

ствующего макета при их обработке в режиме реального времени. На рис. 11 показаны графики гармонического и импульсного входных сигналов, полученных с модуля первичного преобразования. На рис. 12, 13 приведены Фурье- и вейвлет-спектры этих сигналов соответственно.

### Выводы

Применение вейвлет-преобразования в аппаратно-программном комплексе виброанализатора дает возможность проводить детальный частотно-временной анализ вибросигналов. Как показывает эксперимент, это преобразование позволяет наиболее

подробно изучать свойства измеряемых сигналов вибрации. Представлены различия в информативности Фурье- и вейвлет-спектров на примере тестовых сигналов. Обеспечение измерения вибросигналов для большого числа точек и организация разветвленной системы сбора информации о состоянии диагностируемого оборудования стало возможным благодаря применению протокола связи, специально разработанного для организации сети между модулем вторичной обработки и множеством модулей первичной обработки. На базе реализованного макета аппаратно-программного комплекса проведены лабораторные исследования и испытания, необходимые для создания серийного образца устройства.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дьяконов В.П. Вейвлеты. От теории к практике. – М.: СОЛОН-Р, 2002. – 448 с.
2. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. – 1996. – Т. 166. – № 11. – С. 1145–1170.
3. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 464 с.

4. Гренке В.В., Светлаков А.А. Портативный аппаратно-программный анализатор вибраций технологического оборудования и его узлов // Современные средства и системы автоматизации: Матер. Всеросс. научно-практ. конф. молодых ученых. – 21–23 октября 2003 г. – Томск, 2003. – С. 95–98.

*Поступила 31.10.2006 г.*

УДК 514.88, 514.112.3, 535.015

## ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ОБЪЕКТА В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ СТЕРЕОДАЛЬНОМЕРА

А.М. Самойлов\*, В.В. Гренке\*\*\*, И.В. Шакиров\*\*\*

\*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

\*\*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск

E-mail: sam\_anton\_mih@ngs.ru

*Показано решение задачи определения координат совокупности движущихся объектов при работе телевизионного стереодальномера. Описана методика оценки точности определения их координат. Приведены результаты применения методики на макете телевизионного стереодальномера.*

### Введение

Дальномеры применяют для определения расстояний до объектов [1]. Часто возникает задача применения автоматизированных измерительных комплексов, способных наблюдать за местностью больших размеров и определять координаты всех находящихся в ней объектов. При этом объекты могут быть подвижными, то есть их координаты могут изменяться с течением времени. Дополнительно требуется идентификация объектов по определенным признакам. Большинство дальномеров (лазерные, оптические) требуют целеуказания (направления) на объект и позволяют одновременно определять расстояние только до одного объекта, либо до группы объектов, находящихся на небольшом расстоянии друг от друга. Кроме того, они неспособны описать объект наблюдения по определенным признакам. Таким образом, при по-

строении автоматизированных измерительных комплексов для решения задач подобного уровня использование стандартных дальномеров оказывается нецелесообразным.

В комплексе задачу определения координат объектов, находящихся на обширной территории, и их идентификацию можно решить на базе оптического телевизионного стереодальномера, работающего по принципу человеческих глаз. То есть удаление объекта от системы, состоящей из двух разнесенных телевизионных камер, работающих синхронно, определяется величиной смещения объекта на обоих изображениях. Точность определения координат объекта различна для разных участков стереозоны, и ее величина зависит от ряда параметров системы и удаленности объекта. Следовательно, ставится задача расчета ошибки определения координат объекта в стереозоне и за-

дача нахождения границ зоны работы стереодаль-номера с заданной точностью.

**Метод расчета координат объекта**

Рассмотрим геометрическую модель системы, показанную на рис. 1, состоящую из пересечения центральных оптических плоскостей объективов обеих камер. На рисунке обозначены основные параметры описываемой системы, где  $L$  – это база, то есть расстояние между оптическими центрами объективов двух камер,  $H$  – это расстояние между базовой линией и точкой пересечения оптических осей объективов видеокamer,  $Au$  – угол зрения объектива камер. Угол зрения объектива камер  $Au$  состоит из  $n$  элементарных углов, соответствующих углу зрения каждого пикселя принятого изображения. Для наглядности, на рисунке угол зрения объектива  $Au$  делится всего на три условных элементарных угла, что для обрабатываемого изображения соответствует разрешению по ширине в три пикселя. На модели видно, что при некотором сведении оптических осей объективов камер друг к другу элементарные углы зрения объективов обеих камер пересекаются, образуя общую зону видимости (стереозона), подобно конвергенции зрительных осей у глаз человека. Результат пересечения каждого элементарного угла является четырехугольником и на рисунке (рис. 1) имеет свою штриховку. В совокупности вся стереозона делится на элементарные четырехугольники.

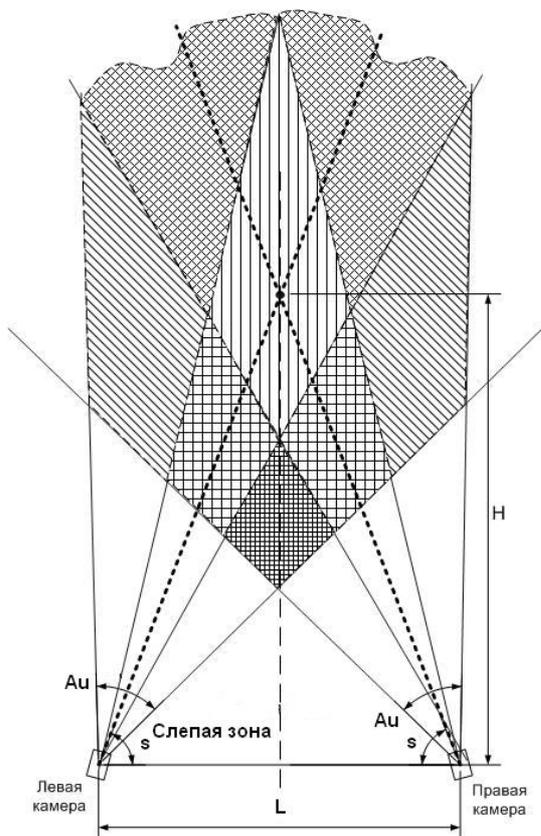


Рис. 1. Упрощенная геометрическая модель системы

Дополнительно при расчетах учитываются следующие важные параметры системы:  $Res$  – количество пикселей изображения по ширине;  $Nc1, Nc2$  – номера пикселей изображения по оси  $X$ , определяющие положение искомого объекта. Реальные телевизионные камеры имеют разрешение по ширине, равное 640 пикселей. Следовательно, в действительности угол зрения объектива каждой телевизионной камеры делится на 640 элементарных углов, а значения  $Nc1, Nc2$  могут принимать значения от 1 до 640. Получаем, что, если наблюдаемый объект находится в стереозоне, то он присутствует на изображениях, получаемых от обеих камер и его координаты локализованы в одном или нескольких соседних элементарных четырехугольниках. Геометрические размеры конкретного четырехугольника ограничивают точность определения координат объекта телевизионным стереодальномером. Другими словами, расстояние до объекта можно определить, если знать основные геометрические параметры системы и номера пикселей, в которых содержится изображение самого объекта. Так как элементарный четырехугольник воспринимается камерой как один пиксель изображения, координаты объекта в стереозоне равны координатам центра элементарного четырехугольника, а погрешность измерения координат будет лежать в пределах половины длины проекций этого четырехугольника на ось  $X$  (смещение) и ось  $Y$  (расстояние).

На рис. 2 приведена модель для решения поставленной геометрической задачи. Известны следующие параметры:  $L, H, Au, Res, Nc1, Nc2$  (рис. 2). Необходимо найти значения проекций  $Xn$  и  $Yn$  точки  $Pn$  на оси  $X$  и  $Y$ . Получаем следующие основные соотношения:

- а)  $S1$  и  $S2$  – углы между базовой линией и линией, проходящей от камеры 1 и 2 до точки  $Pn$ , определяемый выражением:

$$S1(Nc1) = \left( \arctg \left( \frac{2 \cdot H}{L} \right) - \frac{Au}{2} \right) + \frac{Au}{2 \cdot Res} + \frac{Au}{Res} \cdot (Res - Nc1); \quad (1)$$

$$S2(Nc2) = \left( \arctg \left( \frac{2 \cdot H}{L} \right) - \frac{Au}{2} \right) + \frac{Au}{2 \cdot Res} + \frac{Au}{Res} \cdot (Nc2 - 1); \quad (2)$$

- б)  $S3$  – угол треугольника с вершинами в точках  $C1, Pn, C2$ :

$$S3(Nc1, Nc2) = \pi - (S1(Nc1) + S2(Nc2)). \quad (3)$$

Из выражений (1–3) выводится формула расчета расстояния  $Dn$  от камеры 1 до искомого точки  $Pn$ :

$$Dn(Nc1, Nc2) = \begin{cases} L \cdot \frac{\sin(S2(Nc2))}{\sin(S3(Nc1, Nc2))} & \text{если } S3(Nc1, Nc2) > 0 \\ 0 & \text{если } S3(Nc1, Nc2) \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

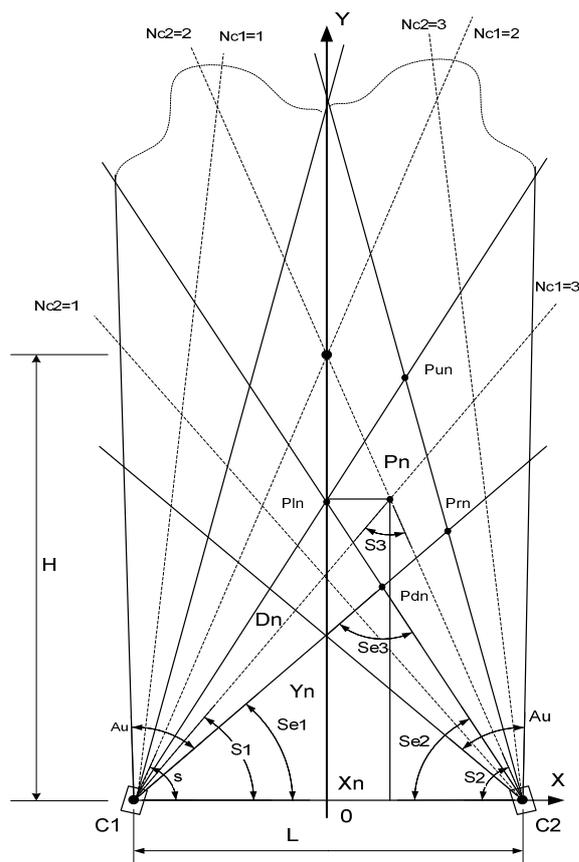


Рис. 2. Геометрическая модель для решения задачи определения координат объекта в зоне работы стереодальномера

Тогда, из выражений (1, 3, 4) определяются искомые координаты  $X_n, Y_n$ :

$$X_n(Nc1, Nc2) = \cos(S1(Nc1)) \cdot Dn(Nc1, Nc2) - \frac{L}{2}, \quad (5)$$

$$Y_n(Nc1, Nc2) = \sin(S1(Nc1)) \cdot Dn(Nc1, Nc2). \quad (6)$$

#### Метод расчета ошибки определения координат объекта

Используя данную методику определения координат, определим формулы для расчета координат точек  $Pun, Prn, Pdn$  и  $Pln$ , образующих четырехугольник, половинные размеры проекций которого дают величину ошибки определения координат объекта в рабочей зоне стереодальномера. Как было сказано выше, ошибка определения координат объекта по оси  $X$  образуется половиной расстояния проекции на ось  $X$  отрезка  $PrnPln$ , а ошибка по координате  $Y$  – половиной расстояния проекции на ось  $Y$  отрезка  $PunPdn$ . Приведем выражения для определения координат вершин элементарного четырехугольника для обеих осей (см. рис. 2):

$$Se1(Nc1) = \left( \arctg\left(\frac{2 \cdot H}{L}\right) - \frac{Au}{2} \right) + \frac{Au}{Res} \cdot (Res - Nc1), \quad (7)$$

$$Se2(Nc2) = \left( \arctg\left(\frac{2 \cdot H}{L}\right) - \frac{Au}{2} \right) + \frac{Au}{Res} \cdot (Nc2 - 1), \quad (8)$$

$$Se3(Nc1, Nc2) = \pi - (Se1(Nc1) + Se2(Nc2)), \quad (9)$$

$$Den(Nc1, Nc2) = \begin{cases} L \cdot \frac{\sin(Se2(Nc2))}{\sin(Se3(Nc1, Nc2))} & \text{если } Se3(Nc1, Nc2) > 0 \\ 0 & \text{если } Se3(Nc1, Nc2) \leq 0 \end{cases}, \quad (10)$$

$$Xen(Nc1, Nc2) = \cos(Se1(Nc1)) \cdot Den(Nc1, Nc2) - \frac{L}{2}, \quad (11)$$

$$Yen(Nc1, Nc2) = \sin(Se1(Nc1)) \cdot Den(Nc1, Nc2). \quad (12)$$

Из выражений (7–12) выразим координаты точек  $Pun, Prn, Pdn$  и  $Pln$ . В результате получим формулы для вычисления ошибок определения координат в заданном четырехугольнике:

$$Er_{xn}(Nc1, Nc2) = \left| \frac{Xen(Nc1+1, Nc2) - Xen(Nc1, Nc2+1)}{2} \right|, \quad (13)$$

$$Er_{yn}(Nc1, Nc2) = \left| \frac{Yen(Nc1, Nc2) - Yen(Nc1+1, Nc2+1)}{2} \right|. \quad (14)$$

#### Выделение границы стереозоны по максимальной величине ошибки

Из выражений (13, 14) решается задача определения границ стереозоны для заданной величины ошибки определения координат объекта. В рамках данной статьи вывод алгоритма решения этой задачи опущен. Приведен окончательный результат вычислений. На рис. 3 показан пример расчета границ стереозон для четырех различных значений ошибок определения координат объектов: 0,1, 0,2, 0,5, 1,0 м для следующих параметров системы:  $L=1,8$  м,  $H=49$  м,  $Au=29,8^\circ$ ,  $Res=640$ . Данные параметры полностью соответствуют параметрам реально работающего макета стереодальномера. Как видно из рисунка, ошибка определения координат объекта увеличивается с удалением объекта от системы.

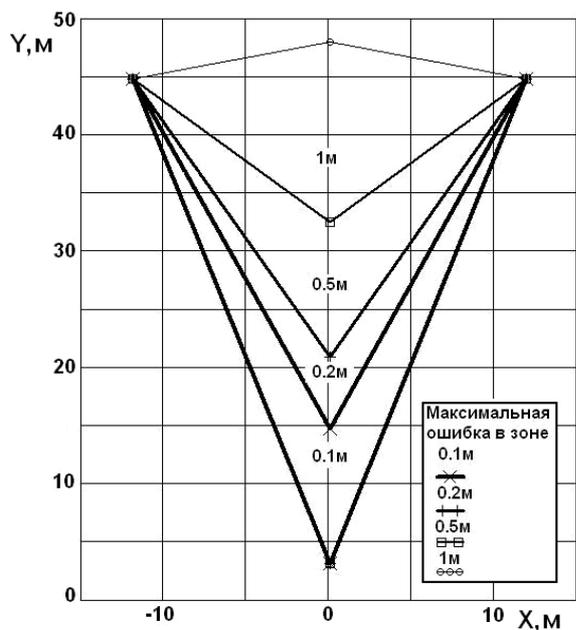
#### Применение

Проверка изложенных выше расчетов была осуществлена во время испытаний действующего макета телевизионной измерительной стереосистемы, рис. 4. Полную методику настройки оптической части системы можно посмотреть в работах [2, 3].

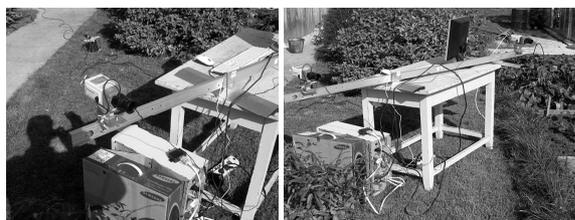
На рис. 5 показаны экспериментальные результаты работы макета стереоизмерительной системы.

На рисунке видны два объекта измерения (колышки), выделенные белыми прямоугольниками. Расстояния от системы до каждого объекта, а также расстояние между объектами были замерены руч-

ной рулеткой. Из данного рисунка видно, что положения объектов на изображениях двух камер различны, что соответствует вышеизложенной теории работы телевизионного стереодальномера. В таблице приведены результаты ручных замеров расстояний до объектов и расстояний, замеренных с помощью макета телевизионного стереодальномера по расчетным соотношениям (5, 6). Также приведены другие характеристики работы системы.



**Рис. 3.** Вид и границы четырех стереозон для заданных ошибок определения координат. Стереосистема расположена в точке с координатами (0,0)



**Рис. 4.** Макет телевизионного стереодальномера

Из таблицы видно, что полученный результат лежит в пределах расчетных значений. Так как изложенная выше методика расчета носит дискретный характер, определяемый способом разбиения пространства на число пикселей, то величины теоретических ошибок носят дискретный характер. Следовательно, полученное значение эксперимен-

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Шульман М.Я. Автоматическая фокусировка оптических систем. – Л.: Машиностроение, 1990. – 224 с.
2. Форсайт П. Компьютерное зрение. Современный подход. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. – 928 с.

тальной ошибки меньше, чем теоретическая ошибка, не должно удивлять, так как процедура измерения расстояния с помощью рулетки не является дискретной.



**Рис. 5.** Пример работы телевизионного стереодальномера

**Таблица.** Результаты испытаний макета стереодальномера.

Значения	Объект 1	Объект 2
Расстояние, замеренное с помощью рулетки, м	19,00	18,60
Номер пикселя левой/правой камеры	222/152	454/381
Расстояние, замеренное стереодальномером, м	18,95	18,69
Координата смещения объекта по осям X/Y, м	-2,1/18,92	1,48/18,54
Теоретическая/реальная ошибка определения расстояния, м	0,16/0,05	0,16/0,09

**Заключение**

1. Описан принцип работы телевизионного оптического стереодальномера для одновременного определения координат множества объектов, в том числе движущихся. Возможно построение системы, способной строить картину движения объектов на местности и решать задачу трехмерной реконструкции рельефа поверхности.
2. Предложена методика расчета координат объектов, находящихся в стереозоне, которая реализована на макете системы.
3. Предложена методика для расчета ошибки определения координат объекта в заданной точке. Результаты работы метода определения ошибки координат объекта подтверждаются натурными испытаниями макета системы.
3. Методы компьютерной обработки изображений / Под ред. В.А. Сойфера. – М.: Физматлит, 2003. – 784 с.

Поступила 31.10.2006 г.