБ)

Принцип работы дальномера заключается в следующем. Для запуска режима рециркуляции формируется короткий импульс, аналогичный сжатому импульсу на выходе согласованного фильтра, который через усилитель мощности возбуждает дисперсионную линию задержки. Модулированный ЛЧМ-сигналом излучение на длине волны λ_1 посылается на дистанцию, отражается от измеряемого объекта, регистрируется фотоприемником с задержкой во времени, равной $t_{\text{opt}\lambda_1}$, усиливается усилителем с АРУ и попадает в согласованный фильтр. На выходе согласованного фильтра сформируется сигнал вида

$$G(t) = \sqrt{\frac{2\beta}{\pi}} \frac{\sin[T - (\tau_{\text{opt}\lambda_1} + \tau_{el})]\beta T / 2}{\beta[t - (\tau_{\text{opt}\lambda_1} + \tau_{el})]} \cos \omega_0[t - (\tau_{\text{opt}\lambda_1} + \tau_{el})], \quad (14)$$

где T , ΔF , ω_0 , β – длительность, девиация частоты, начальная частота и скорость перестройки частоты ЛЧМ-импульса.

Временное положение отклика на выходе согласованного фильтра определяется временем оптической задержки $t_{\text{opt}\lambda_1}$ на дистанции при постоянной электрической задержке t_{el} в согласованном фильтре. В системе устанавливается режим рециркуляции ЛЧМ-импульса, период которой определяется задержкой излучения на дистанции. По разности периодов рециркуляции на длинах волн λ_1 и λ_2 учитывается дисперсия атмосферы в соответствии с выражением

$$L = \frac{c}{2} \left(t_{\text{opt}\lambda_1} - \frac{n_0 - 1}{\Delta n_0} \Delta t \right) = \frac{c}{2} \left[\left(\frac{1}{f_{\lambda_1}} - t_{el} \right) - \frac{n_0 - 1}{\Delta n_0} \left(\frac{1}{f_{\lambda_2}} - \frac{1}{f_{\lambda_1}} \right) \right], \quad (15)$$

где f_{λ_1} и f_{λ_2} – частоты рециркуляции на длинах волн λ_1 и λ_2 . Так как в качестве рециркулирующего сигнала в дальномере применен линейно-частотно-модулированный импульс,

то использование обработки ЛЧМ-сигнала с помощью согласованного фильтра позволяет улучшить отношение сигнал/шум на выходе системы (в среднем в 10^2 – 10^3 раз), что расширяет диапазон измеряемых расстояний и повышает точность измерений. Также улучшается помехоустойчивость системы от внешних фоновых засветок и шумов.

Метод построения лазерного дальномера на основе синхронного детектирования

Дальность действия и точность измерения известных лазерных дальноммерных систем в значительной степени определяется отношением сигнал/шум на входе измерительного тракта. Известно, что использование обработки сигнала на основе синхронного детектирования с последующим когерентным накоплением позволяет повысить отношение сигнал/шум, однако, по данным литературных источников этот метод не используется в лазерных дальноммерах для обработки дистанционного сигнала. Для решения этой задачи предлагается метод обработки дистанционного сигнала фазового дальноммера на основе синхронного детектирования, обеспечивающий увеличение дальности действия дальноммера и независимость погрешности измерений от амплитуды сигнала.

Сущность разработанного метода заключается в одновременной обработке отраженного от объекта излучения с помощью двух синхродетекторов с последующим когерентным накоплением и интегрированием [10]. Чтобы исключить зависимость погрешности измерений от амплитуды сигнала, тактовые импульсы в синхродетекторах сдвинуты на $\pi/2$ (четверть периода зондирующего сигнала). Функциональная схема дальноммера, реализующего предложенный метод, представлена в [10]. Принцип измерения основан на фазовом способе измерения дальности. Использование синхронного детектирования позволяет выделить дистанционный оптический сигнал на фоне шума, улучшить отношение сигнал/шум и таким образом повысить точность измерения дальности.

Для вычисления дальности на интервале оптических задержек от 0 до T необходимо учитывать знаки выходных

сигналов первого U_1 и второго U_2 синхродетекторов. При этом дальность в зависимости от знаков сигналов U_1 и U_2 определяется по следующему алгоритму:

если U_1 – положительное, U_2 – положительное, $n=0$,
 U_1 – отрицательное, U_2 – отрицательное, $n=2$, по формуле

$$L = \left(n + \frac{|U_2|}{|U_1| + |U_2|} \right) \frac{Tc}{8}, \quad (16)$$

если U_1 – отрицательное, U_2 – положительное, $n=1$;
 U_1 – положительное, U_2 – отрицательное, $n=3$, по формуле,

$$L = \left(n + \frac{|U_1|}{|U_1| + |U_2|} \right) \frac{Tc}{8}, \quad (17)$$

где c – скорость света, T – период тактового генератора.

Как видно из (16, 17) при использовании двух каналов синхронного детектирования результат вычисления дальности не зависит от амплитуды дистанционного сигнала, а определяется сигналами синхродетекторов U_1 , U_2 .

Для учета значения скорости света на измеряемой дистанции целесообразно использование в качестве источника излучения двухволнового лазера [4]. В этом случае дальность до объекта определяется по описанной выше методике поочередно на двух длинах волн генерации лазера λ_1 и λ_2 . Так как скорость излучения в воздухе зависит от длины волны, то результаты вычисления дальности L_{λ_1} , L_{λ_2} на длинах волн λ_1 , λ_2 дадут разные значения. Выражение для точного расчета дальности будет иметь вид

$$L = \frac{c}{2} \left(t_{\text{opt}\lambda_1} - \frac{n_0 - 1}{\Delta n_0} \Delta t \right) = \\ = L_{\lambda_1} - \frac{n_0 - 1}{\Delta n_0} (L_{\lambda_2} - L_{\lambda_1}). \quad (18)$$

Таким образом, использование двух каналов синхронного детектирования со сдвинутой на $\pi/2$ фазой тактового сигнала обеспечивает возможность применять синхродетектор в лазерной дальнометрии, при этом результат измерений не зависит от амплитуды сигнала и расширяется диапазон измеряемых расстояний.

Метод построения лазерного дальномера на основе эффекта Доплера

С помощью эффекта Доплера можно решать различные прикладные задачи, например, определять скорость и угол направления движения объекта, спектр и амплитуду вибраций и т.п. Однако по данным литературных источников доплеровские измерители не позволяют измерять дальность до объекта [11].

Физический принцип измерения дальности на основе эффекта Доплера заключается в определении спектра доплеровского сигнала [12], обусловленного радиальной скоростью движения лазерного луча при сканировании поверхности, а затем по величине угловой скорости сканирования однозначно определяется расстояние до поверхности. Функциональная схема дальномера, реализующая разработанный метод измерений, представлена в [12], а на рисунке 7 приведены векторные диаграммы, поясняющие его работу. В такой системе осуществляется сканирование лазерным лучом заданной поверхности в угле φ с угловой скоростью ω . Отраженное от поверхности оптическое излучение сдвигается по частоте по сравнению с зондирующим сигналом на доплеровскую частоту f_d . Среднее значение числа импульсов доплеровского сигнала за все время сканирования можно определить из выражения

$$f_d = 2 \frac{\omega r_0}{\lambda} \frac{1}{\varphi} \int_{-\varphi/2}^{\varphi/2} \left| \frac{\text{tg} \alpha}{\cos \alpha} \right| d\alpha = \\ = 4 \frac{\omega r_0}{\lambda} \frac{1}{\varphi} \left[\frac{1 - \cos(\varphi/2)}{\cos(\varphi/2)} \right]. \quad (19)$$

Определив число импульсов доплеровского сигнала f_d , дальность r_0 до поверхности находится из выражения

$$r_0 = \frac{f_d \cdot \varphi \cdot \lambda}{4\omega} \left[\frac{\cos(\varphi/2)}{1 - \cos(\varphi/2)} \right]. \quad (20)$$

Таким образом, зная угол сканирования и угловую скорость сканирования, и определив число импульсов доплеровского сигнала, можно однозначно определить расстояние до поверхности. Так как в качестве зондирующего сигнала используется излучение оптического диапазона, то даже при небольших скоростях сканирования допле-

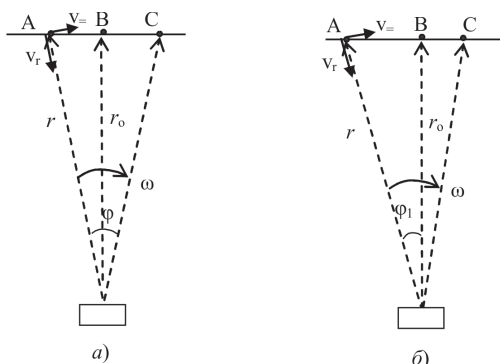
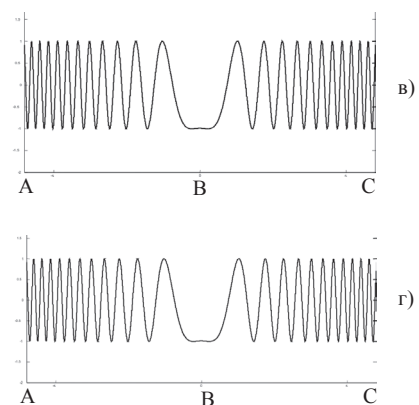


Рисунок 7 – Диаграммы, поясняющие принцип действия дальномера (а), (б) и форму доплеровского сигнала при сканировании поверхности (в), (г)



ровские сдвиги частоты будут иметь большие значения, что позволяет определять расстояние с высокой точностью. Диаграммы изменения доплеровского сигнала при симметричном (в) и не симметричном (г) сканировании поверхности представлены на рисунке 7.

Описанный выше алгоритм измерений будет эффективно работать, если измеряемая поверхность не имеет неровностей в пределах ширины лазерного луча. При измерениях дальности до поверхностей, имеющих неровности, меньшие ширины сканирующего луча, будут возникать погрешности, обусловленные тем, что различные части лазерного луча будут иметь различные доплеровские сдвиги частоты в зависимости от размера неровности. Метод измерения дальности в этом случае заключается в определении средней частоты и ширины спектра доплеровского сигнала, которые будут характеризовать соответственно расстояние и размер неровностей поверхности [12]. В этом случае средняя дальность до поверхности, имеющей неровности, определяется средним значением числа импульсов доплеровской частоты f_d за время сканирования T

$$r_o = \frac{\left(\sum_{i=1}^n f_{di} \right) T \cdot \varphi \cdot \lambda}{n \cdot 4 \omega} \left[\frac{\cos(\varphi/2)}{1 - \cos(\varphi/2)} \right], \quad (21)$$

где f_{di} – среднее значение частоты доплеровского сигнала за одно измерение, n – число измерений f_{di} за время сканирования.

Ширину спектра доплеровского сигнала Δf_d в зависимости от размера неровностей можно оценить из выражения

$$\Delta f_d = 2 \frac{\omega r_o}{\lambda} \left(\frac{\operatorname{tg} \alpha \cdot \cos(\alpha \pm \arctg \frac{2x}{l}) - \cos \alpha}{\cos \alpha} - \frac{\operatorname{tg}(\alpha \pm \arctg \frac{2x}{l}) \cdot \cos \alpha}{\cos(\alpha \pm \arctg \frac{2x}{l})} \right), \quad (22)$$

где l – ширина лазерного луча, x – величина неровности поверхности, α – угол между лазерным лучом и перпендикуляром к поверхности. Размер неровностей определяется максимальным и минимальным значением доплеровской частоты в каждой конкретной точке поверхности.

На рисунке 8 представлена зависимость числа доплеровских импульсов от расстояния для длины волны $\lambda = 0,65$ мкм и различных углов сканирования.

При изменении расстояния от 10 до 50 метров число импульсов доплеровского сигнала изменяется в пределах от $0,15 \cdot 10^6$ до 10^6 при угле сканирования $\varphi = \pi/20$ и от $0,75 \cdot 10^6$ до $3,9 \cdot 10^6$ при угле сканирования $\varphi = \pi/10$. Чувствительность дальномера к изменению расстояния составляет порядка 370 импульсов доплеровского сигнала при изменении расстояния на 1 см на длине волны 0,65 мкм, и около 260 импульсов – на длине волны 0,95 мкм. На рисунке 9 представлена зависимость ширины спектра доплеровского сигнала Δf_d от размера неровностей x при ширине лазерного



Рисунок 8 – Зависимость числа доплеровских импульсов f_d от расстояния L : для длины волны $\lambda = 0,65$ мкм и углов сканирования 1 – $\varphi = \pi/20$ мкм, 2 – $\varphi = \pi/15$, 3 – $\varphi = \pi/10$

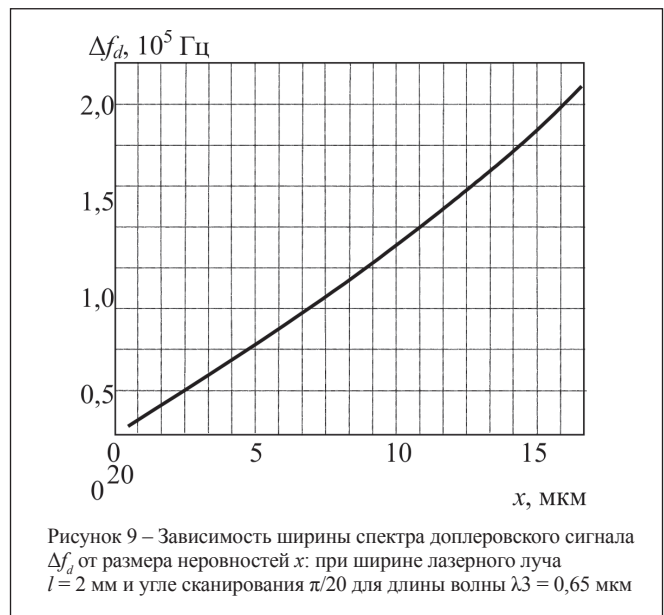


Рисунок 9 – Зависимость ширины спектра доплеровского сигнала Δf_d от размера неровностей x : при ширине лазерного луча $l = 2$ мм и угле сканирования $\pi/20$ для длины волны $\lambda_3 = 0,65$ мкм

Спектроанализатор [13] имеет разрешение по частоте

10 кГц при полосе анализа 20 МГц. Из приведенных данных можно оценить возможности измерительной системы при определении неровностей сканируемой поверхности. Использование в качестве источника излучения двухволнового лазера [4] позволяет повысить точность за счет измерения дальности на двух различных оптических длинах волн λ_1 и λ_2 . Разработанные методики на основе эффекта Доплера позволяют измерять расстояния, как до неподвижных объектов, так и до движущихся объектов, а также учитывают несимметричность сканирования лазерного луча относительно перпендикуляра к поверхности.

Заключение

Таким образом, разработаны методы повышения точности измерения лазерных дальномеров, основанные на использовании физических принципов, которые ранее не использовались для измерения расстояний. Это относится к использованию

эффекта Доплера, при этом обеспечивается не только измерение дальности, но и определение размера неровностей поверхности в пределах ширины лазерного луча. Другие методики, которые также не использовались в прецизионной лазерной дальнометрии, это синхронное детектирование и сложные частотно-модулированные сигналы с обработкой их согласованными фильтрами. Применение этих методик позволяет расширить диапазон измеряемых расстояний и повысить точность измерений. Использование в качестве источника излучения двухволнового полупроводникового лазера позволяет сформировать в дальнометре зондирующий сигнал на двух различных оптических длинах волн, что обеспечивает получение информации о скорости распространения излучения вдоль линии наблюдения и учет ее значения при расчете дальности по величине оптической задержки, что повышает точность измерения расстояний. По сравнению с другими известными двухволновыми дальнометрами, разработанные системы имеют преимущества в том, что оба зондирующих сигнала на разных длинах волн генерируются в одном оптическом резонаторе, что обеспечивает стабильность разностной длины волны в результате синхронизации электронно-оптических процессов в активной области лазера, а информационные импульсы проходят через одну и ту же систему оптико-электронной обработки.

Литература:

1. Зуев, В.Е. Оптика турбулентной атмосферы / В.Е. Зуев, В.А. Банах, В.В. Покасов. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 270 с.
2. The HITRAN molecular spectroscopic database and HAWKS (Hitran Atmospheric Workstation): 1996 Edition. / Rothman L. S. and all // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. – 1998. – Vol. 60, No. 5. – P. 665–710.
3. Козлов, В.Л. Прецизионные дальнометры на основе двухволнового инжекционного лазера / В.Л. Козлов // Оптический журнал. – 2008. – Т. 75., №9. – С. 62–66.
4. Полупроводниковый лазер: пат. 1385 Респ. Беларусь, МКИ Н 01 С 3/19 / А.А. Афоненко, В.К. Кононенко, И.С. Манак // Афіцыйны бюл. – 1996. – № 3. – С. 169.
5. Двухволновой рециркуляционный дальномер: пат. 3994 Респ. Беларусь, МКИ G 01C 3/08 / В.Л. Козлов // Афіцыйны бюл. – 2007. – № 5. – С. 216.
6. Козлов, В.Л. О повышении точности рециркуляционного дальнометра на основе двухволнового лазера // Изв. вузов. Приборостроение. – 2009. – № 9. – С. 68–73.
7. Прецизионный лазерный дальномер: пат. 6263 Респ. Беларусь, МКИ G 01C 3/08 / В.Л. Козлов, В.К. Кононенко, И.С. Манак // Афіцыйны бюл. – 2004. – № 2. – С. 215.
8. Laser rangefinder: Патент 1585053 Великобритании, МКИ G 01 S 17/08 / В. S. Collins, K. F. Hulme. – 25.02.1981.
9. Двухволновой рециркуляционный дальномер: пат. 17091 Респ. Беларусь, МКИ G 01 С 3/08 / В. Л. Козлов // Афіцыйны бюл. – 2013. – № 2. – С. 125.
10. Дальномер на синхродетекторе: пат. 8914 Респ. Беларусь, МКИ G 01C 3/08 / В.Л. Козлов // Афіцыйны бюл. – 2013. – № 1. – С. 197.
11. Лазерная дальнометрия / под ред. В.П. Васильева. – М.: Радио и связь, 1995. – 256 с.
12. Способ определения дальности до объекта: пат. 14765 Респ. Беларусь, МКИ G 01 С 3/08 / В.Л. Козлов // Афіцыйны бюл. – 2011. – № 4. – С. 125.
13. Козлов, В.Л. Спектроанализатор доплеровских сигналов // Изв. вузов. Приборостроение. – 2009. – №3. – С. 46–51.

Abstract

The methods of improving of the laser rangefinders measurement accuracy based on two-wavelength laser diode as the radiation source and the physical principles that have not previously been used in distance measurement are presented. Systems allow to receive information on the propagation speed of laser radiation along the supervision line and to take it into account in the distance calculations, which increases the accuracy of the distance measurement.

Поступила в редакцию 17.06.2013 г.

НОВОСТИ

АНАЛОГО-ЦИФРОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ (АЦП)

Полнофункциональная 16-разрядная система сбора данных ADAS3023 реализована на базе патентованной технологии изготовления высоковольтных промышленных схем iCMOS® компании Analog Devices и включает в себя восемь согласованных следящих-запоминающих усилителей с малой утечкой, обладающий высоким коэффициентом ослабления синфазного сигнала инструментальный усилитель с программируемым коэффициентом усиления, прецизионный, обладающий малым дрейфом источник опорного напряжения 4,096 В с буфером и 16-разрядный аналого-цифровой усилитель последовательного приближения с перераспределением заряда. Компонент способен выполнять одновременную выборку в двух каналах с быстродействием до 500 kSPS, четырех каналах с быстродействием до 250 kSPS, шести каналах с быстродействием до 167 kSPS

или восьми каналах с быстродействием до 125 kSPS. Диапазон входных дифференциальных напряжений составляет до $\pm 20,48$ В. Применение данного компонента упрощает проектирование системы, избавляя разработчика от необходимости учитывать вопросы буферизации сигналов, сдвига уровней, усиления/ослабления полезного сигнала, ослабления синфазного сигнала, времени установления и других вопросов аналогового преобразования сигнала. В то же время он позволяет уменьшить форм-фактор, время проектирования и стоимость разрабатываемой системы. ADAS3023 работает от напряжений питания 1,8 В, 5 В и ± 15 В, рассеивая 250 мВт. Компонент выпускается в 40-выводном корпусе LFCSP с габаритами 6 мм × 6 мм, рабочий температурный диапазон составляет от -40°C до $+85^{\circ}\text{C}$.

Альфасофт

ПРОГРАММА ИНТЕРАКТИВНОГО БАЛАНСИРОВАНИЯ РАЦИОНОВ МОЛОЧНОГО СТАДА

УДК 636.086

Е.В. Галушко, Н.Ф. Бондарь, А.В. Сеньков, Л.Л. Кругова, А.П. Мириленко, БГАТУ,
К.М. Шестаков, БГУ,
А.И. Саханчук, «НПЦ НАН Беларуси по животноводству»

Аннотация

Создана программа балансирования рационов коров, использующая критерий максимальной сбалансированности по показателям питательности кормов. Разработаны критерии оценки питательности, учитывающие чистую энергию лактации и расширенные параметры углеводного состава кормов. На основе испытаний создана база данных питательной ценности кормов. Программа предоставляет животноводам широкие возможности управления рационом молочного стада в интерактивном режиме.

Введение

Эффективность молочного хозяйства напрямую связана с величиной удоя коров. Современные развитые молочные хозяйства достигают роста продуктивности за счет различных зоотехнических приемов. При этом увеличение объема производства молока может сопровождаться сокращением молочного стада, уменьшением расхода кормов и снижением себестоимости продукции.

Одним из путей повышения продуктивности молочного стада является разработка и внедрение новых прогрессивных систем нормирования рациона животных, применяющих более точный расчет питательности кормов с учетом физиологических и биохимических особенностей организма коров. Такая система позволяет организовать точное, полноценное кормление и в результате повысить продуктивность. Высокопродуктивные животные, особенно лактирующие коровы, очень требовательны к необходимому уровню кормления, качественному составу кормов, доступности питательных веществ и сбалансированному их сочетанию. При соблюдении баланса будет получена продукция с наименьшими затратами времени и энергии. И наоборот, нарушения в балансе рациона приводят к снижению продуктивности и повышению заболеваемости.

В настоящее время на рынке Беларуси присутствуют различные компьютерные программы расчета рациона кормления крупного рогатого скота (КРС). Наиболее распространена программа «Коралл» [1, 2], направленная на комплексную оптимизацию рациона с расчетом необходимых кормовых добавок, рецептов комбикормов и премиксов. Однако имеющиеся программы базируются на устаревших методиках расчета. В частности, в них не выполняется оптимизация рациона по важнейшим показателям питательности, учитывающим особенности пищеварения КРС таким, как сухое вещество, обменная энергия (ОЭ), сырой протеин, расщепляемый протеин, нерасщепляемый протеин, нейтрально-детергентная клетчатка (НДК) и кислотно-детергентная клетчатка (КДК). Кроме того, при формировании баз данных по кормам не в полной мере учитывается специфика местной кормовой базы. Все это приводит к погрешностям в расчете рационов, существенно влияющим на продуктивность животных.

Целью нашего исследования явилось создание программы интерактивного формирования рационов молочного стада на основе экспресс-оценки питательности кормов с учетом чистой энергии лактации (ЧЭЛ), рассчитанной в соответствии с современными представлениями о закономерностях пищеварения и усвоения питательных веществ крупным рогатым скотом. Для достижения цели решались следующие задачи:

- разработка критериев оценки питательности кормов;
- создание расширенной базы данных (БД) показателей питательности кормов;
- разработка программы, позволяющей зоотехнику составлять рацион молочного стада в интерактивном режиме.

Модель питательности рациона

Основой для разработки критериев оценки питательности кормов служат взаимосвязи между показателями, характеризующими питательность корма и продуктивностью животных. В последнее время в странах с высокоразвитой технологией молочного животноводства углеводный состав кормов характеризуют набором показателей. В нашей модели питательности рациона учтены такие показатели, как:

- нейтрально-детергентная клетчатка (НДК) измеряется в процентах и является суммой структурных углеводов клеточной стенки, состоящих из гемицеллюлоз, целлюлозы и лигнина;
- кислотно-детергентная клетчатка (КДК) измеряется в процентах и определяется как остаток клетчатки после обработки в кислотных растворителях. В состав КДК входит в основном целлюлоза и лигнин, т.е. трудно перевариваемые углеводы;
- чистая энергия лактации (ЧЭЛ) – та энергия, которая идет в организме коровы только на образование молока. Измеряется в МДж/кг.

Определение в корме содержания НДК и КДК даст возможность объективно охарактеризовать полученный корм по показателям энергетической ценности и продуктивного действия [3–5].

Основой для разработки системы оценки питательности кормов на основе ЧЭЛ служат известные взаимосвязи [6] между энергией корма и продуктивностью животных. При этом, чтобы исключить влияние влажности корма, все расчеты проводятся относительно сухого вещества корма (СВК). Прежде всего, рассчитывается количество потребляемого животными корма. Известно, что нейтрально-детергентная клетчатка определяет скорость переваривания и, соответственно, максимальное количество корма, которое животное может потребить. Потенциальное потребление измеряется в процентах от живой массы коровы. Содержание кислотно-детергентной клетчатки коррелирует с перевариваемостью кормов. Таким образом, комплекс показателей НДК-КДК определяет эффективность усвоения корма. Например, для некоторых конкретных параметров

животного и рациона потенциальное потребление окажется ограничено величиной 41,8 кг, а перевариваемость составит 57,8 %. То есть потребление и усвоение корма животным объективно ограничены, а эффективность использования корма зависит от структуры рациона.

Энергетическая ценность усвоенного корма характеризуется показателями обменной энергии и чистой энергии лактации, напрямую определяющими коэффициент конверсии корма, то есть в случае молочного стада – это производство молока [6]. Кроме того, рацион должен быть сбалансирован по другим важным компонентам, таким как – содержание протеина, жира, сахара, крахмала, минеральных веществ.

Структура программы и база данных

Программа балансирования рационов имеет трехуровневую структуру. В ее состав входят (рисунок 1) три реляционные базы данных на нижнем уровне, пользовательский интерфейс на верхнем уровне и ядро в виде математической модели. Базы данных (БД) программы включают информацию о питательной ценности кормов, нормах получения питательных компонентов и микроэлементов корма и данные об истории рационов.

Для определения в кормах содержания НДК и КДК была разработана соответствующая методика [7]. По проведенным испытаниям создана БД кормов, включающая более ста типов

кормов и 32 показателя питательной ценности (в том числе витамины и микроэлементы) и стоимостные характеристики. В дальнейшем база данных может редактироваться и пополняться за счет местных кормов конечным пользователем. Кроме того, в БД вошли данные НППД по животноводству НАН РБ, описывающие потребности коров в различных компонентах корма в зависимости от массы животного и текущего суточного удоя, а также данные для сухостойных коров.

Математическая модель балансирования рациона

В программу заложены следующие принципы:

- программа является инструментом по формированию рациона коров исходя из имеющихся в хозяйстве кормов;
- рацион должен быть сбалансирован по основным компонентам корма, влияющим на продуктивность и здоровье коров;
- баланс рациона по второстепенным показателям и себестоимости должен быть доступен в справочном порядке;
- составление рациона должно быть максимально интерактивным.

В математической модели балансирования рациона введены следующие обозначения:

x_j – масса корма с номером j в дневном рационе; I_1 – множество показателей, по которым происходит балансирование; D_i – потребность животного в веществе (показателе) с номером i ; J_1 – множество доступных кормов; J_k – группа однородных кормов (силос, сенаж, зеленая масса); a_{ij} – содержание питательного вещества с номером i в одном килограмме корма с номером j ; W_j – максимально допустимое дневное потребление корма с номером j ; U_k – максимально допустимое дневное потребление кормов однородной группы k .

В модель включены ограничения по максимально допустимому содержанию в рационе отдельных кормов и кормов по однородным группам. Существенной особенностью предложенной модели является то, что в целевую функцию вошли модули относительных отклонений содержания в рационе питательного компонента от рекомендуемой нормы

$$\frac{\left| \sum_{j \in J_1} a_{ij} x_j - D_i \right|}{D_i},$$

что позволило получить более точный баланс по сравнению с применением условия «содержание веществ в рационе не менее нормы».

В результате краткая математическая формулировка задачи оптимизации рациона выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} 0 \leq x_j \leq W_j, & j \in J_1 \\ \sum_{j \in J_k} x_j \leq U_k, \\ F = \sum_{i \in I_1} B_j \left(\frac{\left| \sum_{j \in J_1} a_{ij} x_j - D_i \right|}{D_i} \right) \rightarrow \min \end{cases},$$

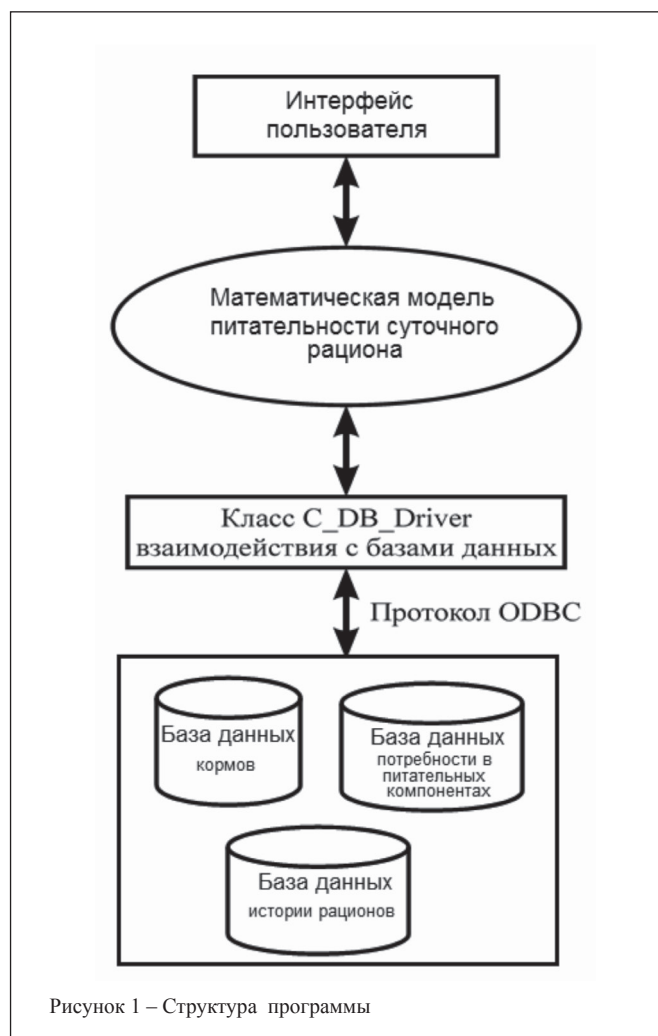


Рисунок 1 – Структура программы

где B_j – весовые коэффициенты, характеризующие степень значимости отклонения от нормы по j -му питательному компоненту. Их значения определяются методом экспертных оценок.

Данная задача относится к классу задач линейного программирования, и для ее решения может использоваться симплекс-метод с искусственным начальным базисом [8, 9]. Однако в целевую функцию задачи входит сумма модулей линейных функций, поэтому применить симплекс-метод напрямую не представляется возможным. В связи с этим модули преобразуются в систему парных неравенств и исходная задача распадается на $Q = 2^{M_1}$ отдельных задач, которые могут быть решены симплекс-методом. M_1 – количество веществ (показателей), по которым проводится оптимизация. Из всех полученных решений выбирается соответствующее минимальному значению целевой функции.

Алгоритм работы и интерфейсы программы

На первой стадии расчета специалист задает исходные данные (рисунок 2) – масса коровы и ее удой: суточный – для лактирующих коров или прогнозируемый удой за лактацию – для сухостойных коров.

По известной массе коровы и значению удоя в соответствии с таблицей БД норм по потребности животных в питательных веществах программа рассчитывает дневные нормы потребления по всем показателям, формируя вектор $D = (D_j)$. Затем пользователь выбирает корма из списка всех кормов, имеющихся в хозяйстве и в базе данных (рисунок 3).

Практическое применение программы в общем случае включает предварительное формирование рациона на основе имеющихся в распоряжении объемных кормов и окончательное балансирование с использованием концентрированных добавок. Сформированный набор кормов автоматически отражается в окне интерфейса для предварительного задания структуры рациона (рисунок 4), где можно установить вес конкретного корма.

После отбора кормов установки предварительных значений производится расчет рациона. По имеющейся в базе данных таблице питательного состава кормов составляется матрица содержания питательных веществ и компонентов в 1 кг каждого из выбранных кормов. Кроме того, формируется столбец максимально допустимых значений суточного потребления каждого из выбранных кормов (например, свеклы кормовой в день можно выдавать не более 30 кг).

Результаты расчета показываются в окне отображения результатов (рисунок 5). Животновод оценивает уровень отклонений содержания веществ от оптимального и принимает решение о приемлемости рациона или продолжении балансирования.

По окончании работы исходные данные животного или группы животных вместе с рассчитанным рационом сохраняются в соответствующей таблице БД для ведения истории расчетов.

Заключение

Создана программа балансирования рационов молочного стада, учитывающая особенности пищеварения коров. Программа использует новые критерии сбалансированного рациона, основанные на зависимости чистой энергии лактации от расширенного списка показателей углеводного состава кормов. Для получения исходных данных по дополнительным показателям питательности была разработана методика определения содержания в кормах нейтрально-детергентной клетчатки и кислотно-детергентной клетчатки. С использованием созданной методики были проведены исследования образцов кормов, практически используемых в хозяйствах Минской области. В результате проведенных исследований создана база данных, содержащая 32 показателя питательной ценности и стоимостные характеристики более, чем для ста типов кормов. Интерфейс программы позволяет пользователю

Рисунок 2 – Окно программы для задания начальных сведений о животном

Выбор кормов для рациона		Включить в рацион		Исключить из рациона		Всего выбрано кормов: 8	
Выбранные корма		Грубые	Зеленые	Зерно	Комбикорма-концентраты	Минеральные добавки	Отходы производства
Название корма	Запасы (т.)	Цена (руб/кг)	ОЗ, МДж	Сух. в-во, кг.	з. прот		
Силос из злаковых культур, разнотравный	72,95	1230	2,04	0,236	1		
Силос из злаковых культур, тимофеечный	111,6	1882	2,45	0,257	3		
Силос из злаковых культур-злаковый	53,71	1389	2,23	0,26	2		
Силос злаково-бобовый	86,77	2038	2,29	0,272	3		
Силос злаково-разнотравный	97,68	1385	1,76	0,207	3		
Силос из бобовых и злаково-бобовых трав, викоовсяный	68,89	1498	2,3	0,233	3		

Рисунок 3 – Окно программы для выбора кормов

Название корма	желаемый %	не более: КГ.
Зеленая масса бобовых культур, горох, бугонизация	0	60
Зеленая масса злаковых культур, костреч безостый начало цветения	0	60
Сенаж из злаковых культур, ежа сборная	0	25
Комбикорм мтф Русаковичи	0	9
Преципитат	0	5
Фосфат дефторированный	0	5
Дробина пивная, свежая	0	10
Силос злаково-разнотравный	0	25

Компонент	Норма	В рационе	Отклонение
Сух. в-во, кг.			
ОЗ КРС, Мдж.			
ЧЗЛ, МДж.			
Сырой протеин, г.			
Перевар. протеин, г.			
Сырой жир, г.			
Сырая клетчатка, г.			
КДК, г.			
НДК, г.			
Крахмал, г.			
Сахар, г.			
Кальций, г.			
Фосфор, г.			
Корм. ед.			

Рисунок 4 – Окно программы для предварительного задания структуры рациона

Название корма	КГ.
Зеленая масса бобовых культур, горох, бугонизация	5
Зеленая масса злаковых культур, костреч безостый начало цветения	2
Сенаж из злаковых культур, ежа сборная	20,8
Комбикорм мтф Русаковичи	3
Преципитат	0,2
Фосфат дефторированный	0,2
Дробина пивная, свежая	0,6
Силос злаково-разнотравный	3

Компонент	Норма	В рационе	Отклонение
Сух. в-во, кг.	11,2	11,3	0,1
ОЗ КРС, Мдж.	117	115,7	-1,3
ЧЗЛ, МДж.		50,7	
Сырой протеин, г.	1388	1400,9	12,9
Перевар. протеин, г.	913	922,4	9,4
Каротин, мг.	513	667,6	154,6
Сырая клетчатка, г.	2462	2477,8	15,8
КДК, г.		1962,4	
НДК, г.		4322,6	
Витамин Е, мг.	468	557,9	89,9
Сахар, г.	371	551,7	180,7
Кальций, г.	50	84,8	34,8
Фосфор, г.	40	53,1	13,1
Корм. ед.	9,8	9,4	-0,4

Рисунок 5 – Окно отображения результатов расчета рациона

редактировать базу данных и пополнять ее за счет местных кормов. Алгоритм балансирования рациона предполагает интерактивный режим работы. Пользователь имеет возможность выбрать корма, задать предварительно структуру рациона, и далее в процессе оптимизации отслеживать состояние баланса по всем показателям питательности. Созданная программа предоставляет животноводам широкие возможности формирования рациона молочного стада и управление им в интерактивном режиме.

Литература:

1. Лукьянов, Б.В. Новая информационная технология оптимизации рационов для сельскохозяйственных животных (Компьютерные программы «КОРАЛЛ»): Учебно-методическое пособие / Б.В. Лукьянов, П.Б. Лукьянов – М.: Издво РГАУ МСХА имени К.А. Тимирязева, 2009.
2. Лукьянов, Б.В. Повышению эффективности кормления поможет компьютерная программа / Б.В. Лукьянов, П.Б. Лукьянов // АгроМаркет». – №3. – 2005.
3. Пестис, В.К. Кормление сельскохозяйственных жи-

вотных. Учебное пособие / В.К. Пестис. – Минск: ИВЦ Минфина, 2009. – 540 с.

4. Воробьева, С.В. Критерии углеводного питания жвачных / С.В. Воробьева, И.А. Драганов // Животноводство России. – №2. – 2005. – С. 47–49.

5. Волгин, В.В. Оптимизация питания высокоудойных коров / В.В. Волгин, А. Бибилова, Л. Романенко // Животноводство России. – №3. – 2005. – С. 27–28.

6. Богомолов, В.В. Зачем определять нейтрально-дивергентную и кислотно-детергентную клетчатку / В.В. Богомолов // РасцветИнформ. – №7. – 2008. – С. 26–27.

7. Бондарь, Н.Ф. Новые методы оценки уровня качества клетчатки в кормах / Н.Ф. Бондарь, Л.Л. Кругова, Н.И. Голубь, А.Н. Дылько // Агропанорама. – №5. – 2008.

8. Шестаков, К.М. Теория принятия решений и распознавание образов: Курс лекций / К.М. Шестаков. – Минск: БГУ, 2005.

9. Банди, Б. Основы линейного программирования: Пер. с англ. / Б. Банди. – М.: Радио и связь, 1989. – 176 с.

Поступила в редакцию 14.06.2013 г.

АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ РАЗМЕРОВ И ПРОФИЛЯ ИЗДЕЛИЙ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ

УДК 681.786.23/24

А.В. Дубешко, В.Н. Ильин, Д.А. Михаевич,
Институт физики НАН Беларуси, г. Минск

Аннотация

В статье изложен способ измерения цилиндрических изделий со сложным профилем, алгоритм обработки измерительной информации с построением объект-модели контролируемого изделия, а также принцип построения и основные параметры оптико-электронной системы контроля размеров и профиля изделий цилиндрической формы и, в частности, полученных в результате токарной обработки.

Введение

Автоматизированное управление качеством продукции всегда являлось одним из важнейших направлений развития техники. Особенно это актуально при поточном производстве большого количества однообразных деталей, имеющих, в частности, цилиндрическую форму и изготовленных литьем, штамповкой или токарной обработкой.

Разработка и внедрение оптико-электронных приборов и системы контроля [1–3], использующих последние достижения в оптике, электронике, вычислительной технике, обеспечивают эффективное повышение качества выпускаемой продукции и производительности труда во многих отраслях народного хозяйства. Определяющими являются такие их преимущества, как бесконтактность, инвариантность к материалу контролируемого объекта, помехоустойчивость, высокие разрешение, точность и быстродействие.

Основная часть

Авторами разработан способ измерения геометрических параметров деталей, выполненных токарной обработкой, который включает следующие операции: формирование плоскопараллельного лазерного пучка, освещения детали в поперечном направлении, формирование теневого изображения в плоскости фотоприемной линейки так, что фотокатод линейки располагается вдоль освещающего пучка, вычисление геометрического размера по числу засвеченных пикселей фотоприемной линейки [4]. На рисунке 1 приведена функциональная схема датчика, реализующего предложенный способ, состоящая из двух основных узлов: 1 – осветителя и 5 – приемника. Осветитель 1 включает лазер 2 и коллиматор 3, представляющий собой фрагмент, вырезанный из центральной части сферической линзы. Приемник 5 состоит из формирующего объектива 6 и 7, фотоприемной ПЗС линейки и микропроцессора 9.

Разработанная система автоматического контроля размерных параметров и профиля изделий токарной об-

работки с последующей их разбраковкой на годные и брак приведена на рисунке 2. Она позволяет обеспечить сто процентный контроль качества изготовления таких изделий в автоматических конвейерных линиях.

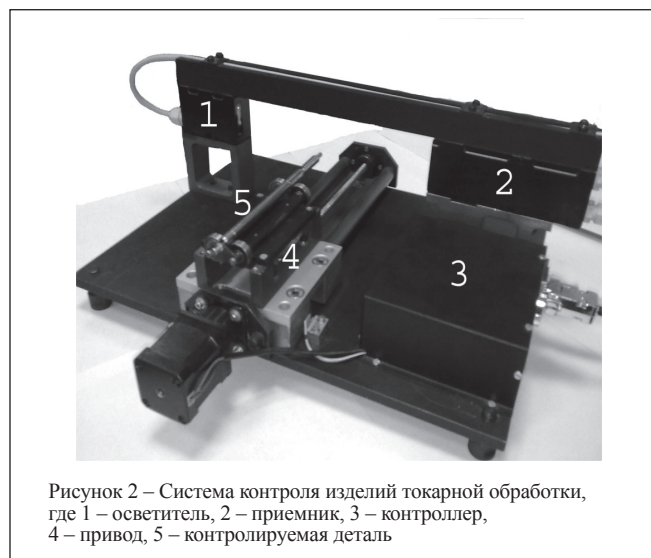


Рисунок 2 – Система контроля изделий токарной обработки, где 1 – осветитель, 2 – приемник, 3 – контроллер, 4 – привод, 5 – контролируемая деталь

Контролируемая деталь 5 устанавливается на каретке с помощью автоматического манипулятора или вручную, и перемещается приводом 4, который состоит из шагового двигателя, микрометрического винта и прецизионных направляющих (на рисунке не отмечены). На основе сигналов управления шаговым двигателем привода 4 контроллер формирует сигнал синхронизации для оптико-электронного датчика, что фиксирует положение детали в момент измерения. Благодаря этому, возникает возможность производить контроль не только поперечных, но и продольных размеров детали, путем их вычисления между заданными поперечными сечениями. Для определения размеров токарных деталей достаточно обработать две теневые границы, сформированные деталью.

Таким образом, формируется набор сечений профиля измеряемого образца. Контроллер производит первичную обработку сигнала оптико-электронного датчика. Высоко-скоростной алгоритм субпиксельной интерполяции фронта и среза видеоимпульса позволяет определять положение теневых границ на ПЗС с дискретностью 0,5 микрометра. Алгоритм позволяет одновременно обрабатывать до четырех границ в кадре, т.е. определяется положение верхнего и нижнего краев детали, ее диаметр и положение центра вращения.

Окончательная обработка данных производится на компьютере. Информация представляется в виде «облака» измерительных точек. Разработанные нами специальные функции и основные вычислительные алгоритмы позволяют из «облака» измерительных точек выделять различные геометрические фигуры: прямую линию, треугольник,

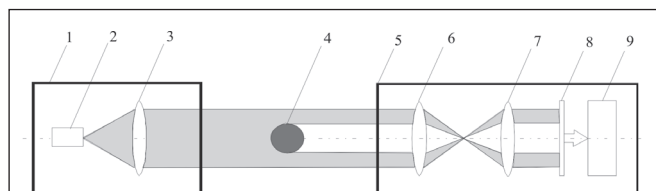


Рисунок 1 – Функциональная схема оптико-электронного датчика

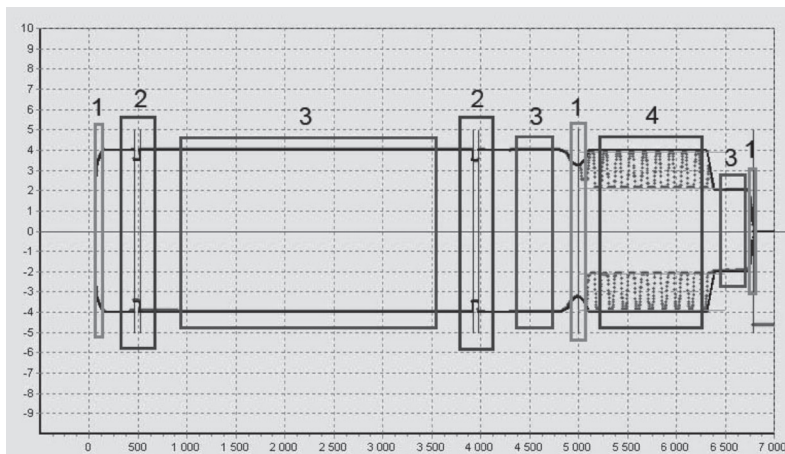


Рисунок 3 – Обозначены: 1 – область, в которой применяется алгоритм определения радиуса дуги окружности; 2 – область, в которой применяется алгоритм определения ширины и глубины паза; 3 – область, в которой применяется алгоритм определения диаметра; 4 – область, в которой применяется алгоритм определения шага и глубины шнека

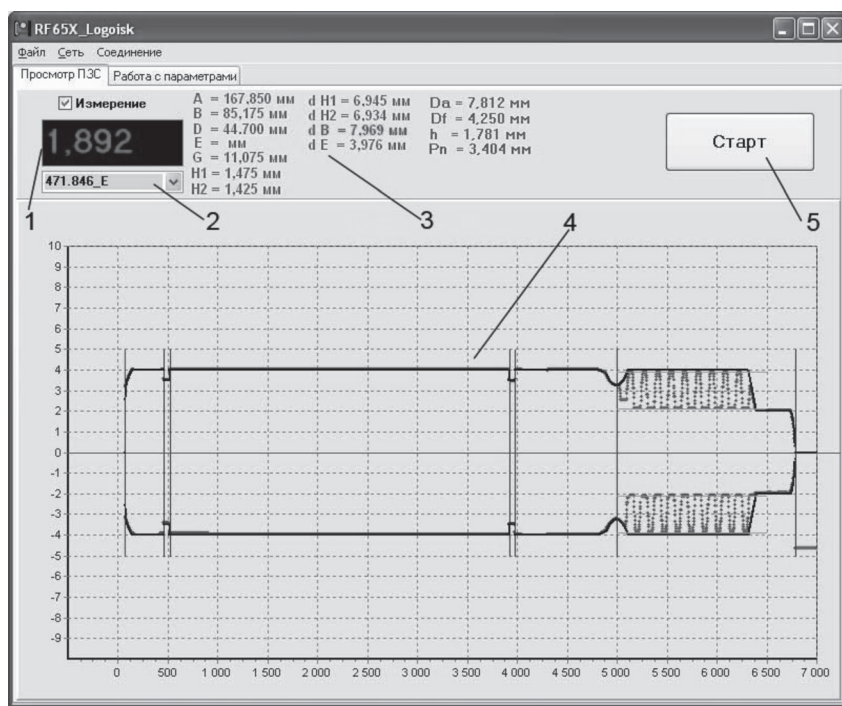


Рисунок 4 – Обозначены: 1 – показания датчика при сканировании; 2 – список эталонных профилей; 3 – таблица контролируемых размеров; 4 – окно отображения эталонного и отсканированного профилей; 5 – кнопка управления процессом сканирования (старт, стоп)

прямоугольник и окружность, после чего определять основные параметры фигур: длины сторон, углы между сторонами, расстояние между прямыми линиями, радиус окружности (дуги окружности), положение центра окружности (дуги окружности) и т.п. В результате, из «облака» измерительных точек получается объект-модель профилей детали, состоящая из набора геометрических фигур. Это позволяет определить любой интересующий нас размер и произвести его сравнительную оценку.

Объект-модель детали сравнивается с мастер-моделью. Для получения мастер-модели используется как модель, построенная в CAD программах, так и объект-модель эталонного образца детали после микропроцессорной обработки. На мастер-модели выделяются области интереса, то есть области, в которых необходимо произвести измерение определенного параметра и произвести его контроль. Для выбранной области интереса задается тип измерения, номинальный размер и допуски на размер. Типы измерения могут задаваться следующие: размер вертикальный, размер горизонтальный, длина отрезка, угол между линиями, радиус дуги, радиус окружности. Могут задаваться и более сложные типы – ширина паза, глубина паза, шаг шнека, высота шнека, шаг резьбы. На рисунке 3 приведена объект-модель детали с выделенными областями измерения.

Также в системе реализована возможность контроля таких параметров, как биения и овальность. Для этого привод выводит деталь в точку контроля биения или овальности, производится вращение детали вокруг оси и сканирование профиля сечения детали в этой точке. Далее система переходит к следующей точке контроля.

Для каждой детали формируется карта измерений или карта контроля, состоящая из набора типов измерений, размеров и допусков, и сохраняется в базе данных мастер-моделей. Таким образом, создаются карты контроля для всех выпускаемых токарных изделий, что позволяет максимально быстро производить настройку системы контроля при смене типа детали на конвейере. Что гарантирует возможность 100 % контроля.

На рисунке 4 приведено изображение диалогового окна оператора, на котором отображаются результаты измерений геометрических параметров деталей и кнопки управления.

Таким образом, разработанный способ, программное обеспечение и система обеспечивают высокоточный автоматический контроль цилиндрических изделий сложного профиля. Применение системы, в частности, для контроля размеров и профиля токарных изделий в совокупности с гибкой, но высоко технологичной измерительной системой, позволяет значительно повысить скорость и точность контроля качества, а так же производить 100 % контроль всего спектра производимой токарной продукции.

Литература:

1. Ильин, В.Н. Оптико-электронные измерительные преобразователи / В.Н. Ильин, Е.И. Галушко. – Минск, ИПП Минэкономики РБ, 1996. – 214 с.
2. Дубешко, А.В. Применение цифровой фильтрации в оптической триангуляции / А.В. Дубешко, Д.А. Михеевич / Современные информационные и электронные технологии: Труды 12-й Междунар. научн.-практич. конф. «СИЭТ-2011». Одесса, 23–27 мая 2011. – Т. 2. – С. 300.
3. Ильин, В.Н. Лазерные устройства для измерения геометрических параметров трехмерных объектов / В.Н. Ильин, А.В. Дубешко, Д.А. Михеевич // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2010. – №3. – С. 13–16.
4. Дубешко, А.В. Автоматический контроль размеров

и профиля токарных изделий / А.В. Дубешко // Современные информационные и электронные технологии: труды 11-й Междунар. научн.-практич. конф. «СИЭТ-2010». Одесса, 24–28 мая 2010. – Т. 2. – С. 79.

Abstract

The article describes the method of measurement of cylindrical parts with a complex profile, measurement, data processing algorithm to the construction of the object model of the controlled product, as well as the construction principle and the basic parameters of optical-electronic system for controlling the size and profile of the parts with cylindrical shape and, in particular of turnery products.

Поступила в редакцию 01.02.2013 г.

НОВОСТИ**УПРАВЛЕНИЕ ПИТАНИЕМ И ТЕПЛОВОМ РЕЖИМОМ**

Линейный стабилизатор с малым падением напряжения на КМОП транзисторе ADP7182 работает с напряжениями в диапазоне от $-2,7$ В до -28 В, поддерживая падение напряжения -25 мВ при -10 мА и -185 мВ при -200 мА. Он является идеальным выбором для высококачественных аналоговых и аналого-цифровых схем, которые требуют напряжения питания в диапазоне от -27 В до $-1,22$ В. Патентованная архитектура компонента обеспечивает подавление пульсаций питания 66 дБ и среднеквадратический уровень шума 18 мкВ, поддерживая превосходный переходный отклик на изменение напряжения питания и тока нагрузки при работе с миниатюрным керамическим выходным конденсатором 2,2 мкФ. Стабилизатор выпускается в версии с фиксированным выходным напряжением $-5,0$ В, а также в версии с регулируемым выходным напряжением. Второй вариант работает с внешним делителем, при помощи которого выходное напряжение может изменяться в диапазоне от $-1,22$ В до $-V_{IN} + V_{DO}$. Для обеспечения максимальной гибкости вывод отключения поддерживает работу с положительными или отрицательными логическими уровнями. ADP7182 потребляет -100 мкА при $I_{OUT} = -10$ мА и -650 мкА при $I_{OUT} = -200$ мА.

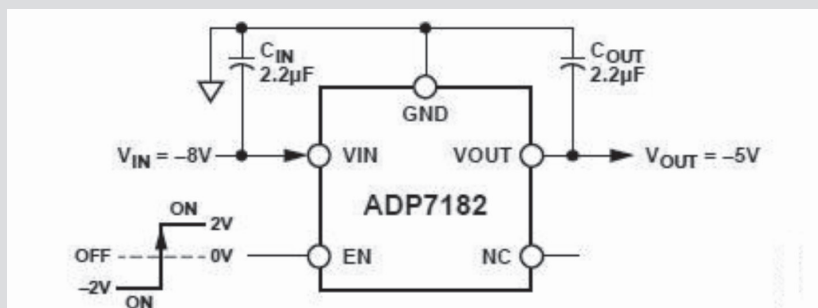


Figure 1. ADP7182 with Fixed Output Voltage, $V_{OUT} = -5$ V

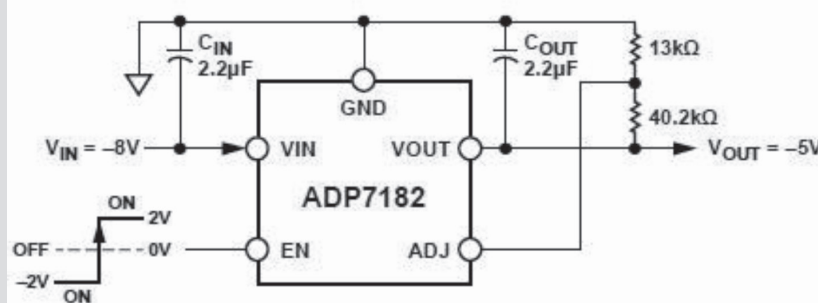


Figure 2. ADP7182 with Adjustable Output Voltage, $V_{OUT} = -5$ V

Линейный стабилизатор с низким шумом, входное напряжение до -28 В, выходной ток -200 мА

Компонент выпускается в 8-выводном корпусе LFCSP, рабочий температурный диапазон составляет от -40°C до $+125^{\circ}\text{C}$. Выпуск версии в 5-выводном корпусе TSOT назначен на конец 2013 года.

Альфасофт

ЦЕНТРИРОВКА ЛИНЗ В ПРОЕКЦИОННЫХ ОБЪЕКТИВАХ

УДК 681.786.23/24

К.М. Шестаков, БГУ,
В.Ю. Мощеников, А.В. Сенько, КБТЭМ-ОМО

Аннотация

Линзы проекционных объективов должны быть установлены вдоль оптической оси с погрешностями в сотни нанометров. Математические модели формирования входных сигналов и алгоритмы обработки помогают отладить и тестировать программное обеспечение приборов контроля децентрировки.

Введение

Сложно назвать отрасль промышленности, которая была бы столь насыщена новациями в области технологий как микроэлектроника, плавно перешедшая в нанoeлектронику. Однако, если успехи в достижении границ внешних параметров, такие как, проектная норма, число элементов в чипе – хорошо известны в технических рекламных сообщениях, внутренние процессы скрыты и являются ноу-хау технологий современных предприятий.

Речь пойдет об одном из них – сборке сложных, определяющих качество чипа, проекционных объективах. Стоимость таких объективов составляет несколько десятков и сотен тысяч долларов. Производства проекционных объективов оснащаются установками их сборки, включающими приборы контроля децентрировки линз. Линзы должны быть точно установлены вдоль оптической оси объектива. Мерой качества является комплексный вектор децентрировки автоколлимационных точек линз. Если в нанoeлектронике пройдена граница проектных норм в 100 нанометров, то и в контроле децентрировки линз эта цифра является рабочей.

При сборе объектива в оптическую схему итоговой системы вводят компоненты собираемого объектива, образуя множество вариантов оптических схем, не скомпенсированных по величинам аберраций. Хотя собираемые линзы пакета определены, получаемые компоновки будущего объектива и его частей образуют широкую гамму расчетных схем. Элементы этих схем установлены с реальными погрешностями и как следствие этого появляется переменный вид функций рассеивания точек (ФРТ). Приборы контроля децентрировки определяют качество сборки, являются «глазами» операторов и формируют итоговый вектор положения линз в объективе.

Требования к контролю сборки

История создания установок сборки объективов насчитывает в РБ более 30 лет [1, 2].

Сборочное оборудование, созданное в «КБТЭМ-ОМО» базируется на специализированных фотоэлектрических автоколлимационных приборах с объективами переменной сходимости, многоэлементными приемниками и квазиоптимальной обработкой сигналов с формированием тестирующего изображения (марки). Хотя в первых образцах (КЮ-95, КЮ-184) были визуальные приборы, в последующих моделях оборудования (КЮ-204, СО-001, НМ-241, СО-006, ЭМ-9500, НМ-286) были применены фотоэлектрические приборы контроля децентрировки.

В КБТЭМ-ОМО сегодня в эксплуатации находятся установки НМ-286, СО-006, в оптической схеме которых использованы современные источник света и фотоприемники, квазиоптимальная топология маски, минимизированы аберрации эквивалентных оптических систем. По сути, решены следующие проблемы:

1. Накопленный на протяжении десятилетий опыт построения и сборки проекционных объективов позволил создать оптическую схему автоколлимационного микроскопа (АКМ), обеспечивающую незначительный разброс формы ФРТ при установке новых линз проекционного объектива.

2. Алгоритмы обработки информации с ССD-матриц определяют относительные расстояния между положениями откликов от одной и той же, но вращающейся поверхности линзы. Это уменьшает влияние комы, расфокусировки и т.п. на результаты расчетов, так как эти величины остаются постоянными для одной эквивалентной оптической схемы.

3. Положение векторов децентрировки поверхностей задается в системе контроля вращения шпинделя и в первом приближении не зависит от формы соответствующих ФРТ.

Однако непрерывное совершенствование проекционных объективов усложняет и задачи сборки объективов, повышая требуемую точность контроля. Сегодня определен перечень параметров автоколлимационного микроскопа, который достаточен для сборки проекционного объектива для получения рисунка с проектными нормами по разрешению порядка 60 нм. Максимальный ход измерительной головки АКМ должен достигать величины в 300 мм. Измерению подлежат децентрировки асферических, сферических (вогнутых, выпуклых) линз, с интервалами величин радиусов ± 2500 мм и плоских поверхностей. Чувствительность АКМ должна быть лучше, чем $-0,01$ угл. сек. Воспроизводимость измерения децентрировки при высоте 100 мм должна лежать в диапазоне сотни нанометров.

Элементы алгоритмов обработки сигналов

Отражение от поверхностей линз не велико и может составить доли процента от входного светового потока. Объем множества откликов от одновременно обрабатываемых поверхностей оценивается в один, а то и два десятка единиц ($i = 0..n$ – номер поверхности). Один из них рабочий, прочие – помехи, по форме коррелированные с рабочим. Поэтому данная задача является задачей обработки информации в шумах.

Каждый отклик – массив, характеризуемый параметрами, основными из которых являются положение центра энергии $X_{0,i,j}$, $Y_{0,i,j}$, определяемое по двум координатам, величина расфокусировки (в общем случае параметр, эквивалентной функции рассеивания). Некompенсированная энергия отклика для каждой поверхности в первом приближении описывается индивидуальным значением величин расфокусировки, комы ($\Delta S_{i,j}$). Частично, данные величины могут быть прогнозируемыми и после коррекции учитываться в расчетах.

В совокупности вектор массива откликов для каждой компоновки оптической схемы с номером j может быть представлен как: $Mo_j \in \{Xo_{ij}, Yo_{ij}, \Delta S_{ij}\}$. Центр каждого отклика при вращении прецизионного шпинделя смещается по окружности, радиус вращения и угол поворота отображают величину децентрировки, ее вектор.

Алгоритм обработки аналогичен алгоритму, заявленному в патентах предприятия КБТЭМ-ОМО [3, 4]. Квазиоптимальная обработка откликов в форме импульсов также была запатентована ранее [5].

На базе этих изобретений в КБТЭМ-ОМО была разработана гамма фотоэлектрических приборов контроля децентрировки для оснащения сборочного оборудования.

В настоящее время ведутся экспериментальные работы по улучшению технических характеристик приборов контроля децентрировки на базе установок СО-006, НМ-286. Дополнительно вводится контроль децентрировки по второй координате и прецизионная статистическая обработка массивов с усовершенствованными алгоритмами распознавания [6]. Новое решение позволяет улучшить разделение конкурирующих откликов от близкорасположенных автоколлимационных точек.

Отклики сильно зашумлены и стоит задача минимизировать влияние шумов. В частности, это достигается выбором оптимальной формы ожидаемого отклика, свертка с которым должна дать финишное значение децентрировки [7–10].

АКМ наводят на автоколлимационную точку центрируемой поверхности линзы. При этом объектив перемен-

ной сходимости устанавливают в положение наибольшей чувствительности. Шпиндель приводят во вращение. Компьютер накапливает массив измерений положений марки в плоскости фотоприемника за заданное число оборотов шпинделя. Полученные значения координат умножаются на синус и косинус угла поворота шпинделя, после чего полученные данные суммируют.

Согласование формы эталонной структуры с формой отклика

Ниже приведены результаты расчетов в моделях с реальными шумами и откликами АКМ. Эти модели разработаны для определения эффективности вводимых веток алгоритмов, их оптимизации и повышения качества тестирования программ. По сути, данные массивы моделируют поток сигналов с CCD-матрицы.

Зафиксируем рабочие сигналы с одного из отлаженных и работающих в цикле сборки объективов приборов контроля децентрировки. Отъемы выполним для трех уровней освещенности метки (рисунок 1). С отъемов сформируем шумовое поле и поля подвижных откликов.

Введем миру – модель расчетных откликов, как совокупность смещенных и адаптированных по форме к реальным сигналам функций Бесселя.

В дальнейшем для демонстрации результатов покажем один вариант эталонной структуры $G_x = A \cdot J_0[As \cdot (x - Coor)]^2$, где A – общая амплитуда, As , $Coors$ – параметр каждой функции Бесселя с номером s (в примере, рисунок 2, $s = 0..3$).

$$S_{y,x} = \sum_y \sum_x U t_x$$

Рисунок 1 – Выбранные для анализа фрагменты наиболее проблематичных изображений меток

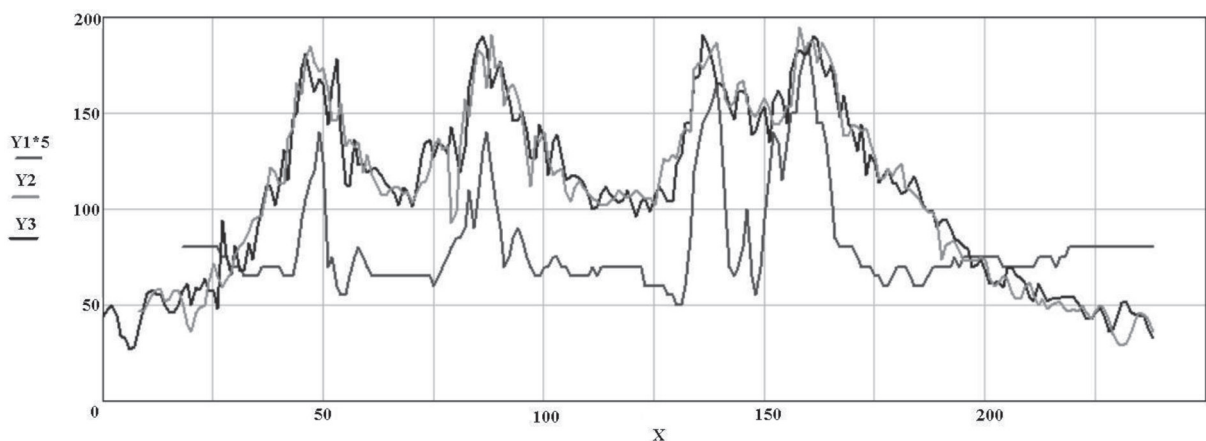


Рисунок 2 – Срезы сигналов

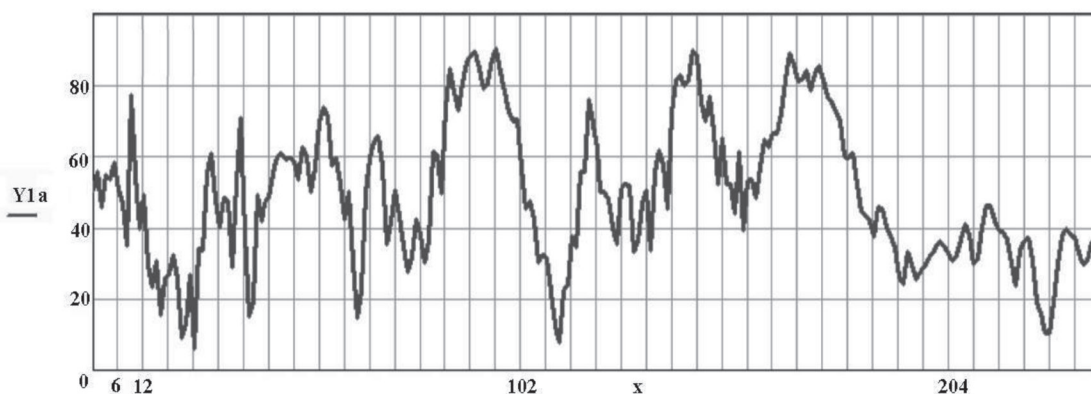


Рисунок 3 – Срез шумового сигнала для эталонной структуры с формой функций Бесселя

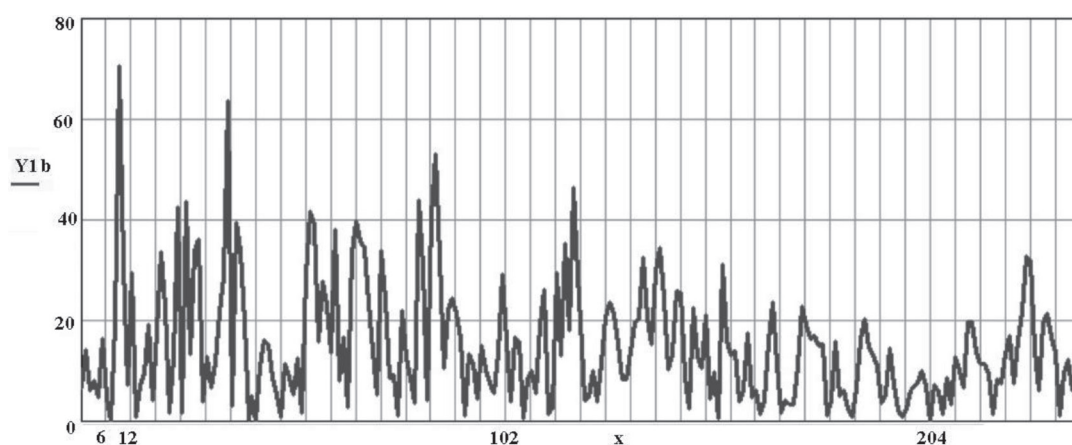
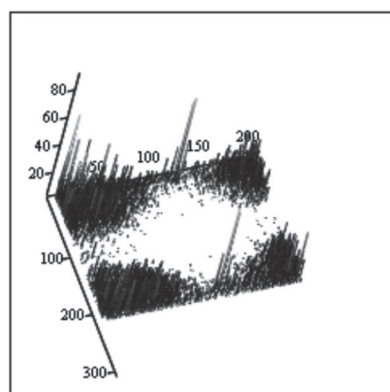
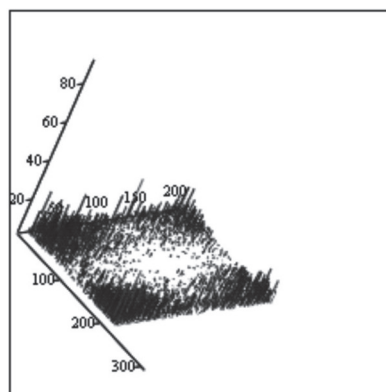


Рисунок 4 – Срез шумового сигнала для новой оптимальной эталонной структуры



fYsil_1



fYsil_2

Рисунок 5 – Частотные спектры сравниваемых шумов

Разностные сигналы, после подстройки на минимум отклонений дают шум Y1a (рисунок 3).

Сформируем оптимальную эталонную структуру, как усредненную с аппроксимацией форм откликов и определим шум для нее, так же, как разностный сигнал (рисунок 4). Это решение улучшает соотношение сигнал/шум.

Среднеквадратичное отклонение шумов снижается почти в 3 раза ($\text{std}(Y1a) = 19,53$; $\text{std}(Y1b) = 6,39$). Изменяется в лучшую сторону и форма спектра шумов (рисунок 5), возрастает доля высокочастотных составляющих, которые более эффективно подавляются последующей обработкой.

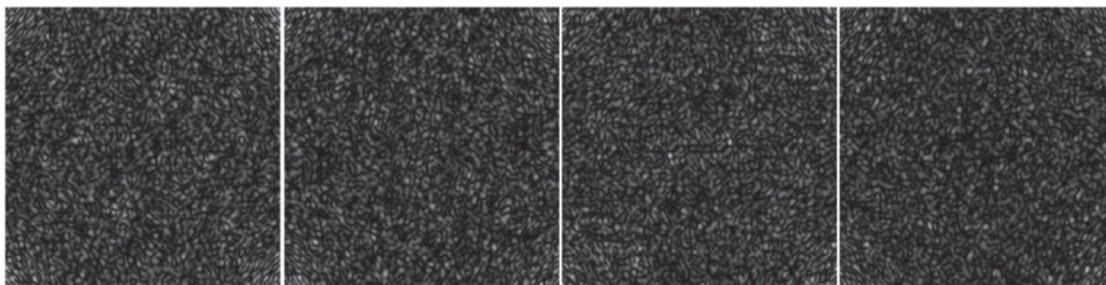


Рисунок 6 – Генерация участков шумовых полей

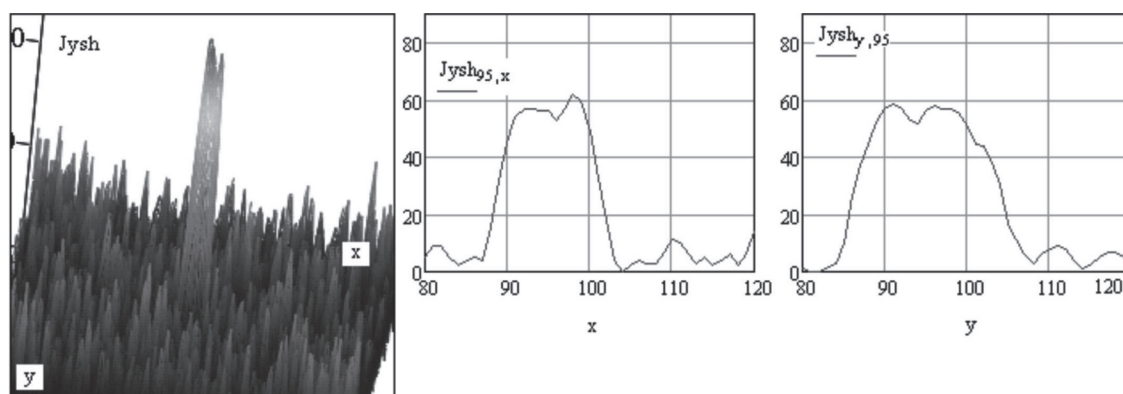


Рисунок 7 – Наложение одного штриха (прозрачного) сигнала метки на шумовое поле

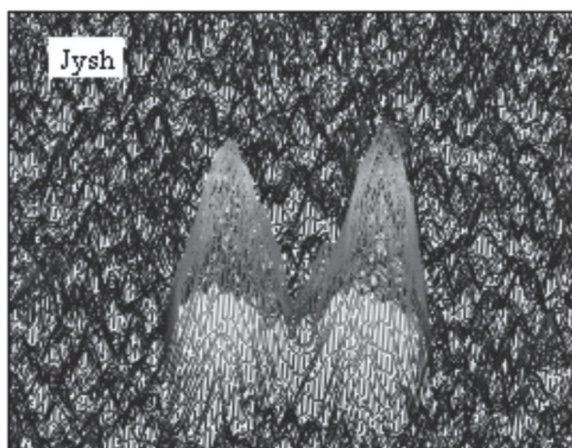
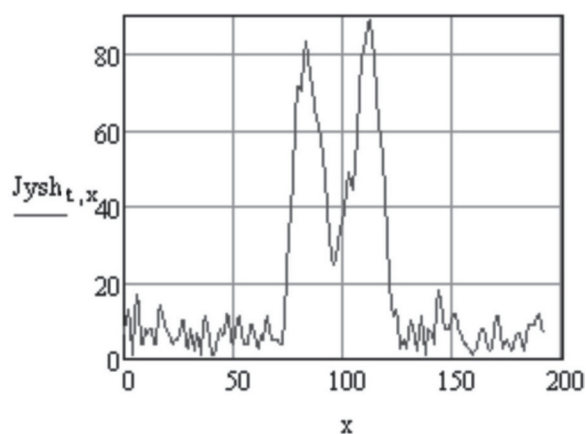


Рисунок 8 – Два штриха на участке шумового поля



Для дальнейшего анализа, перейдем к 3D-моделям массивов (рисунок 6 и рисунок 7).

Наряду с помехами был смоделирован сигнал от метки с одним (рисунок 7) и двумя штрихами (рисунок 8). Одновременно показаны и срезы по сигналам.

Эти модели выполнены, согласовано с реальным сигналом. Размер окна метки равен 10×15 мк. Увеличение оптической схемы 15 крат.

В плоскости CCD размер отклика на одно окно 150×225 мк. Размер ячейки CCD-матрицы – 7,4 мк. Таким

образом, размер колокольчика $\sim 20 \times 30$ пикселей.

Требуемое разрешение от системы в несколько раз выше и равно $\pm 0,2$ мк. То есть регистрировать координату окна необходимо с разрешением более высоким, чем допуск.

Алгоритм определения координаты окна обеспечивает устранение влияния постоянной составляющей и амплитуды «колокольчика» при измерении децентрировки. Покажем это утверждение и укажем на условия его выполнения.

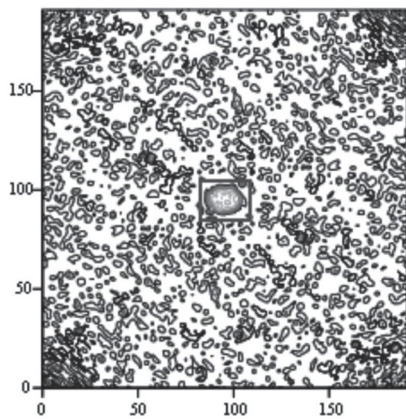


Рисунок 9 – Сегмент «окна» метки

На рисунках 9 и 10 представлены отклики на фоне шумов и положение эталонных сигналов. Эти отклики окружены расчетными подвижными сегментами. Внутри подвижного сегмента сформированы два смещающихся фильтра. Оба плеча трехмерны и равны по высоте +1 и –1. По координатам y, x они охватывают половину эллипсоида метки. Для простоты рассуждений фильтры приняты единичными по величине и равными по ширине. Они осуществляют поиск координаты медианы по осям y и x .

Приведем отдельные соотношения и требования, обеспечивающие достижение точности в доли пикселя.

1. Площади фильтров +1 и –1 должны быть строго равны целому числу пикселей. Более четко это требование выглядит как требование к суммам сигналов с CCD-матрицы: $S_{y,x} = \sum_y \sum_x U_{t,x}$ где x, y – номера элементов CCD-матрицы – строго целые числа по каждой строке y , U_t – сигнал с каждого элемента матрицы, t – номер сегмента.

Форма основания фильтра может быть половинкой эллипса, или другой фигуры, в том числе фигурой с несколькими окнами.

2. Площади +1 и –1 фильтров должны быть строго равны друг другу. $I^{+1} - I^{-1} = 0$, где I – индекс фильтра, равный единице, если элемент y, x входит в фильтр i и нулю во всех остальных случаях. Таким образом, изменение постоянной составляющей не может вызвать ошибки расчета координаты метки.

Медиана находится в прямоугольной системе координат. Поясним процедуры.

Сформируем субматрицы размером L_y по y , и L_x по x . Шаг движения матрицы зададим равным единице $h_x = h_y = 1$. Назначим номер сегмента $t = 15451$ и подсветим его, увеличив интенсивность внутри сегмента. Сформируем медианный фильтр по одной из координат. Это фильтр из двух синхронно движущихся сумм S_1 и S_2 (координата участка расчета $m = 15\,400..15\,520$).

Результаты расчетов представлены на рисунках 11, 12.

Выше приведена формула отклика на медианный фильтр при его прохождении метки. Фильтр движется по координате x . В ходе прохождения фильтром оси энергетической симметрии фиксируется номер шага. На шаге 15 460 было прохождение нуля ($SM_{15\,460} = -65$, $SM_{15\,461} = 1459$).

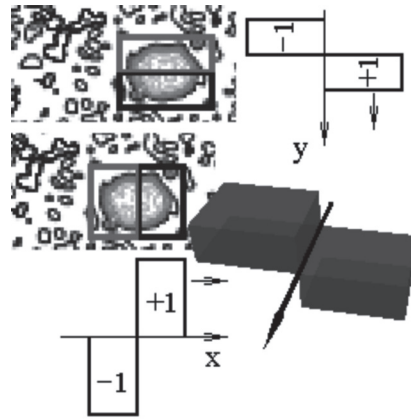


Рисунок 10 – Подвижные фильтры

Линейная интерполяция результата позволяет определить долю пикселя шага Yq , и повысить разрешение прибора контроля децентрировки:

$$Yq = \frac{-SM_{15460}}{-SM_{15460} + SM_{15461}}.$$

Проведенные расчеты для различных вариантов генерации шумов и откликов показывают, что погрешность определения координаты окна метки не превышает $\pm 0,06$ пикселя, что соответствует величине децентрировки примерно в 20 нм.

Заключение

Уход в область десятков нанометров проектных норм потребовал повышения качества сборки проекционных объективов. Алгоритмы субпиксельного разрешения с оптимальной формой эталонной метки позволяют достичь разрешения в несколько десятков нанометров. Математические модели входных сигналов, по форме и параметрам близкие к реальным сигналам с отработанных приборов контроля децентрировки, позволяют отладить алгоритмы и протестировать рабочие программы.

Литература:

1. Власенко, И.Н. Оборудование сборки высокоразрешающих проекционных объективов для фотолитографии / И.Н. Власенко, В.Ю. Мощеников, Л.И. Счастлиная, К.М. Шестаков // Электронная промышленность, 1990. – № 5. – С. 30.
2. Власенко, И.И. Технология и оборудование юстировки высокоразрешающих проекционных объективов / И.Н. Власенко, В.Ю. Мощеников, Л.И. Счастлиная, Л.И. Ляшова, А.Б. Гнедин, В.А. Агафонов, К.М. Шестаков // Тезисы докладов отраслевой НТК: Состояние и перспективы развития специального технологического оборудования: ч.1. – Минск, 1997. – С. 27.
3. Способ центрировки линз / И.Н. Власенко, В.Ю. Мощеников, Ю.Ф. Ляшук, Л.И. Счастлиная, К.М. Шестаков. – А.с. 1381356 (СССР) Б.И. № 10, 1988.
4. Устройство для центрирования линз / И.Н. Власенко, В.Ю. Мощеников, Ю.Ф. Ляшук, Л.И. Счастлиная, К.М. Шестаков. – А.с. 1455235 (СССР) Б.И. № 4, 1989.
5. Способ измерения периода сигнала и устройство для его осуществления / К.М. Шестаков, В.С. Садов, А.В. Романов, Л.И. Павлов, В.Е. Василевский. – А.с. №938181 (СССР), Б.И. № 23, 1982.

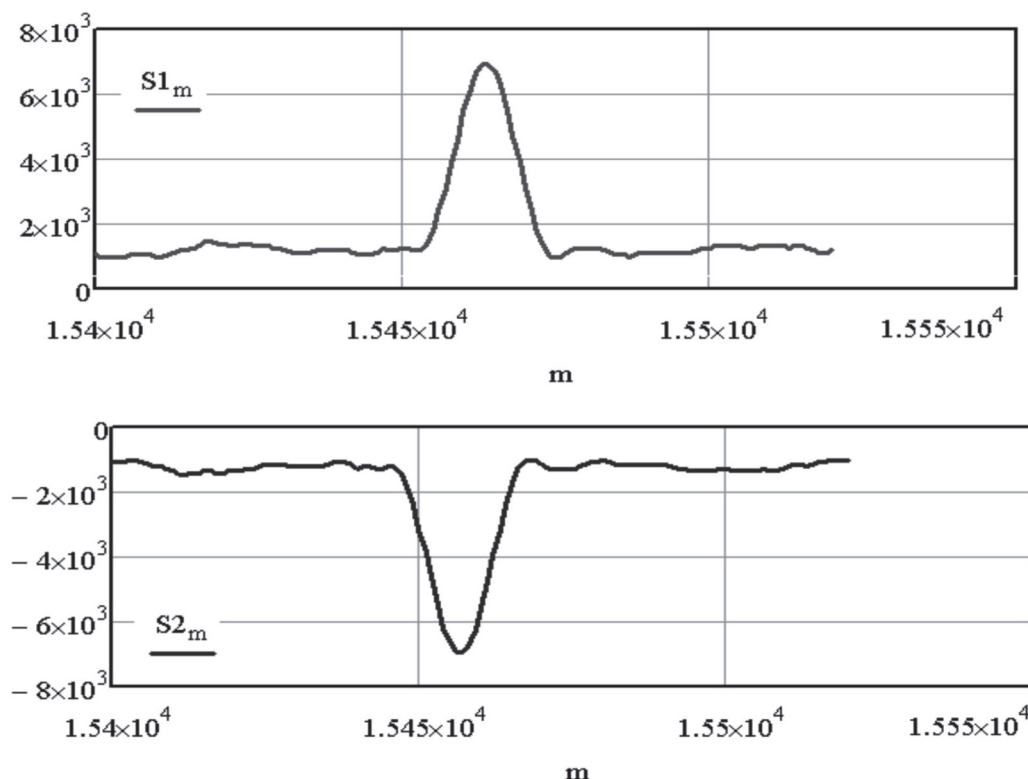


Рисунок 11 – Вид составляющих медианного фильтра

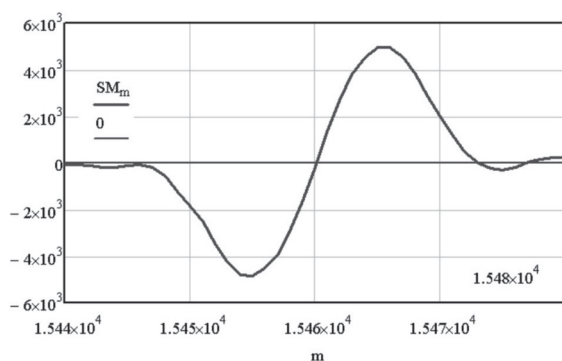


Рисунок 12 – Полный вид отклика медианного фильтра в зоне интерполяции

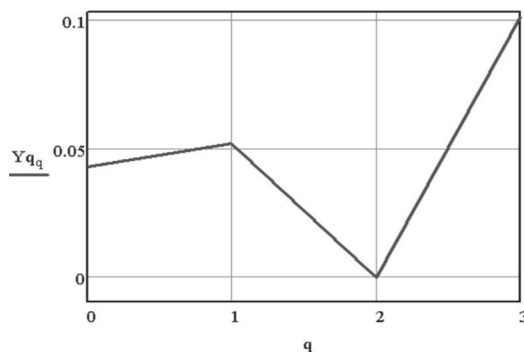


Рисунок 13 – Результаты расчеты доли пикселя для нескольких вариантов генераций шумов и откликов

6. Шестаков, К.М. Теория принятия решений и распознавание образов / К.М. Шестаков // Курс лекций. – Минск: БГУ, 2005. – 184 с.

7. New Principles of Optical Systems Adaptation for Superresolution as Applied to Precision Objective Lens Decentration Tests; I. L. Klimchinskii, K.M. Shestakov. Pattern Recognition and Image Analysis. – V.2 – № 3 – 1992. – p.359

8. Климчинский, И.Л. Расширение возможностей оптико-электронных систем контроля центрировки линз / И.Л. Климчинский, К.М. Шестаков // Тез-док. Всесоюзной конф. В сб. Оптико-электронные измерительные устройства и системы. – Томск: Радио и связь, 1989. – С. 15.

9. Снижение влияния коррелированных помех путем поэлементной генерации тестового изображения / И.Л. Климчинский, К.М. Шестаков. – Теория и практика

создания систем технического зрения: Материалы семинара. – М., 1990. – С. 45.

10. Климчинский, И.Л. Преобразование пространства распознаваемых сигналов, компенсирующее аберрации / И.Л. Климчинский, К.М. Шестаков // Тез.докл. 1 Всесоюз. конф. Распознавание образов и анализ изображений: новые информационные технологии: Тез.докл. 1 Всесоюз. конф. – Минск, 1991. – Ч. 2. – С. 84.

Abstract

The Lenses projection objective must be installed along optical axis with inaccuracy in a hundreds nm. The Mathematical models of the shaping input signal and algorithms of the processing help to debug and test software an instrument checking of the centration error.

Поступила в редакцию 24.06.2013 г.