



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 28 за 2010 г.



Иванов Д.С., Ткачев С.С.,  
Карпенко С.О., Овчинников М.Ю.

Калибровка датчиков для  
определения ориентации  
малого космического  
аппарата

**Рекомендуемая форма библиографической ссылки:** Калибровка датчиков для определения ориентации малого космического аппарата / Д.С.Иванов [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2010. № 28. 30 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2010-28>

ОРДЕНА ЛЕНИНА  
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ им.М.В.КЕЛДЫША  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

Д.С. Иванов, С.С. Ткачев, С.О. Карпенко, М.Ю. Овчинников

**КАЛИБРОВКА ДАТЧИКОВ ДЛЯ  
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИИ  
МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА**

Москва

2010

**Калибровка датчиков для определения ориентации малого космического аппарата.** Д.С. Иванов, С.С. Ткачев, С.О. Карпенко, М.Ю. Овчинников. Препринт ИПМ им.М.В.Келдыша РАН, Москва, 30 страниц, 31 рисунок, библиография 8 наименований.

Предложена методика калибровки каждого типа датчиков системы определения ориентации, которая состоит из набора солнечных датчиков, трехосного магнитометра и трех одноосных датчиков угловой скорости. На основе разработанной методики проведена калибровка датчиков определения ориентации, которые будут установлены на микроспутник «Чибис-М». Получены калибровочные характеристики для каждого исследуемого датчика.

**Ключевые слова:** магнитометр, солнечный датчик, датчик угловой скорости, калибровка

Calibration of Satellite Attitude Determination Sensors, D.S. Ivanov, S.S. Tkachev S.O. Karpenko, M.Yu. Ovchinnikov, Preprint of KIAM RAS, Moscow, 30 Pages, 31 Figures, 8 References

Attitude determination sensors calibration technique is presented. The sensors are composed by set of solar sensors, magnetometer and three uniaxial gyro sensors. Chibis-M small satellite attitude determination sensors have been calibrated accordingly developed technique. Calibration features are obtained for each sensor.

**Key words:** magnetometer, sun sensor, angular rate sensor, calibration technique

## 1. Введение

Для успешного функционирования системы определения ориентации малого космического аппарата в условиях полета необходимо произвести ряд наземных процедур, которые включают в себя проверку работоспособности датчиков определения ориентации, калибровку датчиков и их испытания на макете системы управления и определения ориентации. У каждого датчика определения ориентации есть набор характеристик, которые необходимо знать для вычисления ориентации аппарата. Для каждого типа датчиков эти характеристики разные, но для датчиков одного вида они одинаковы. В настоящей работе предложена методика калибровки каждого типа датчиков для системы определения ориентации, состоящей из набора солнечных датчиков, трехосного магнитометра и трех одноосных датчиков угловой скорости. На основе разработанной методики проведена калибровка существующих датчиков для определения ориентации, которые будут установлены на микроспутник «Чибис-М» [1].

Приведем основные калибровочные характеристики каждого типа датчиков.

### 1.1. Характеристики датчика угловой скорости

Датчик угловой скорости (ДУС) – это датчик, выходящий сигнал которого пропорционален угловой скорости относительно оси чувствительности (оси, относительно которой измеряется угловая скорость). Полезным выходом ДУСа может являться напряжение либо, если установлено аналого-цифровое устройство, – пакеты данных, в которых передается значение, пропорциональное угловой скорости. Для вычисления текущей угловой скорости по выходным данным датчика необходимо провести поиск его калибровочных коэффициентов. Чаще всего под калибровочными коэффициентами понимают смещение нуля и коэффициент пропорциональности между выходным значением и значениям угловой скорости. Также при использовании ДУСа важной информацией является «второй момент» шума выходных значений датчика.

В настоящей работе рассматриваются три одноосных датчика угловой скорости ADIS16130 (рис.1.1), для которых необходимо построить калибровочные коэффициенты. В процессе их построения необходимо определить следующие зависимости и величины.

1. Зависимость смещения нуля ДУСов от температуры (требуется подобрать аппроксимирующую кривую).

2. Зависимость шума измерений от числа усредняемых значений.

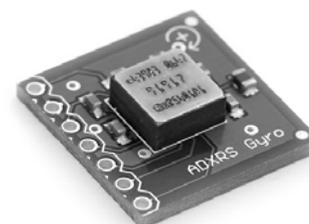


Рис.1.1. Датчик угловой скорости

3. Коэффициент пропорциональности между выходными значениями и угловой скоростью.

Полученные данные необходимо сравнить с документацией по исследуемым датчикам.

## 1.2. Характеристики датчика солнца

Датчик Солнца используется для определения вектора направления на Солнце в связанной с аппаратом системе координат. Рассмотрим датчик на основе ПЗС-матрицы (Прибор с Зарядовой Связью) (рис.1.2).

Для достижения заявленной производителем точности датчика необходимо провести ряд процедур по определению его параметров, которые для каждого прибора уникальные и связаны с ошибками сборки и особенностями используемых в датчике составных элементов. Требуется найти границы поля зрения датчика для его корректной работы. Кроме того, интерес представляют точностные характеристики датчика, которые нужно знать для определения ориентации аппарата [1]. Определению всех перечисленных параметров посвящен раздел 2 настоящей работы.



Рис.1.2. Внешний вид датчика солнца

## 1.3. Характеристики магнитометра

Магнитометр – это прибор, измеряющий величину и направление вектора магнитной индукции (рис. 1.3.). Так как для определения ориентации используется трехосный магнитометр, то необходимо определить неточность перпендикулярности чувствительных осей магнитометра, которая обусловлена неточностью установки измерительных чипов на плате магнитометра и имеет характер постоянного смещения. Кроме того, по каждой из осей необходимо найти коэффициенты усиления – коэффициенты, которые переводят выходные значения измерений магнитометра в единицы магнитной индукции. Так же как и у датчика угловой скорости, для вычисления вектора магнитной индукции необходимо знать смещение нуля датчика (выходные значения магнитометра в отсутствие магнитного поля) по каждой из измерительных осей.



Рис. 1.3. Магнитометр

Рассмотрим теперь методику калибровки каждого датчика, которая подходит для любых датчиков, имеющих схожие модели измерений и калибровочные

характеристики. В конце каждого раздела приводятся результаты калибровки реальных датчиков.

## 2. Датчик угловой скорости

### 2.1. Методика калибровки

Рассмотрим модель измерений датчика угловой скорости. Для трёхосного ДУСа ее можно записать в общем виде

$$\omega = \alpha(\xi - \beta(T)), \quad (2.1)$$

где  $\omega$  – это вектор угловой скорости в системе координат, связанной с ДУС,  $\xi$  – вектор выходных полезных значений ДУСа,  $\alpha$  – калибровочная матрица, переводящая единицы выходных значений датчика в единицы  $^{\circ}/c$ ,  $\beta(T)$  – вектор смещения нуля измерений в единицах выходных значений ДУСа,  $T$  – температура окружающей среды в  $^{\circ}C$ .

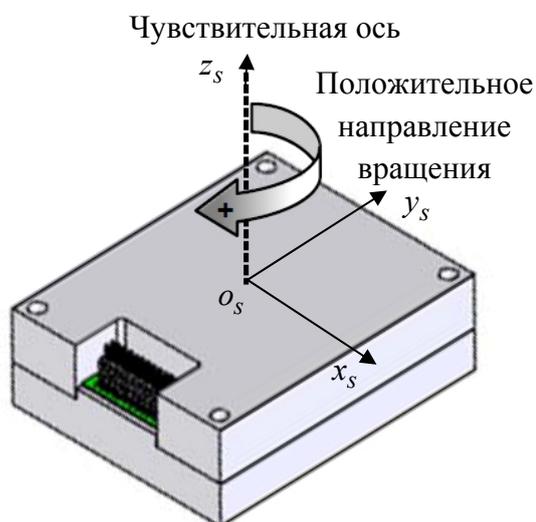


Рис. 2.1. ДУС ADIS16130 и связанная с ним СК

Таким образом, предполагаем, что калибровочные коэффициенты зависят только от температуры, и при постоянной температуре угловая скорость зависит линейно от выходных значений.

Рассмотрим одноосный датчик угловой скорости ADIS16130. Как изображено на рис.2.1, ось чувствительности датчика направлена под углом  $90^{\circ}$  к плоскости верхней крышки ДУСа. Положительное направление вращения совпадает с направлением вращения часовой стрелки при наблюдении со стороны направления оси  $o_s z_s$ .

Направление осей системы координат  $o_s x_s y_s z_s$ , связанной с датчиком, изображено на рис.2.1.

Для одноосного датчика выражение (2.1) преобразуется следующим образом:

$$\omega = \alpha(\xi - \beta(T)). \quad (2.2)$$

Здесь скалярные величины  $\omega$ ,  $\xi$ ,  $\beta$  имеют тот же смысл, что и аналогичные векторные величины в (2.1), а матрица коэффициентов  $\alpha$  выродилась в скалярный коэффициент.

### 2.1.1. Зависимость смещения ноля от температуры

Для построения зависимости смещения ноля ДУСа от температуры предлагается следующая методика. Сначала ДУС охлаждается до отрицательной температуры в пределах рабочего диапазона. Затем ДУС помещается на неподвижную платформу при комнатных условиях. Далее с ДУСа снимаются выходные значения и значения температуры датчика до тех пор, пока температура датчика не стабилизируется. Выходные значения ДУСа обрабатываются с помощью фильтра Калмана с целью уменьшения шума измерений. По полученным данным с помощью метода наименьших квадратов строится аппроксимирующая кривая, определяется среднеквадратичная ошибка определения смещения ноля ДУСа.

### 2.1.2. Определение коэффициента пропорциональности

Для определения зависимости коэффициента пропорциональности между выходными значениями и угловой скоростью ДУСа предлагается следующая методика. ДУС помещается на поворотный стол. Один поворот движущего вала на  $360^\circ$  равен  $9^\circ$  поворота стола. Так как поворот вала производится с точностью в  $1^\circ$ , то точность поворота стола равна  $9^\circ / 360^\circ = 0.033^\circ$ .

Поворот ДУСа на угол  $\varphi$  можно вычислить интегрированием выходной угловой скорости  $\varphi = \int \omega dt$ . Но, так как угловая скорость известна только в дискретные моменты времени, то, учитывая (2.2), можно записать

$$\varphi = \sum_i^N \omega_i \Delta t = \sum_i^N \alpha \xi_i \Delta t - \sum_i^N \alpha \beta_i \Delta t - \sum_i^N \alpha \varepsilon_i \Delta t, \quad (2.3)$$

где  $N$  – число измерений,  $\Delta t$  – интервалы между измерениями,  $\varepsilon_i = \hat{\xi}_i - \beta_i$  – локальная разница между заданным смещением ноля и выходными значениями датчика в состоянии покоя. В случае малой неточности знания смещения ноля  $\beta_i$  слагаемое  $\varepsilon_i$  приводит к дрейфу угла  $\varphi$  при интегрировании выходных значений датчика в состоянии покоя.

Для нахождения локального среднего  $\bar{\varepsilon}$  ДУС помещается на неподвижную опору и в течение некоторого времени снимаются значения  $\varepsilon_i$ , после чего находится их среднее по формуле

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{N} \sum_i^N \varepsilon_i.$$

Теперь найдем калибровочный коэффициент из (2.3), предполагая, что  $\alpha = const$  на интервале измерения, и получим

$$\alpha = \frac{\varphi}{\sum_i^N \xi_i \Delta t - \sum_i^N \beta_i \Delta t - \sum_i^N \bar{\varepsilon} \Delta t}.$$

Таким образом, снимая показания ДУСа при повороте стола, вычисляем коэффициент пропорциональности.

### **2.1.3. Зависимость шума измерений от числа усредняемых значений**

Для определения характеристик шума измерений предлагается следующая методика. ДУС помещается на неподвижную платформу при комнатной температуре, и в течение некоторого времени с датчика снимаются выходные значения. Выходные значения с помощью полученных на предыдущих этапах испытаний значений  $\alpha$  и  $\beta$  преобразуются в значения угловой скорости. Далее задается некоторое число усреднения  $N_{cp.}$ , находится массив средних значений угловой скорости  $y_i$ , где  $i = 1 \dots N_y$ ,  $N_y$  – число средних значений. Затем находится среднее значение массива  $|y_i|$ . Получаем среднее значение шума измерений при числе усреднения  $N_{cp.}$ . Теперь будем изменять  $N_{cp.}$  от 1 до  $10^5$ , получим зависимость шума измерений от числа усредняемых значений.

## **2.2. Результаты испытаний**

В этом разделе приведены условия проведения и результаты испытаний, сравнение полученных результатов с документацией.

### **2.2.1. Смещение ноля от температуры**

ДУСы (условные идентификаторы 168, 170 и 171) охлаждались до температуры  $-15^\circ\text{C}$ , после чего снимались выходные значения датчика. Пример выходных значений в зависимости от времени изображен на рис. 2.2. На рис. 2.3 изображена зависимость изменения температуры датчика от времени. Как видно из рис. 2.3, вследствие потери байта при посылке данных от датчика бортовому компьютеру иногда появляются аномальные измерения. После удаления аномальных измерений зависимость температуры от времени выглядит так, как это изображено на рис. 2.4. Пример зависимости смещения ноля от температуры приведен на рис. 2.5. Как видно из графика, зависимость хорошо ложится на линейный закон  $\beta = aT + b$ , где  $a$  и  $b$  – параметры прямой.

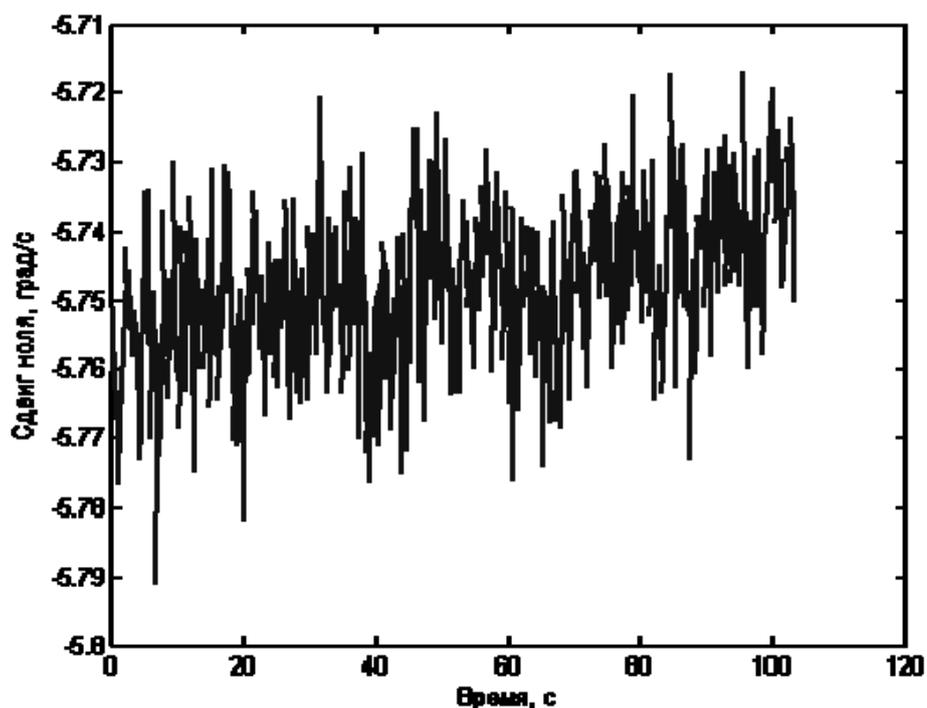


Рис. 2.2. Пример зависимости выходных значений от времени

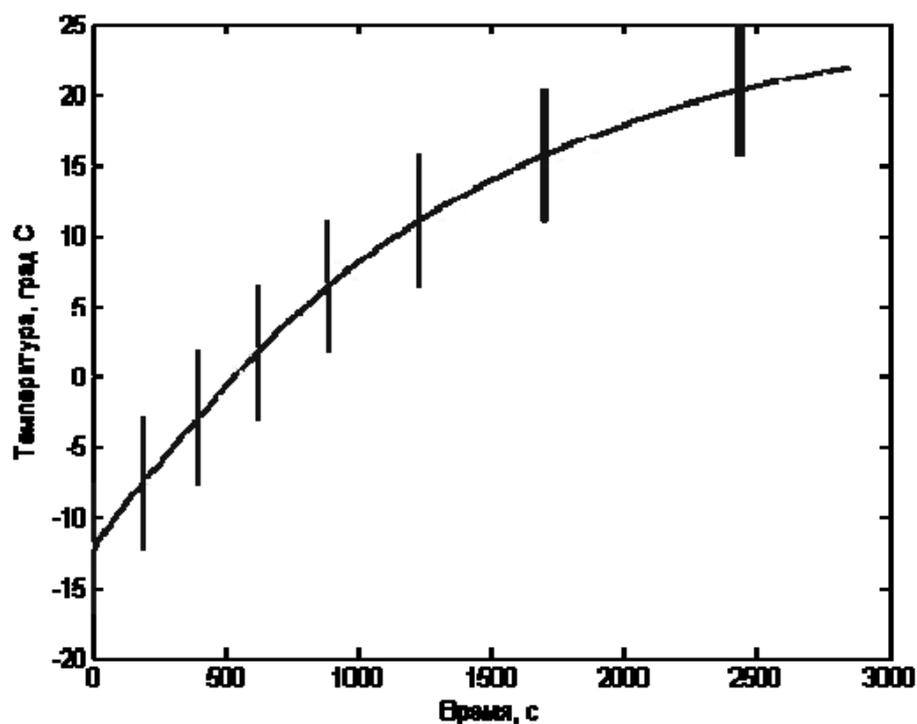


Рис. 2.3. Пример зависимости температуры от времени

Для трех датчиков угловой скорости зависимость смещения ноля от температуры была аппроксимирована линейным законом с помощью метода наименьших квадратов. Параметры аппроксимирующих кривых, а также среднеквадратичные ошибки приведены в табл. 2.1. В последнем столбце таблицы приведены среднеквадратичные отклонения в  $^{\circ}/с$ . Вид самих зависимостей изображен на рис. 2.6. Аппроксимирующие прямые изображены серым цветом. Однако, как видно из рис. 2.7, для датчика 171 одна прямая плохо аппроксимирует

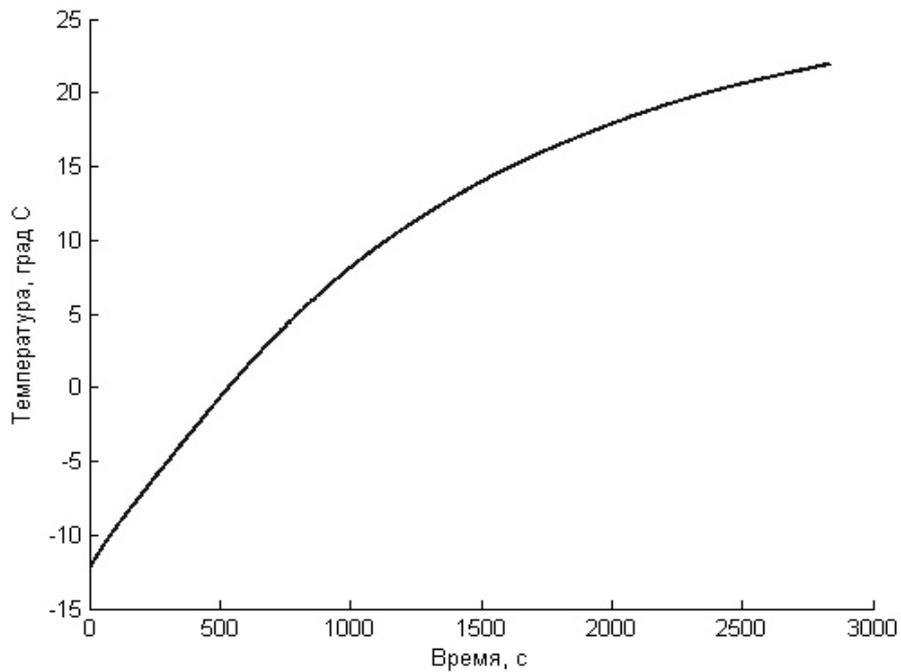


Рис. 2.4. Отфильтрованная зависимость температуры от времени

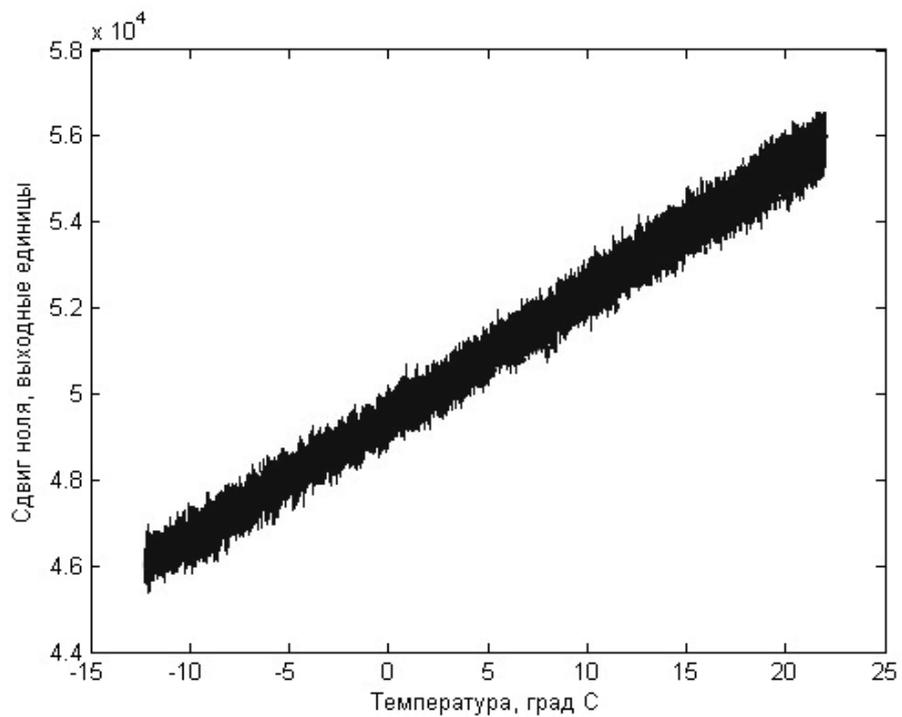


Рис. 2.5. Пример зависимости смещения нуля от температуры

данные, поэтому было решено аппроксимировать данные двумя прямыми: до значения температуры  $0^\circ$  и после. Результат можно видеть на рис. 2.8. Средне-квадратичное отклонение в этом случае приведено в табл. 2.1.

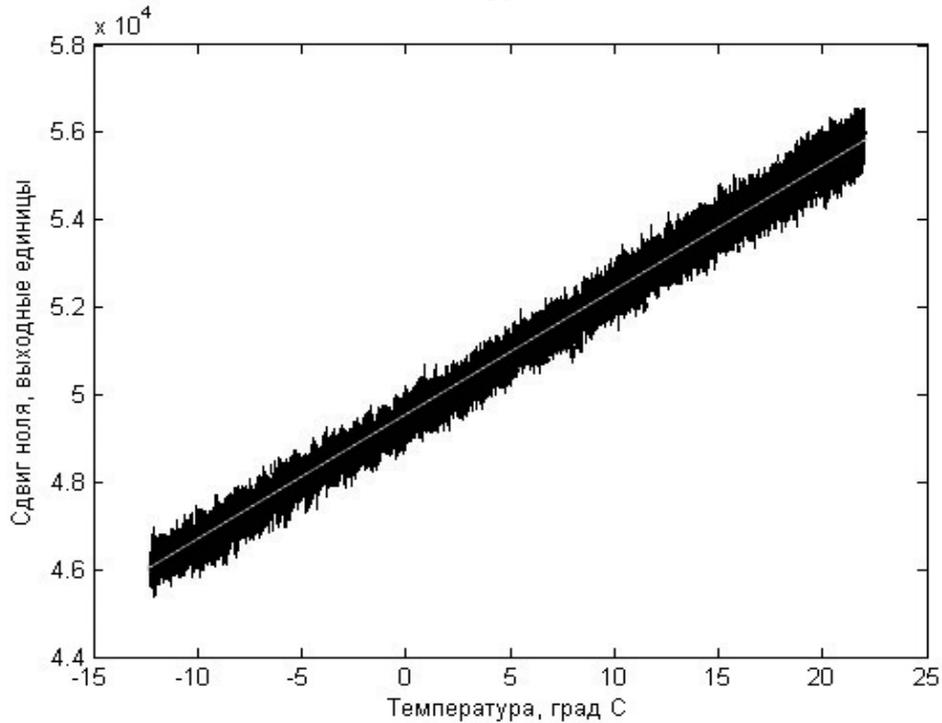


Рис. 2.6. Линейная зависимость смещения нуля от температуры для датчика 168

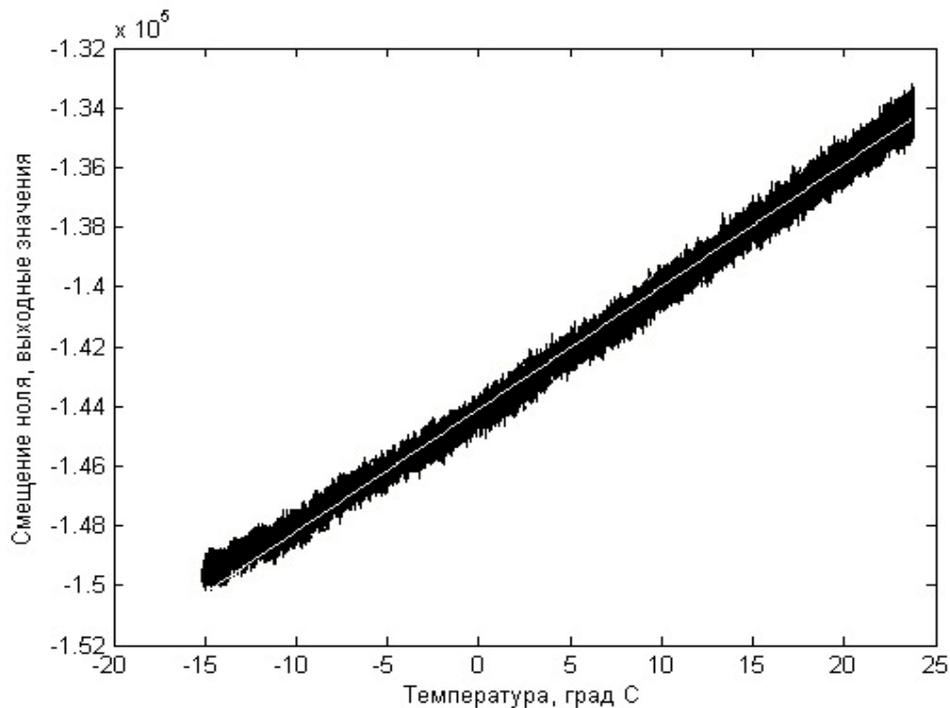


Рис. 2.7. Аппроксимация смещения нуля после обработки фильтром Калмана (171)

С целью увеличения точности данные о смещении нуля датчика были обработаны с помощью фильтра Калмана, и на основе выходных значений фильтра Калмана были построены опять же аппроксимирующие прямые, которые можно видеть на рис. 2.8. На рисунках светло-серым обозначены выходные значения фильтра Калмана, серым цветом – аппроксимирующие прямые. Параметры прямых и среднеквадратичное отклонение приведены в табл. 2.2. Для датчика 171 смещение нуля аппроксимировалось двумя прямыми.

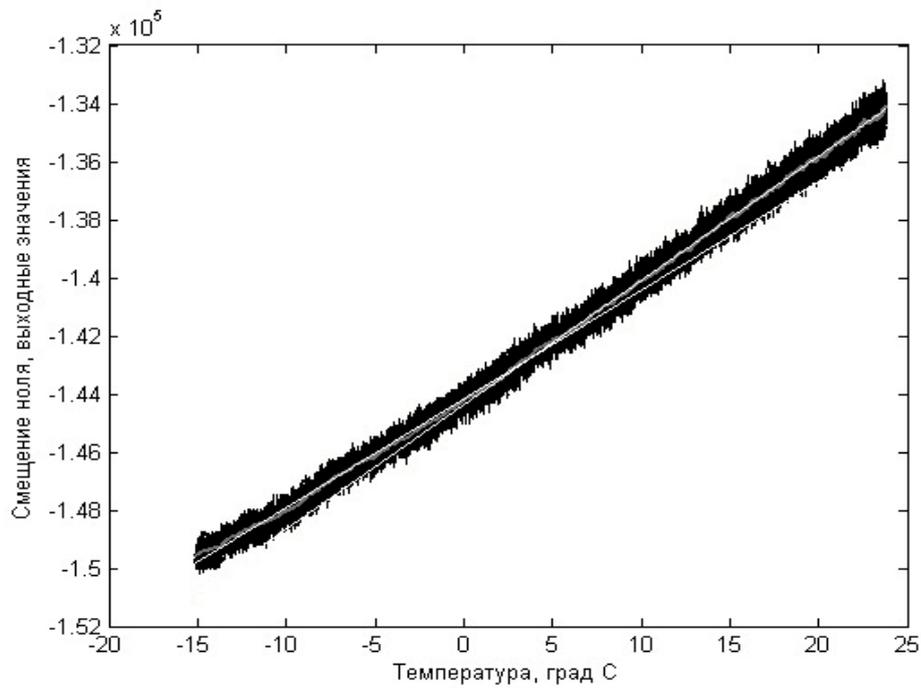


Рис. 2.8. Аппроксимация с помощью двух прямых для датчика 171

Табл. 2.1. Параметры прямой и среднеквадратичное отклонение

ДУС	$a$	$b$	$\sigma$	$\sigma, \text{ } ^\circ/\text{c}$
168	288,78	49479	240	0,010
170	-141,31	-28034	252	0,010
171	410,34	-144085	280	0,011
171, до 0°	376,10	-144196	123	0,006
171, после 0°	427,97	-144396	123	0,006

Табл. 2.2. Параметры прямой и среднеквадратичное отклонение после обработки фильтром Калмана

ДУС	$a$	$b$	$\sigma$	$\sigma, \text{ } ^\circ/\text{c}$
168	287,55	49512	54,69	0,002
170	-141,81	-28027	67,71	0,002
171, до 0°	373,93	-144194	49,13	0,001
171, после 0°	427,83	-144395	47,79	0,001

После получения калибровочных коэффициентов в п. 2.1.1 настоящей работы смещение нуля от температуры можно представить в единицах  $^\circ/\text{c}$  (рис. 2.9). Для сравнения приводится график с допустимыми зависимостями из документации к датчикам (рис. 2.10). Как видно по наклонам кривых, они находятся в допустимой области.

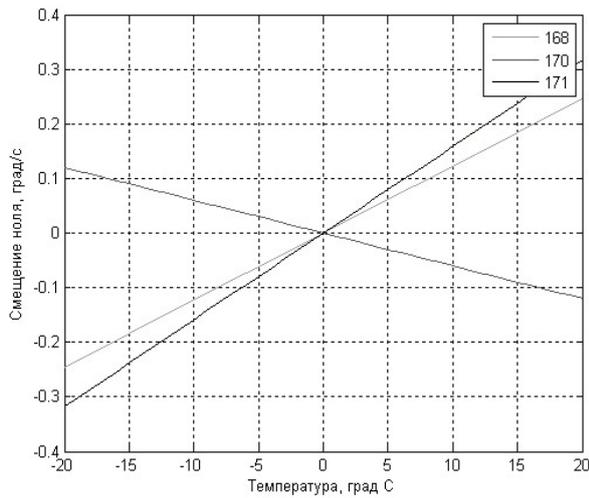


Рис. 2.9. Наклонения смещений нолей датчиков при  $b = 0$

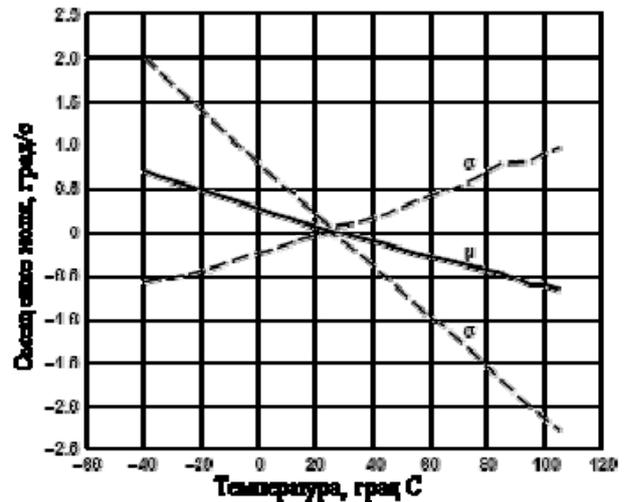


Рис. 2.10. Типичные значения наклонов зависимости смещения ноля от температуры

### 2.2.2. Определение коэффициента пропорциональности

Для каждого датчика был определен коэффициент пропорциональности по методике, описанной в п. 2.1.2 настоящей работы. ДУС помещался на поворотный стол, первые 30 секунд снимались показания с неподвижного датчика для вычисления оценки  $\varepsilon_i$ , затем стол поворачивался на 9 градусов. На рис. 2.11 изображен пример зависимости разности между выходными значениями датчика и его смещением ноля от времени.

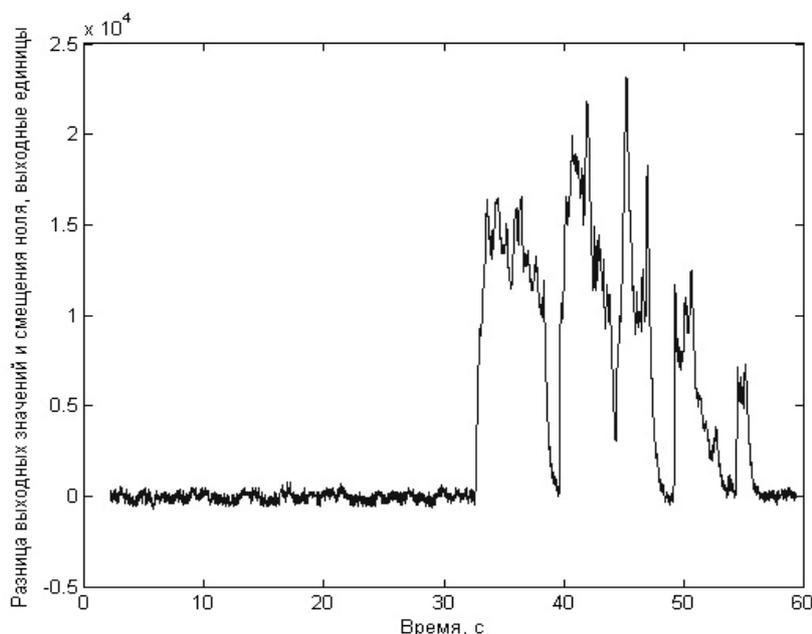


Рис. 2.11. Пример зависимости интегрируемых значений от времени

В табл. 2.3 приведены калибровочные коэффициенты для датчиков при каждом из испытаний и их средние значения. Как видно, вычисленные значения близки к значению, приведенному в документации ( $\alpha^{-1} = 23488$ ), однако есть небольшие индивидуальные отличия у каждого из датчиков.

Табл.2.3. Калибровочные коэффициенты

ДУС	Испытание 1, $\alpha^{-1}$	Испытание 2, $\alpha^{-1}$	Испытание 3, $\alpha^{-1}$	Среднее значение, $\alpha^{-1}$
168	23869,31	23791,32	23821,43	23827,35
170	24054,13	24098,12	23787,42	23979,89
171	23995,28	23601,85	23968,75	23855,29

### 2.2.3. Зависимость шума измерений от числа усредняемых значений

На рис. 2.12 приведена зависимость ошибки средних значений от числа усреднения, полученная по методике, описанной в п. 2.1.3. На рис. 2.13 приведена зависимость ошибки средних значений от времени усреднения при максимальной частоте выходных данных ( $\sim 1$  кГц). Графики сходны. Характеристика шума примерно одинакова для всех трех датчиков.

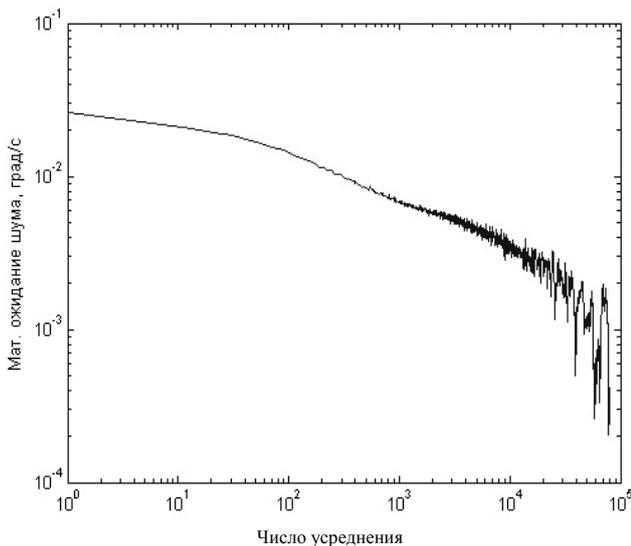


Рис. 2.12. Зависимость ошибки средних значений от числа усреднения

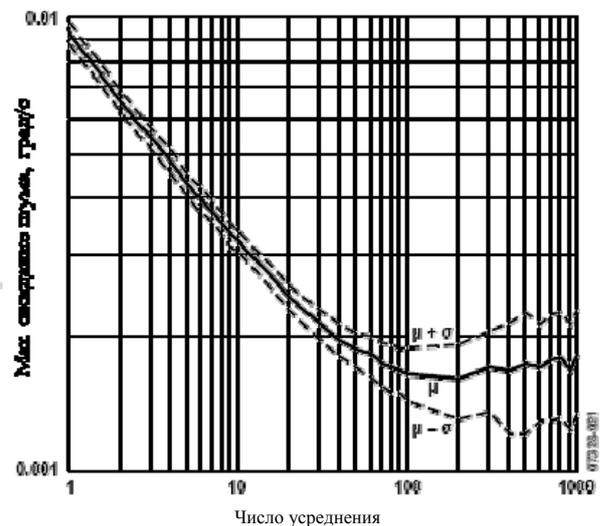


Рис. 2.13. Зависимость ошибки средних значений от времени усреднения (из документации)

## 3. Солнечный датчик

### 3.1. Принцип работы датчика

Принцип работы датчика схематично изображен на рис. 3.1. Над ПЗС матрицей располагается тонкий непрозрачный экран с узкой щелью [2]. ПЗС матрица представляет собой плоскую матрицу из одинаковых ПЗС-элементов. Таким образом, в зависимости от направления солнечный поток падает на различные пиксели ПЗС матрицы. По пикселям рассчитывается угол падения солнечного света. Расстояние между щелью и ПЗС-матрицей определяет поле зрения датчика. Для рассматриваемого датчика поле зрения представляет собой конус с углом при основании  $45^\circ$ . Непрозрачный экран изнутри покрыт слоем, поглощающим

свет, для предотвращения переотражения солнечных лучей от ПЗС-матрицы. Для ее защиты от радиации и для обеспечения необходимого уровня освещения на датчике установлен специальный ослабляющий фильтр.

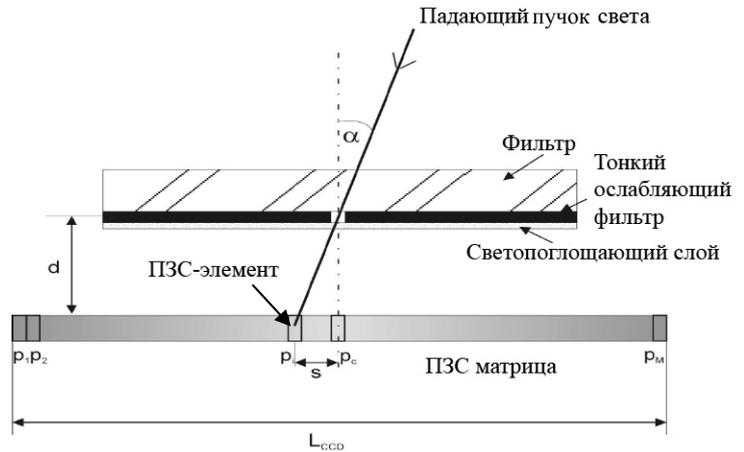


Рис. 3.1. Принцип работы солнечного датчика

### 3.2. Модель измерений

Рассмотрим следующую модель измерений датчика Солнца. В случае, когда вектор направления на Солнце коллинеарен одной из осей собственной системы координат датчика, выходными значениями датчика являются  $p_{i\alpha}$  и  $p_{i\beta}$ :

$$p_{i\alpha} = p_{0\alpha} + k_{\alpha} \tan(\alpha - \alpha_{off}), \quad (3.1)$$

$$p_{i\beta} = p_{0\beta} + k_{\beta} \tan(\beta - \beta_{off}). \quad (3.2)$$

Здесь  $p_{i\alpha}$ ,  $p_{i\beta}$  – номера пикселя, находящегося в центре освещенного Солнцем пятна на ПЗС-матрице,  $p_{0\alpha}$ ,  $p_{0\beta}$  – номера пикселей, которые находятся в центре

освещенного пятна при условии перпендикулярности соответствующей оси датчика направлению на Солнце ( $\alpha = \alpha_{off}$ ,  $\beta = \beta_{off}$ ),  $k_{\alpha}$ ,  $k_{\beta}$  – коэффициенты усиления,  $\alpha_{off}$ ,  $\beta_{off}$  – углы поворота ПЗС-матрицы относительно корпуса датчика,  $\alpha$ ,  $\beta$  – углы направ-

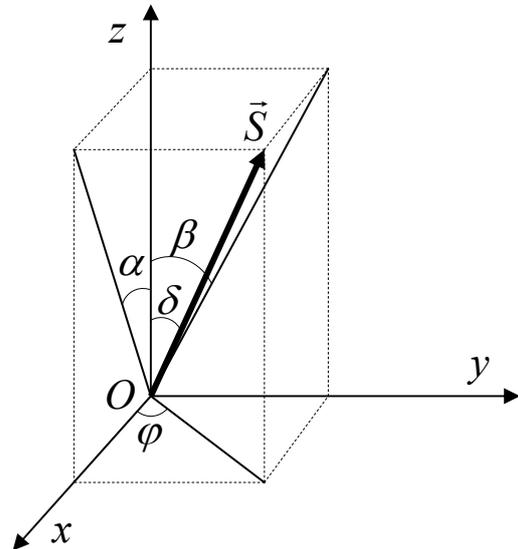


Рис. 3.2. Собственная система координат

ления на Солнце в плоскостях  $Oxz$  и  $Oyz$  соответственно (рис.3.2). Однако в случае произвольного положения направление на Солнце не находится в какой-то

одной из плоскостей  $Oxz$  и  $Oyz$  собственной системы координат. В этом случае  $\alpha$  и  $\beta$  рассчитываются из рекуррентных формул:

$$p_{i\alpha} = p_{0\alpha} + \frac{k_{\alpha}}{\cos \beta} \tan(\alpha - \alpha_{off}), \quad (3.3)$$

$$p_{i\beta} = p_{0\beta} + \frac{k_{\beta}}{\cos \alpha} \tan(\beta - \beta_{off}). \quad (3.4)$$

Для определения направления на Солнце при произвольном угле падения света необходимо произвести следующую итерационную процедуру. Сначала решаются уравнения (3.1) и (3.2), далее вычисленные  $\alpha$  и  $\beta$  подставляются в формулы (3.3) и (3.4). Затем полученные по этим формулам  $\alpha$  и  $\beta$  снова подставляются в формулы (3.3) и (3.4) до тех пор, пока разница между вычисляемыми значениями углов на соседних шагах не будет меньше некоторого задаваемого значения.

### 3.3. Стенд

Для определения характеристик солнечного датчика в ИПМ им. М.В.Келдыша РАН был создан стенд (рис.3.3).

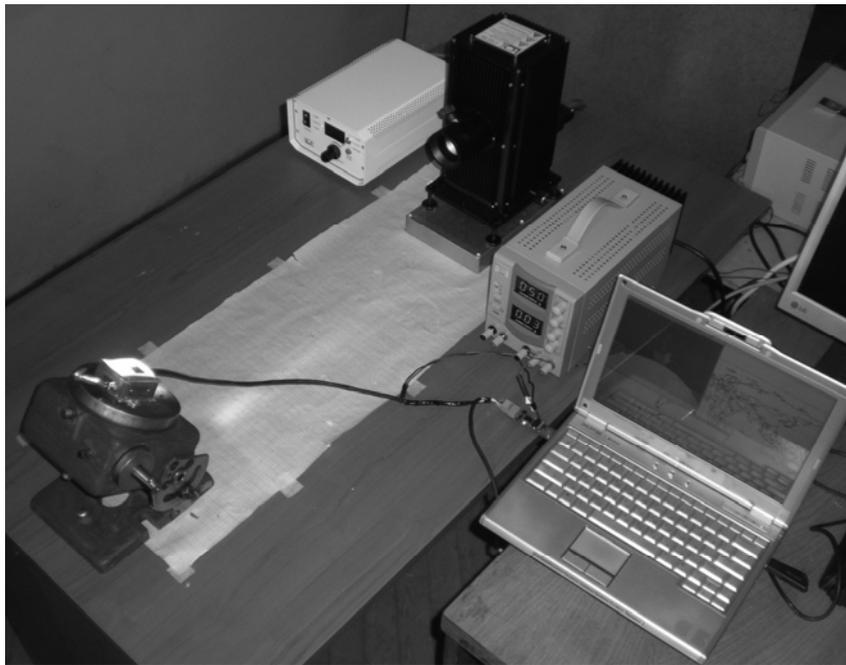


Рис. 3.3. Вид стенда

#### 3.3.1. Состав стенда

Рассмотрим состав стенда для определения калибровочных характеристик датчика Солнца:

• **Имитатор солнечного излучения** (рис. 3.4) представляет собой ксеноновую лампу (рис. 3.5), спектр которой (рис. 3.6) [3] схож со спектром Солнца



Рис. 3.4. Корпус имитатора солнечного излучения и блок питания



Рис. 3.5. Строение ксеноновой лампы

(рис.3.7). Лампа помещена в специальный корпус, который позволяет собрать с помощью внутренних зеркал и направить в выходное отверстие часть света лампы. У отверстия лампы находится собирающая линза, выполненная из кварцевого материала, пропускающего практически весь спектр лампы (рис. 3.8). На выходе из имитатора имеем параллельный пучок света (рис. 3.9). Мощность, подаваемая на ксеноновую лампу, регулируется с помощью специального источника питания.

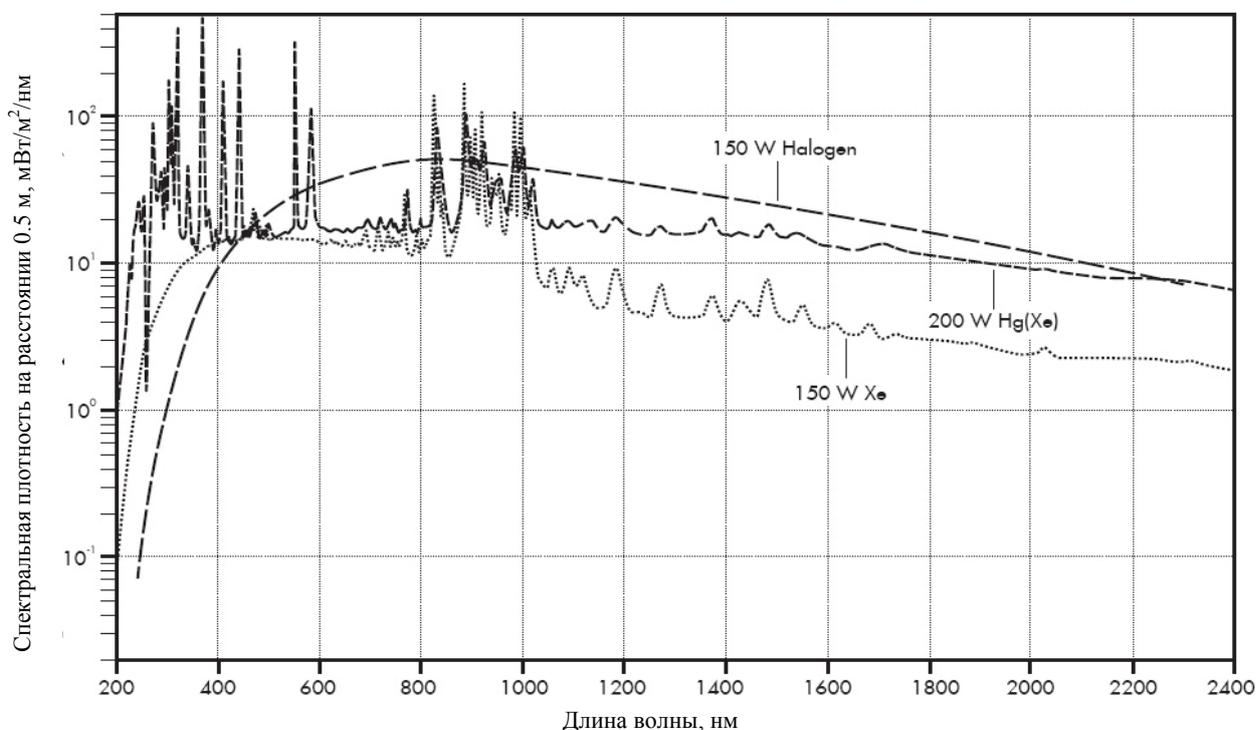


Рис. 3.6. Спектральная плотность ксеноновой лампы, работающей при мощности 150Вт

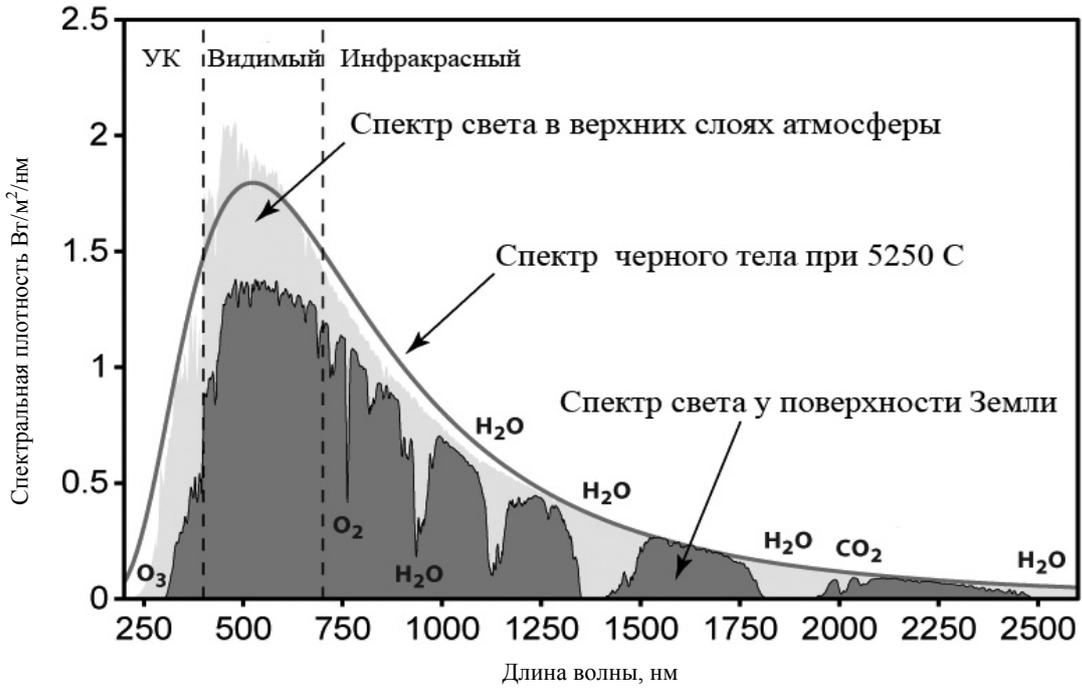


Рис. 3.7. Спектр Солнца в верхних слоях атмосферы и у поверхности Земли

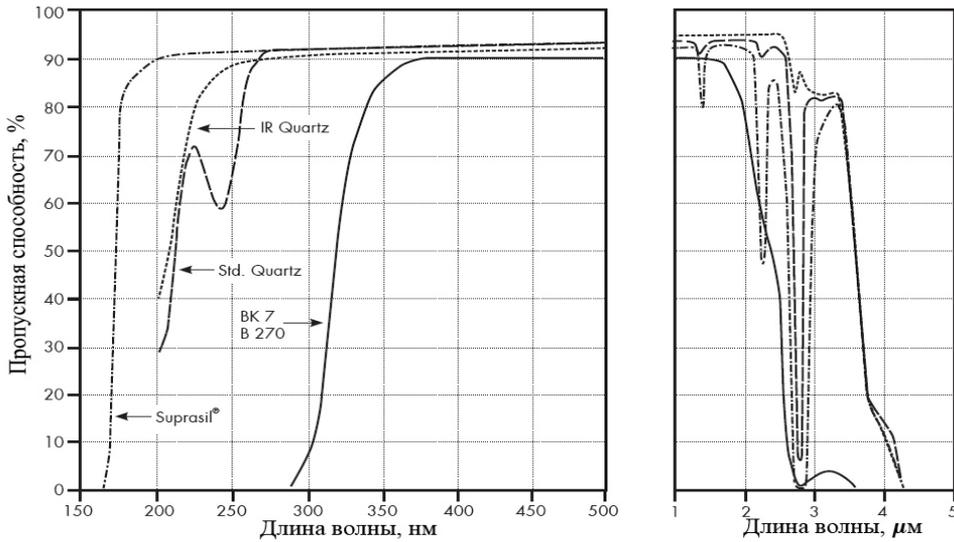


Рис. 3.8. Пропускная способность собирающей линзы

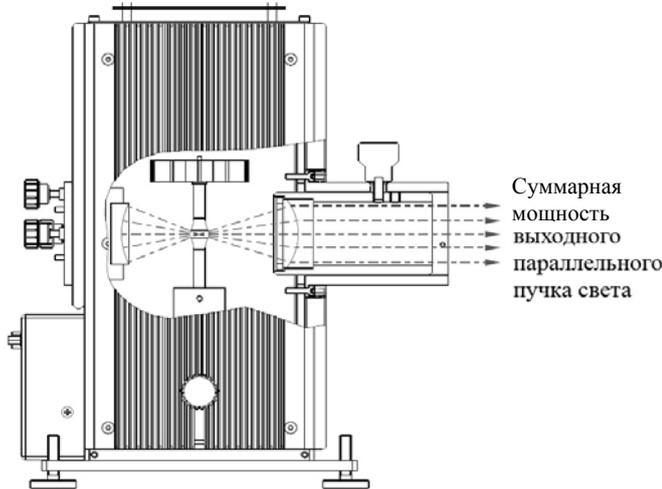


Рис. 3.9. Получение параллельного пучка света

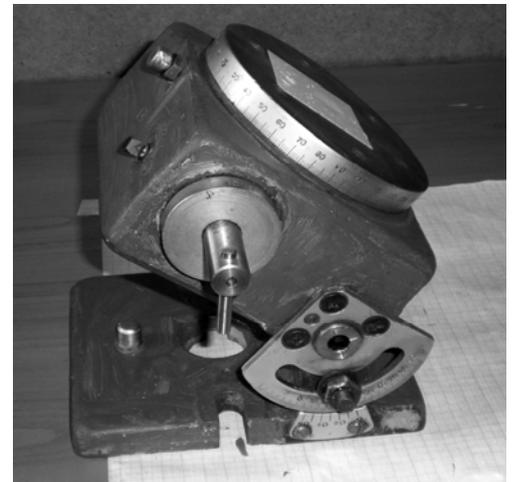


Рис. 3.10. Поворотный стол

• **Поворотный стол** (рис. 3.10) – это механическое устройство, позволяющее задать требуемое положение предмета с помощью двух поворотов. Датчик помещается в центре диска. Один поворот обеспечивает вращение на угол  $\varphi^*$  относительно центра диска с точностью  $0.025^\circ$ , другой поворот задает наклон плоскости диска на угол  $\delta^*$  с точностью  $1^\circ$ .

• **Блок питания датчика** – задает необходимое напряжение для работы датчика  $U = 5V$ .

**Персональный компьютер** – считывает и обрабатывает поступающие с датчика данные.

Схема работы стенда следующая. На диск поворотного стола помещается солнечный датчик, включается имитатор Солнца, коллиматор устанавливается таким образом, чтобы расхождение пучка на расстоянии 3 метров составляло не более 3 мм (диаметр пучка составляет 3.5 см), датчик подключается к ПК, на ПК запускается программа, считывающая измерения с датчика, с помощью поворотного стола задается некоторое положение датчику  $\delta^*$ ,  $\varphi^*$ , а на выходе датчика имеем  $P_{i\alpha}$ ,  $P_{i\beta}$ . Таким образом произведя серию измерений, получаем набор соответствующих друг другу чисел  $\delta^*$ ,  $\varphi^*$ ,  $P_{i\alpha}$ ,  $P_{i\beta}$ .

### 3.3.2. Расчет мощности излучения

Убедимся в том, что с помощью представленного имитатора солнечного излучения можно получить параллельный пучок, суммарная интенсивность которого равна интенсивности Солнца в верхних слоях атмосферы. Солнечная постоянная – это суммарный поток солнечного излучения, проходящий за единицу времени через единичную площадку, ориентированную перпендикулярно потоку, на расстоянии одной астрономической единицы от Солнца вне земной атмосферы – равна  $1367 \text{ Вт/м}^2$ . Для имитации солнечного излучения необходимо получить параллельный пучок света с плотностью, равной солнечной постоянной. Вычислим сначала суммарную мощность выходного солнечного потока. Для этого воспользуемся графиком спектральной плотности ксеноновой лампы (рис. 3.6). Производитель имитатора солнечного излучения утверждает, что им был экспериментально получен некоторый множитель, с помощью которого можно примерно получить мощность, приходящуюся на единицу длины волны выходящего из имитатора излучения [4]. Этот коэффициент зависит от типа корпуса имитатора, размера и типа собирающей линзы. Для рассматриваемого имитатора коэффициент  $k = 0.065 \text{ м}^2$ . Оценим приблизительно мощность выходного потока следующим образом: в диапазоне от 200 до 400 нм возьмем среднее значение  $5 \text{ мВт/м}^2/\text{нм}$ , для 400 – 800 нм возьмем  $12 \text{ мВт/м}^2/\text{нм}$ , для 800 – 1000 нм –  $15 \text{ мВт/м}^2/\text{нм}$ , 1000 – 1600 нм –  $7 \text{ мВт/м}^2/\text{нм}$ , 1600 – 2400 нм –  $3 \text{ мВт/м}^2/\text{нм}$ . Тогда суммарная мощность  $W$  будет равна сумме произведений величин спек-

тральной мощности  $w_i$  на соответствующий диапазон длин волн  $d_i$ , умноженной на коэффициент  $k$ , или

$$W = \left( \sum w_i d_i \right) k.$$

Согласно выбранным приближениям  $W \approx 910 \text{ мВт}$ . Однако заметим, что, благодаря отражателю внутри имитатора солнечного излучения, к выходному пучку добавляется до 50% энергии [5], то есть реальная энергия равна  $W \approx 910 \text{ мВт} \cdot 1,5 = 1365 \text{ мВт}$ .

Далее рассчитаем площадь, на которую приходится излучение рассматриваемой мощности. Диаметр собирающей линзы, а следовательно, и диаметр параллельного пучка  $d = 3,5 \text{ см}$ , значит, площадь  $S = \pi d^2 / 4 = 9,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ .

Теперь рассчитаем плотность светового потока как  $I = \frac{W}{S} = 1400 \text{ Вт/м}^2$ . В пределах погрешностей и допущений полученная плотность потока равна солнечной постоянной.

### 3.3.3. Погрешности

Обратим внимание на особенности установки.

Во-первых, хотя на выходе имитатора Солнца имеем параллельный пучок света, его направление сложно измерить даже с точностью  $1^\circ$ . Кроме того, из-за конечного размера источника света ( $< 1 \text{ мм}$ ) и его вполне определенной структуры (рис. 3.11) невозможно достичь параллельности всего пучка света, так как внутри основного пучка присутствуют паразитные лучи слабой интенсивности, имеющие отклонение порядка нескольких градусов. Это приводит к тому, что с помощью поворотного стола сложно задать с хорошей точностью вектор направления на Солнце в системе координат, связанной с датчиком. Во-вторых,

задание наклона плоскости диска поворотного стола возможно с точностью только  $1^\circ$ , что вносит свои сложности в задачу определения направления на Солнце с заявленной производителем точностью датчика  $0,1^\circ$ . Однако в процессе экспериментов ошибка знания реального направления на Солнце будет иметь характер постоянного смещения. Поэтому запишем для наклона и поворота

$$\delta^* = \delta + \delta_{\text{off}}, \quad \varphi^* = \varphi + \varphi_{\text{off}},$$

где будем считать, что  $\delta^*$ ,  $\varphi^*$  – это углы, задающие реальное направление на Солнце,  $\delta$ ,  $\varphi$  – это задаваемые углы на поворотном столе, а  $\delta_{\text{off}}$ ,  $\varphi_{\text{off}}$  – это неизвестные, но постоянные смещения.

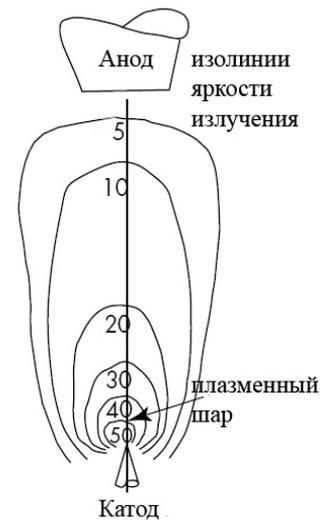


Рис. 3.11. Структура источника света

### 3.4. Методика калибровки

Как следует из модели измерения датчика Солнца (3.3) и (3.4) для каждого датчика необходимо найти 6 калибровочных характеристик, а именно  $p_{0\alpha}$ ,  $p_{0\beta}$ ,  $k_\alpha$ ,  $k_\beta$ ,  $\alpha_{off}$ ,  $\beta_{off}$ . Получим из этих формул значения для углов  $\alpha_i$  и  $\beta_i$  при известных  $p_{i\alpha}$  и  $p_{i\beta}$ :

$$\alpha_i = \arctan\left(\frac{p_{i\alpha} - p_{0\alpha} \cos(\beta_i)}{k_\alpha}\right) + \alpha_{off},$$

$$\beta_i = \arctan\left(\frac{p_{i\beta} - p_{0\beta} \cos(\alpha_i)}{k_\beta}\right) + \beta_{off}.$$

Зная углы поворотного стола  $\delta^*$  и  $\varphi^*$ , можно получить задаваемые значения для углов  $\alpha^*$  и  $\beta^*$  по следующим формулам, которые легко получить из рис. 3.2:

$$\alpha^* = \arctan(\cos(\varphi^*) \tan(\delta^*)), \quad (3.5)$$

$$\beta^* = \arctan(\sin(\varphi^*) \tan(\delta^*)). \quad (3.6)$$

Запишем функционал для набора значений углов поворота плоскости  $\varphi_i^*$  при заданном наклоне  $\delta^*$

$$\Phi = \sum_i (\alpha_i^* - \alpha_i)^2 + \sum_i (\beta_i^* - \beta_i)^2,$$

где  $\alpha_i$  и  $\beta_i$  – углы, полученные по формулам (3.1) – (3.4) с помощью выходных значений датчика  $p_{i\alpha}$  и  $p_{i\beta}$ , разница  $\varphi_i - \varphi_{i-1} = 9^\circ$  с точностью  $\delta\varphi \approx 0.02^\circ$ . Полученный функционал зависит от восьми параметров. Запишем вектор параметров

$$\mathbf{x} = [\alpha_{off} \quad \beta_{off} \quad p_{0\alpha} \quad p_{0\beta} \quad k_\alpha \quad k_\beta \quad \varphi_{off} \quad \delta_{off}]^T,$$

тогда  $\Phi = \Phi(\mathbf{x})$ .

Найдем минимум функционала  $\Phi$ . Заметим, что, так как углы  $\delta$ ,  $\varphi$  и  $\alpha$ ,  $\beta$  связаны между собой соотношениями (3.5) и (3.6), то с помощью имеющейся установки найти все четыре значения  $\alpha_{off}$ ,  $\beta_{off}$ ,  $\varphi_{off}$ ,  $\delta_{off}$  одновременно не удастся. Однако известно, что  $\alpha_{off}$ ,  $\beta_{off}$  имеют значения, не превышающие  $0.5^\circ$ , а значения  $\varphi_{off}$ ,  $\delta_{off}$  известны достаточно плохо и могут составлять несколько градусов. Поэтому найдем сначала с помощью метода наименьших квадратов грубые  $\varphi_{off}$ ,  $\delta_{off}$ , задав в качестве первого приближения остальной части вектора  $\mathbf{x}$  значения калибровочных коэффициентов, предоставляемых производителем датчика. Для этого необходимо решить нелинейную систему уравнений следующего вида:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x_7} = 0, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial x_8} = 0.$$

Это система решается итерационным методом Ньютона по формуле

$$\tilde{\mathbf{x}}_{i+1} = \tilde{\mathbf{x}}_i - F(\tilde{\mathbf{x}}_i) \mathbf{f}(\tilde{\mathbf{x}}_i), \quad (3.7)$$

где  $\tilde{\mathbf{x}} = [\varphi_{off} \quad \delta_{off}]^T$ ,  $\mathbf{f} = \left[ \frac{\partial \Phi}{\partial \varphi_{off}} \quad \frac{\partial \Phi}{\partial \delta_{off}} \right]^T$ ,  $F = \left[ \frac{\partial \mathbf{f}_i}{\partial \tilde{\mathbf{x}}_j} \right]$  – якобиан системы. Приближения заканчиваются, когда  $|\tilde{\mathbf{x}}_{i+1} - \tilde{\mathbf{x}}_i| < \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  – некоторая заданная величина.

После того как получены значения  $\varphi_{off}, \delta_{off}$ , аналогично по формуле (3.7) решается система уравнений

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x_i} = 0, \quad i = 1 \dots 6.$$

Таким образом получаем с помощью метода наименьших квадратов значение всего вектора калибровочных чисел.

### 3.5. Результаты экспериментов

Эксперименты проводятся следующим образом. На поворотный стол устанавливается датчик Солнца так, чтобы собственная ось датчика  $Ox$  была направлена на  $0^\circ$  шкалы поворота плоскости. Датчик Солнца плотно прикрепляется к плоскости поворотного стола с помощью матерчатой двусторонней липкой ленты, чтобы плоскость стола и плоскость корпуса датчика были практически параллельны. Плоскость стола наклоняется. Далее включается имитатор Солнца, с помощью блока питания устанавливается рабочая мощность 150 Вт для ксеноновой лампы. На солнечный датчик подается питание 5В, кабель передачи данных подключается к компьютеру, на котором установлена программа, считывающая поступающую с датчика информацию (это значения  $p_{i\alpha}$  и  $p_{i\beta}$ ). После запуска программы с шагом в  $9^\circ$  производится поворот плоскости поворотного стола. Такой шаг обусловлен особенностью движущего рычага поворотного механизма, один полный оборот рычага равен  $9^\circ$  поворота плоскости. Так как программа считывает данные с частотой 1Гц, то после каждого поворота плоскости производится остановка на несколько секунд для того, чтобы во время обработки полученных данных соотнести выходные значения датчика и задаваемые значения поворота плоскости. Таким образом, производится один полный оборот плоскости.

Далее полученный набор данных с датчика считывается обрабатывающей программой и определяются значения, соответствующие задаваемому повороту. На рис. 3.12 изображен пример выходных значений с датчика, звездочками изображены значения, соответствующие заданному повороту. Таким образом опре-

деляются 41 набор (от  $0^\circ$  до  $360^\circ$  с шагом  $9^\circ$ ) соответствующих друг другу значений  $\varphi_i$ ,  $p_{i\alpha}$  и  $p_{i\beta}$ , которые далее используются в методе наименьших квадратов, описанном в разделе 5 настоящей работы.

В результате работы метода наименьших квадратов имеем набор калибровочных характеристик датчика. На рис. 3.13 изображен пример соответствия задаваемых значений  $\alpha^*$ ,  $\beta^*$  и получаемых по формулам (3.3) и (3.4) значений  $\alpha$ ,  $\beta$  после работы метода наименьших квадратов. На рис. 3.14 изображены графики отклонений задаваемых значений  $\alpha^*$ ,  $\beta^*$  от получаемых. Разброс получаемых и задаваемых значений обуславливает среднеквадратичную ошибку, которая вызвана неидеальностью эксперимента и неточностью модели измерения.

В табл. 3.1 приведены значения полученных калибровочных характеристик,

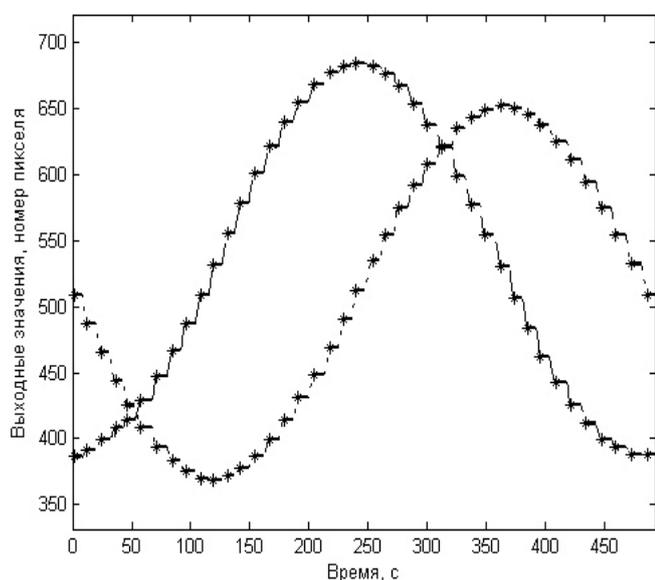


Рис. 3.12. Выходные значения датчика

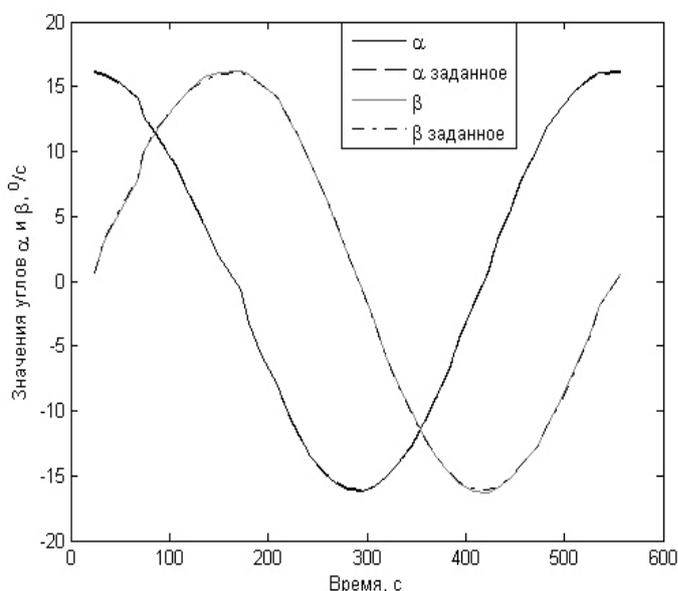


Рис. 3.13. Результат работы МНК

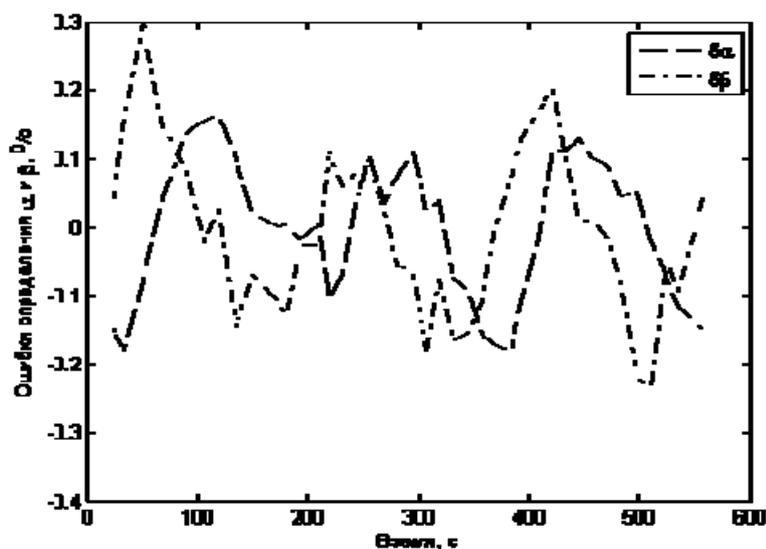


Рис. 3.14. Остаточные невязки

а также значения  $\varphi_{off}, \delta_{off}$  для каждого эксперимента. Для сравнения в табл. 3.2 приведены значения калибровочных характеристик, предоставленные производителем датчиков [4].

Табл.3.1. Полученные калибровочные характеристики

Датчик	$\alpha_{off}, ^\circ$	$\beta_{off}, ^\circ$	$p_{0\alpha}$	$p_{0\beta}$	$k_\alpha$	$k_\beta$	$\delta_{off}, ^\circ$	$\varphi_{off}, ^\circ$	$\sigma, ^\circ$
0209	0,40	0,04	515,30	499,40	-448,30	-447,70	-2,89	2,32	0,11
0309	0,66	0,23	530,42	509,24	-476,38	-459,10	-0,87	0,14	0,2
0409	0,08	-0,02	496,83	503,56	-478,43	-460,21	-1,45	1,31	0,19
0609	0,70	-0,24	504,22	494,17	-473,54	-476,48	-1,12	-0,72	0,2
0709	0,02	0,60	512,17	492,73	-444,21	-439,44	-1,00	-2,78	0,21
0809	-0,28	-0,16	535,82	511,67	-446,68	-422,67	-0,79	0,62	0,25

Табл.3.2. Калибровочные характеристики по данным производителя

Датчик	$\alpha_{off}, ^\circ$	$\beta_{off}, ^\circ$	$p_{0\alpha}$	$p_{0\beta}$	$k_\alpha$	$k_\beta$
0209	0,40	0,04	513,1	500,5	-448,5	-447
0309	-0,66	0,22	528,7	506,5	-473,2	-461,9
0409	0,08	-0,02	485,1	503,4	-468,1	-470,9
0609	0,70	-0,24	503,7	488	-462,7	-473,1
0709	0,02	0,60	511	491,3	-441,9	-441,3
0809	-0,28	-0,16	534	511,2	-444	-424,3

### 3.6. Определение поля зрения датчика

Важной характеристикой исследуемого датчика Солнца является его поле зрения – область отклонения вектора направления на Солнце от перпендикуляра к ПЗС-матрице. Производитель утверждает, что поле зрения этого датчика представляет собой конус с углом  $45^\circ$ . При значении направления на Солнце  $45^\circ$  солнечный луч, проходящий через светофильтр и узкое отверстие датчика, будет падать на пиксели ПЗС матрицы, примерно соответствующие вписанной окружности в квадрат матрицы (рис. 3.15). Однако датчик способен определять направление на Солнце еще и в случае падения солнечного луча на области вне вписанной окружности.

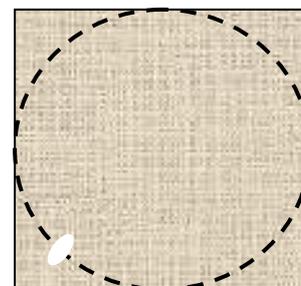


Рис. 3.15. ПЗС-матрица и вписанная окружность

Поле зрения может зависеть от величины экспозиции датчика – времени, за которое датчик накапливает энергию на ПЗС-элементах. При прохождении солнечного луча через светофильтр часть его энергии теряется. Если у падающего луча энергия ниже определенного порога, то датчик идентифицирует такое освещение как паразитное (например, альbedo Земли или переотражение света от

какой-нибудь части аппарата). Однако при больших углах падения солнечный луч проходит большее расстояние по светофильтру, а значит, теряет больше энергии, и есть вероятность того, что такой луч будет идентифицирован как паразитный. Чтобы избежать этого, нужно увеличить время экспозиции датчика – ослабленный луч будет дольше светить на ПЗС-элементы, которые выработают необходимое количество энергии, превышающее порог. Но при увеличении времени экспозиции есть опасность того, что датчик начнет определять направление на паразитное излучение.

Эксперименты по определению поля зрения датчика проводятся следующим образом. На поворотный стол помещается солнечный датчик, включается имитатор солнечного излучения, на компьютере запускается программа, считывающая данные с датчика. Задается некоторый угол наклона поворотного стола, задается время экспозиции датчика. Затем плоскость поворотного стола медленно поворачивается на один оборот. Такие эксперименты проводятся при различных углах наклона датчика и различных временах экспозиции. Далее полученные данные обрабатываются, строятся графики поля зрения.

На рис.3.16-3.17 изображены примеры результатов экспериментов для датчиков Солнца. Знаком \* обозначены точки, получаемые при времени экспозиции 30мс, знаком  $\circ$  – при 90мс,  $\diamond$  – при 165мс. Как видно из графиков, датчик 0209 имеет при времени экспозиции 30мс поле зрения конус в  $45^\circ$ , а в краях матрицы – до  $55^\circ$  при времени экспозиции 90мс. Но для датчика 0609 при экспозиции 30мс поле зрения представляет собой конус  $35^\circ$ , и только для 90мс поле зрения представляет собой конус в  $45^\circ$ . Это можно объяснить наличием в датчике 0609 более плотного светофильтра.

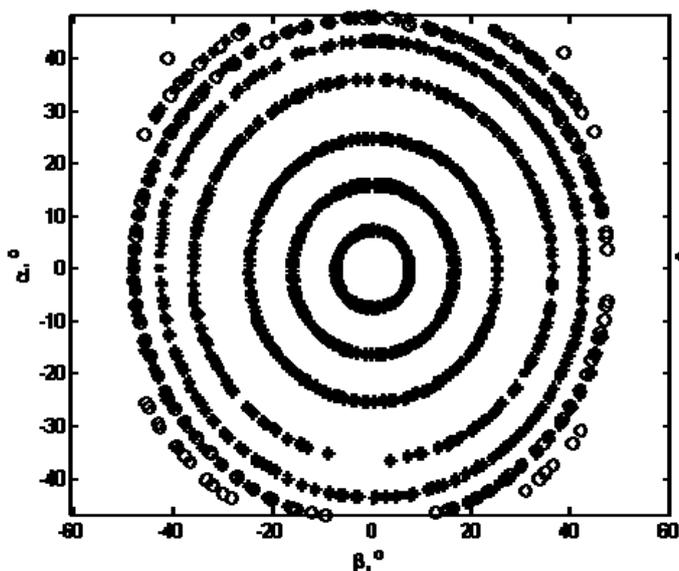


Рис. 3.16. Поле зрения датчика 0209

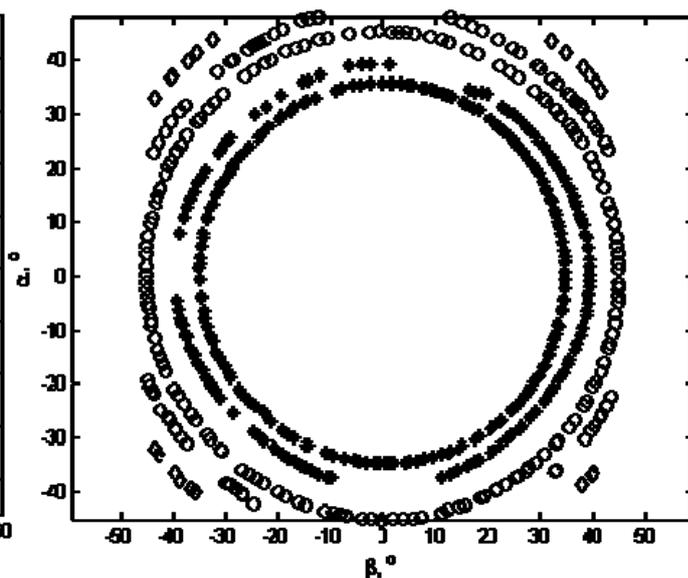


Рис. 3.17. Поле зрения датчика 0709

## 4. Магнитометр

### 4.1. Математическая модель измерений магнетометра

Магнитометр состоит из трех чувствительных элементов, которые расположены по конструкционным осям с небольшой ошибкой по углу (по документации эта ошибка составляет около  $1^\circ$ ). Конструкционные оси параллельны ребрам корпуса магнитометра. Ось каждого из чувствительных элементов в системе координат, связанной с магнитометром, можно задать направляющими косинусами:

$$P_1 = (\cos \alpha_1; \cos \beta_1; \cos \gamma_1) = (\sqrt{1 - p_{12}^2 - p_{13}^2}; p_{12}; p_{13}),$$

$$P_2 = (\cos \alpha_2; \cos \beta_2; \cos \gamma_2) = (p_{21}; \sqrt{1 - p_{21}^2 - p_{23}^2}; p_{23}),$$

$$P_3 = (\cos \alpha_3; \cos \beta_3; \cos \gamma_3) = (p_{31}; p_{32}; \sqrt{1 - p_{31}^2 - p_{32}^2}).$$

Модель измерений магнитометра может быть записана в виде:

$$M_i = KP_i B_i + m. \quad (4.1)$$

Здесь  $M_i$  – показания магнитометра (измерение);  $B_i$  – внешнее поле в связанной системе координат;  $K = \text{diag}(k_1, k_2, k_3)$  – диагональная матрица, состоящая из коэффициентов усиления каждого датчика;  $P$  – матрица, строками которой являются векторы  $P_1, P_2, P_3$ ;  $m$  – смещение нуля.

В случае постоянного внешнего поля, но изменяющейся ориентации магнитометра формулу (1) можно переписать в виде:

$$M_i = KPA_i B_0 + m, \quad (4.2)$$

где  $B_0$  – внешнее поле в некоторой инерциальной системе координат,  $A_i$  – матрица поворота из инерциальной системы координат в связанную с магнитометром систему координат.

### 4.2. Методика нахождения калибровочных параметров

Рассмотрим случай постоянного по величине и направлению вектора внешнего магнитного поля и примем, что ни его величина, ни направление не известны. Построим функционал для определения элементов матрицы  $P$  и вектора  $m$ .

Выразим из (4.2) внешнее поле  $B_0$  для некоторого начального положения и для  $i$ -го положения:

$$B_0 = P^{-1}K^{-1}(M_0 - m),$$

$$B_0 = A_i^T P^{-1}K^{-1}(M_i - m).$$

Тогда в качестве функционала можно взять сумму

$$\Phi = \sum_{i=2}^n (P^{-1}K^{-1}(M_0 - m) - A_i^T P^{-1}K^{-1}(M_i - m))^T (P^{-1}K^{-1}(M_0 - m) - A_i^T P^{-1}K^{-1}(M_i - m)),$$

где  $n$  – это число проведенных замеров магнитной индукции при различных положениях  $A_i$  магнитометра относительно инерциальной системы координат.

Далее можно использовать этот функционал при нахождении методом наименьших квадратов неизвестных параметров магнитометра, но возникает сложность при решении задачи минимизации численным методом из-за ее высокой чувствительности к выбору начального приближения, а решить ее аналитически не представляется возможным, так как рассматриваемое выражение является линейным по определяемым параметрам. Для того чтобы избежать этого, перепишем функционал в виде

$$\Phi = \frac{1}{k_1} \sum_{i=2}^n (P^{-1} \tilde{K}^{-1} (M_0 - \mathbf{m}) - A_i^T P^{-1} \tilde{K}^{-1} (M_i - \mathbf{m}))^T (P^{-1} \tilde{K}^{-1} (M_0 - \mathbf{m}) - A_i^T P^{-1} \tilde{K}^{-1} (M_i - \mathbf{m})),$$

где  $\tilde{K} = \text{diag}(1, \frac{k_2}{k_1}, \frac{k_3}{k_1})$ . Обозначим

$$\tilde{k}_2 = \frac{k_2}{k_1}, \quad \tilde{k}_3 = \frac{k_3}{k_1}.$$

Тогда можно записать  $\Phi = \Phi(P, \mathbf{m}, \tilde{k}_2, \tilde{k}_3)$ . Экстремумы функционала от выбора  $k_1$  не зависят, поэтому найти  $k_1$  нельзя с помощью такой методики. Это связано с тем, что точная информация о внешнем магнитном поле отсутствует и фактически производятся лишь относительные измерения. Таким образом определяется 11 параметров:

- 6 параметров  $p_{12}, p_{13}, p_{21}, p_{23}, p_{31}, p_{32}$ ;
- 3 компоненты вектора смещения нуля  $\mathbf{m}$ ;
- 2 относительных коэффициента  $\tilde{k}_2$  и  $\tilde{k}_3$ .

### 4.3. Схема установки

Опишем схему установки для проведения экспериментов по определению калибровочных параметров магнитометра.

Для проведения экспериментов выбирается место, удаленное от массивных металлических элементов. Это необходимо для исключения влияния дополнительных источников магнитного поля на величину измеряемого магнитного поля Земли. Далее выбирается произвольно ориентированная плоскость (стол), на котором предполагается провести эксперименты. Со столом связывается неподвижная правая ортогональная система координат OXYZ, которую назовем инерциальной, именно относительно этой системы координат будет поворачиваться магнитометр и связанная с ним система координат. Плоскость OXY находится в плоскости стола (см. рис. 4.1). Точка O выбирается произвольно на этой плоскости.

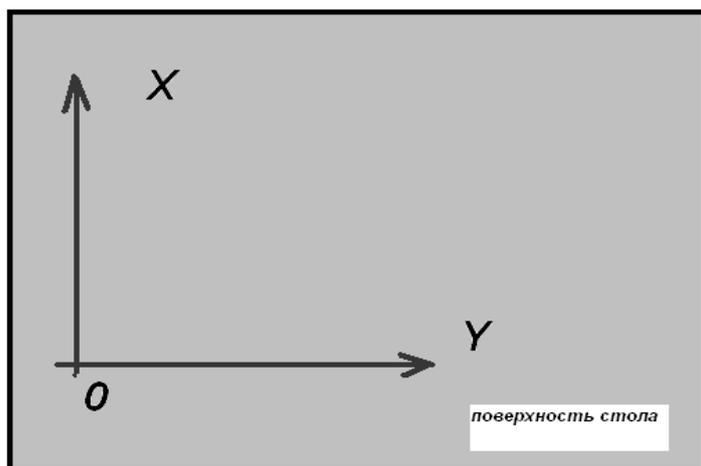


Рис.4.1. Система координат стола

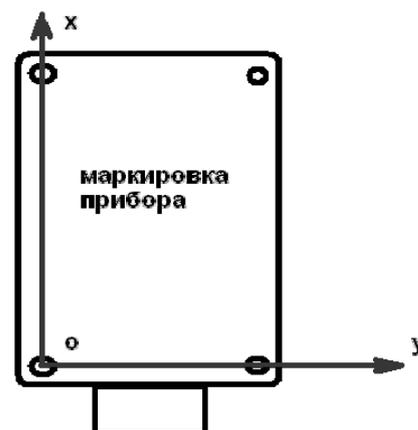


Рис.4.2. Система координат магнитометра

Связанная система координат  $oxyz$  строится так, что оси совпадают с измерительными осями приборов, которые обозначены на корпусах магнитометров. Точка  $o$  находится в центре одного из крепежных отверстий прибора (рис. 4.2).

Магнитометр помещается на плоскость стола так, чтобы оси связанной системы координат были параллельны осям инерциальной системы координат. Магнитометр подключается посредством разъема RS232 к компьютеру, на магнитометр подается питание. Компьютер, источник питания, а также сам экспериментатор находятся во время проведения замеров на расстоянии не менее 2 метров от прибора. Далее проводится эксперимент.

#### 4.4. Методика калибровки

##### 4.4.1. Замер фона

Вначале с помощью магнитометра производится замер магнитного фона, для того чтобы убедиться, что внешнее поле однородно и постоянно. Измерения фона проводится как перед началом серии измерений, так и время от времени между сериями, чтобы убедиться, что фоновое магнитное поле постоянно на длительных интервалах времени. Фон измеряется в процессе проведения эксперимента другими, не участвующими в эксперименте магнитометрами. Условие постоянства магнитного поля критично для успешного проведения экспериментов.

Замер фона производится следующим образом:

- магнитометр размещается на столе так, чтобы измерительные оси совпали с осями лабораторной системы координат. Совмещение осей выполняется с точностью в несколько миллиметров;

- оператор возвращается к компьютеру и запускает программу сбора измерений на 15..40 секунд. Частота съема измерений – 1 раз в секунду.

#### 4.4.2. Калибровочные измерения

После замера фона выполняются замеры магнитного поля с использованием калибруемого магнитометра по следующей схеме:

- прибор поворачивается оператором на  $90^\circ$  вокруг одной из измерительных осей и устанавливается так, чтобы измерительные оси были параллельны осям лабораторной системы координат;
- снимаются измерения на протяжении 20..40 сек;
- после окончания сбора полученный файл с измерениями записывается в соответствующую директорию; имя директории указывает на углы поворота приборной системы координат относительно лабораторной СК в формате: нутация - собственное вращение - прецессия;
- магнитометр очередной раз поворачивается оператором на  $90^\circ$ .

#### 4.5. Оценка точности установки приборной СК относительно лабораторной СК

Оценку точности можно провести следующим образом. Считаем, что фоновое магнитное поле постоянно. Берем один и тот же прибор и несколько раз его выравниваем в лабораторной СК, каждый раз снимая его измерения. Тогда разброс средних значений измерений проекций по каждой из осей, полученных при каждой установке, и определяет точность установки прибора. При этом полагаем, что погрешность установки имеет нормальное распределение с центром в нуле.

#### 4.6. Основные полученные результаты

В результате обработки экспериментальных данных методом наименьших квадратов были получены результаты, приведенные в табл. 4.1.

Табл. 4.1. Калибровочные характеристики магнитометра

$P_{12}$	$P_{13}$	$P_{21}$	$P_{23}$	$P_{31}$	$P_{32}$	$m_1,$ нТл	$m_2,$ нТл	$m_3,$ нТл	$\tilde{k}_2$	$\tilde{k}_3$
0.029	-0.002	-0.025	0.011	-0.016	0.024	-610.0	-61.1	17.9	1.013	0.098

## 5. Заключение

Разработана методика калибровки датчиков для определения ориентации малого космического аппарата (датчиков угловой скорости, солнечных датчиков на ПЗС-матрице и трехосного магнитометра). На ее основе выполнена калибровка датчиков определения ориентации спутника «Чибис-М». Датчики предоставлены ООО ИТЦ «СканЭкс».

Работа выполнена по заказу ООО ИТЦ «СканЭкс» (контракт № 9/0506-СП) при поддержке грантов РФФИ №№ 09-01-00431, 07-01-92001.

## 6. Список литературы

1. [http://www.analog.com/static/imported-files/application\\_notes/AN-1042.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/application_notes/AN-1042.pdf)
2. *Jussi Parviainen, Manuel A. V'azquez L'opez, Olli Pekkalin, Jani Hautamaki, Jussi Collin and Pavel Davidson*. Using Doppler Radar and MEMS Gyro to Augment DGPS for Land Vehicle Navigation. 3rd IEEE Multi-conference on Systems and Control, July 8-10, 2009, Saint Petersburg, Russia, pp.1690-1695.
3. Т.Ю. Дроздова, А.В. Никитин. Методика и результаты обработки программно-алгоритмического обеспечения оптических солнечных датчиков. Сборник трудов Всероссийской научно-технической конференции "Современные проблемы определения ориентации и навигации космических аппаратов", г. Таруса 22-25 сентября 2008, серия: Механика, управление и информатика, М.: ИКИ РАН, 2009, С.409-420/
4. [Sun\\_sensor\\_DSS1\\_datasheet.pdf](#)
5. [http://www.lotoriel.com/site/site\\_down/lq\\_lampspectraandirradiance\\_eu01.pdf](http://www.lotoriel.com/site/site_down/lq_lampspectraandirradiance_eu01.pdf)
6. [http://www.lotoriel.com/site/site\\_down/lq\\_estimatingsourceoutput\\_eu01.pdf](http://www.lotoriel.com/site/site_down/lq_estimatingsourceoutput_eu01.pdf)
7. *P. Graven and T. Kenny*. Laboratory (and on-orbit) magnetometer calibration without coil facilities or orientation information, Proceedings of the 10th Annual AIAA/USU Small Satellite Conference, September 1996.

## Содержание

1.	Введение .....	3
1.1.	Характеристики датчика угловой скорости .....	3
1.2.	Характеристики датчика Солнца .....	4
1.3.	Характеристики магнитометра .....	4
2.	Датчик угловой скорости .....	5
2.1.	Методика калибровки .....	5
2.1.1.	Зависимость смещения ноля от температуры .....	6
2.1.2.	Определение коэффициента пропорциональности .....	6
2.1.3.	Зависимость шума измерений от числа усредняемых значений.....	7
2.2.	Результаты испытаний .....	7
2.2.1.	Смещение ноля от температуры .....	7
2.2.2.	Определение коэффициента пропорциональности .....	12
2.2.3.	Зависимость шума измерений от числа усредняемых значений.....	13
3.	Солнечный датчик.....	13
3.1.	Принцип работы датчика.....	13
3.2.	Модель измерений.....	14
3.3.	Стенд.....	15
3.3.1.	Состав стенда.....	15
3.3.2.	Расчет мощности излучения .....	18
3.3.3.	Погрешности.....	19
3.4.	Методика калибровки .....	20
3.5.	Результаты экспериментов .....	21
3.6.	Определение поля зрения датчика.....	23
4.	Магнитометр.....	25
4.1.	Математическая модель измерений магнетометра.....	25
4.2.	Методика нахождения калибровочных параметров.....	25
4.3.	Схема установки.....	26
4.4.	Методика калибровки .....	27
4.4.1.	Замер фона .....	27
4.4.2.	Калибровочные измерения.....	28
4.5.	Оценка точности установки приборной СК относительно лабораторной СК.....	28
4.6.	Основные полученные результаты.....	28
5.	Заключение .....	29
6.	Список литературы .....	29