

Уменьшение погрешности наведения системы обзора космического пространства для мониторинга объектов техногенного происхождения

И.В. Знаменский¹, А.А. Тихомиров^{✉ 2}, А.Т. Тунгушпаев^{1*}

¹АО «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения»
111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, 53

²Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3

Поступила в редакцию 20.12.2023;
после доработки 14.02.2024;
принята к печати 16.05.2024

Для мониторинга объектов техногенного происхождения рассмотрены вопросы уменьшения погрешности наведения оптико-электронной системы (ОЭС) обзора космического пространства на объект. Эта погрешность возникает вследствие воздействия механических факторов на конструкцию опорно-поворотного устройства. Для уменьшения этих погрешностей применяются калибровка оптических датчиков ОЭС по звездам, математические методы обработки измерений, повышающие их точность, или интерполяционные методы для определения промежуточных значений между измеренными калибровочными точками. С помощью сплайн-аппроксимации найдены поправки к показаниям оптических датчиков азимутальной и угломерной оси. Полученные результаты могут использоваться в комплексах ОЭС, следящих за космическими объектами, и позволят повысить точность их наведения.

Ключевые слова: оптико-электронная система, опорно-поворотное устройство, сплайн-аппроксимация, оптический датчик, пиксел, функция рассеяния точки, погрешность наведения; optoelectronic system, rotary support device, spline approximation, optical sensor, pixel, point spread function, pointing error.

Введение

В оптико-электронных системах (ОЭС) для слежения за космическими объектами техногенного происхождения [1] широко используются математические методы обработки результатов измерений, повышающие их точность, такие как метод наименьших квадратов или интерполяционные методы для определения промежуточных значений между измеренными точками. Для метода наименьших квадратов необходимо подбирать аппроксимирующую функцию эмпирическим путем. От выбора функции зависит ошибка аппроксимации. В узловых точках аппроксимирующая функция отличается от измеренных значений. Задача интерполирования возникает, например, в том случае, когда известны результаты измерения некоторой физической величины в точках пространства x_k ($k = 0, 1, \dots, n$) и требуется определить ее значения в других точках. При этом измеренные точки известны с минимальной погрешностью. Полиномиальная аппроксимация

не обеспечивает непрерывность производных функции $y(x)$ и может давать значительные погрешности в промежутках между узлами. От этих недостатков свободна аппроксимация с помощью сплайн-функции [2]. В настоящей работе рассмотрена возможность использования сплайн-аппроксимации для нахождения поправок к показаниям оптического датчика при его калибровке по звездам [3].

При использовании безредукторного привода требуется абсолютная уравновешенность конструкции опорно-поворотного устройства (ОПУ) относительно осей наведения. Из-за неуравновешенности конструкции возникают ошибки наведения [4–7], которые можно компенсировать. Для уменьшения влияния механических воздействующих факторов на точность наведения необходимо обеспечение положения центра масс подвижной конструкции ОПУ относительно каждой оси наведения непосредственно на этой оси. При использовании многоканальных ОЭС это требование не всегда выполняется.

Погрешность измерения угла поворота ОПУ определяется: 1) собственной погрешностью датчика угла; 2) погрешностью, вносимой механической передачей, соединяющей вал датчика угла с конструктивным элементом ОПУ, формирующим ось

* Игорь Всеволодович Знаменский (06-21@nprk-spp.ru);
Александр Алексеевич Тихомиров (tikhomirov@imces.ru);
Альберт Толевжанович Тунгушпаев (dr.t-t-albert@yandex.ru).

наведения. При использовании оптических энкодеров типа RESM [8] собственной погрешностью оптических датчиков можно пренебречь. Основную погрешность вносит вал, на котором расположены оптические модули. Погрешность возникает как из-за скручивания вала, так и из-за его изгиба, а также неперпендикулярности осей наведения [4, 7]. Погрешность, возникающая при калибровке, связана с угловым размером пиксела и соотношением размера функции рассеяния точки относительно пиксела.

Математическая модель следящего электропривода оси ОПУ и синтез системы управления электропривода азимутальной оси подробно рассмотрены в работах [9, 10].

Получение зависимости ошибки измерения угла поворота ОПУ от угла наведения позволяет выполнить ее алгоритмическую компенсацию путем введения в систему управления поправок в сигнал штатного датчика угла [11–14].

Для формирования поправок датчиков углов предлагается использовать звездное небо. Положение каждой звезды на небесной сфере известно с высокой точностью ($0,001''$) согласно астрономическому каталогу [15]. Каталог Hipparcos содержит звезды с блеском до 9^m . Общее число звезд в каталоге около 100000.

На динамические характеристики электропривода, наводящего телескоп на цель, влияют характеристики ОПУ и в первую очередь его жесткость [7, 16].

Цель настоящей работы — нахождение поправок к показаниям оптических датчиков при калибровке ОЭС по звездам. Для определения промежуточных значений между калибровочными точками используется кубическая сплайн-аппроксимация, обеспечивающая минимальную погрешность.

1. Принципы построения системы слежения за космическими объектами

На рис. 1 представлена функциональная схема комплекса для обнаружения и измерения угловых координат космических объектов (КО). Комплекс представляет собой многоспектральную ОЭС. Для обнаружения и сопровождения КО, подсвеченных Солнцем, используются видимый, ближний и средний ИК-диапазоны, а для КО, находящихся в тени, — дальний ИК-диапазон. Комплекс включает в себя: ОПУ 1, на котором установлены объективы оптических каналов; высокомоментные двигатели осей: азимутальной 5a и угломестной 5b; оптические датчики углового положения осей: азимутальной 6a и угломестной 6b; электросиловой привод 8; систему точного времени 11; ЭВМ 12; и запоминающее устройство 4.

Кроме этого, в комплекс входят пять оптических каналов: узкополосный видеоканал 2, широкополосный 3, канал ближнего ИК-диапазона 7, канал среднего ИК-диапазона 9 и канал дальнего ИК-диапазона 10. Запоминающее устройство 4

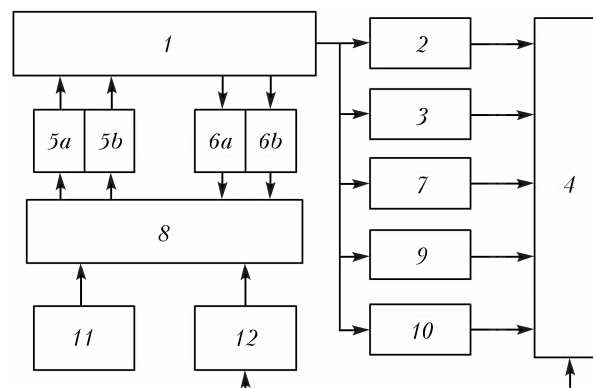


Рис. 1. Функциональная схема ОЭС обзора космического пространства

служит для хранения зарегистрированных кадров, там же фиксируется время, получаемое от системы точного времени 11. Днем и в сумерки используются ближний и средний ИК-диапазон. В ночное время используются каналы видеодиапазонов. Канал дальнего ИК-диапазона используется для КО, не подсвеченных Солнцем.

Управление наведением на КО осуществляется по команде от ЭВМ 12. Электросиловой привод 8 управляет ОПУ 1 с помощью высокомоментных двигателей 5a, 5b, установленных на ОПУ, и получает данные об угловом положении осей от оптических датчиков 6a, 6b, также установленных на осях устройства. В режиме автосопровождения формируется сигнал ошибки, по которому происходит непрерывная подстройка углов наведения на КО.

Высокая точность временной привязки наведения осуществляется с помощью ГЛОНАСС-приемника, на выходе которого формируется сетка синхроимпульсов для формирования кадров и работы системы наведения. Опорной шкалой времени для системы ГЛОНАСС является национальная координированная шкала времени России UTC(SU). Расхождение между шкалой системного времени ГЛОНАСС и UTC(SU) не должна превышать 1 мс. Начальные данные для звезд приводятся в звездных каталогах. Для полного определения положения в пространстве и времени необходимы шесть величин: прямое восхождение, склонение, параллакс, собственные движения по прямому восхождению и склонению и лучевая скорость. Каталог HIPPARCOS [15], представленный в 1997 г., содержит их значения для более 100000 звезд. Текущая эпоха, определенная международным соглашением J2000.0, которой соответствует 12:00 ТТ 01.01.2000 г., является новой стандартной эпохой равноденствия в системе 1976 г. Переход к другой эпохе осуществляется с помощью известных формул пересчета.

Рассматриваемая в настоящей работе ОЭС является развитием комплекса «Берет-М», созданного в АО НПК «Системы прецизионного приборостроения», который был продемонстрирован на Международной выставке «Армия-2015».

2. Определение поправок углового положения осей

Положение оси оптического канала наиболее точно определяется с помощью звездного каталога [15]. Используемые оптические датчики азимутальной и угломерной осей показывают истинное положение осей, которые пересчитываются в угловое положение объекта в картинной плоскости. Из-за изгиба и биения оси появляется погрешность, зависящая от углового положения азимутальной (A) и угломерной (U) осей. Для устранения этой погрешности проводится калибровка оптических датчиков по звездам, т.е. для фиксированного значения угла β по оси U снимается поле точек поправок положения оси A . Матрица фиксированных значений угла β угломерной оси имеет вид

$$\beta = (\beta_1 \beta_2 \beta_j \beta_k). \quad (1)$$

Таким образом, для всех фиксированных значений углов β_j оси U снимается поле точек поправок оси A для различных углов α_i .

Матрица фиксированных значений угла α азимутальной оси имеет вид

$$\alpha = \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_i \\ \alpha_n \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Матрица поправок показаний оптических датчиков оси A имеет вид

$$A_{kn} = \begin{pmatrix} \delta_{11}^a & \dots & \dots & \delta_{1n}^a \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \delta_{j1}^a & \dots & \dots & \delta_{ji}^a \\ \delta_{k1}^a & \dots & \dots & \delta_{kn}^a \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где δ_{kn}^a — поправка оптического датчика оси A ; j — индекс угломерной оси; i — индекс азимутальной оси; n — число экспериментальных точек по азимутальной оси; k — число экспериментальных точек по угломерной оси.

Матрица поправок показаний оптического датчика оси U представлена в виде

$$U_{nk} = \begin{pmatrix} \delta_{11}^u & \dots & \dots & \delta_{1k}^u \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \delta_{i1}^u & \dots & \dots & \delta_{ij}^u \\ \delta_{n_{k1}}^u & \dots & \dots & \delta_{nk}^u \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где δ_{nk}^u — поправка показаний оптического датчика оси U .

Для нахождения поправок в промежутках между измеренными точками применяется аппроксимация.

Подготовка массива исходных данных заключается в следующем. Используя звездный каталог [15], производят наведение осей ОЭС в точку небесной

сферы, где должна находиться искомая звезда. На звезду накладывается строб, при этом фиксируются показания оптических датчиков азимутальной и угломерной осей и положение звезды, рассчитанное по данным из каталога. Затем изображение звезды автоматически переводится в центр матрицы и записываются новые показания оптических датчиков. Вся процедура измерения одной звезды должна занимать не более 0,1 с, поэтому изменение координат звезды незначительно, т.е. не более 0,5 угл. с, при угловом размере пикселя 1–2 угл. с.

Так как показания оптических датчиков азимутальной и угломерной осей при расположении звезды в центре матрицы соответствуют угловым координатам измеряемой звезды, то разность углов между вышеуказанными показаниями оптического датчика каждой оси дает систематическую погрешность измерений ОЭС.

На рис. 2 представлен участок фоточувствительной матрицы с отмеченными положениями звезды до считывания поправки (сдвинутая в левую сторону точка) и после смещения ее в центр матрицы.

Поправка датчика азимутальной оси определяется в виде $\delta^a = \Delta X / f'$, где $\Delta X = (N_A - 1)d$, N_A — число пикселей между исходным и смещенным в центр положениями звезд, d — размер стороны пикселя, f' — заднее фокусное расстояние оптической системы.

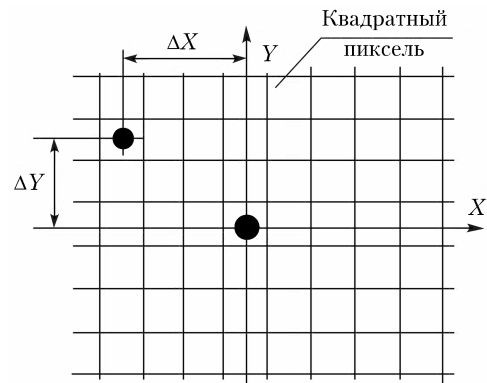


Рис. 2. Участок фоточувствительной матрицы с отображением двух положений зарегистрированной звезды: ΔX — смещение по азимуту, ΔY — смещение по углу моста

Аналогично определяется поправка датчика угломерной оси $\delta^u = \Delta Y / f'$, где $\Delta Y = (N_h - 1)d$; N_h — число пикселей между исходным и смещенным в центр положениями звезд.

3. Сплайн-аппроксимация

Полиномиальная аппроксимация не обеспечивает непрерывность производных функции $y(x)$ и может давать значительные погрешности в промежутках между узлами $y(x_i)$ и $y(x_{i+1})$ [2]. От этих недостатков свободна аппроксимация с помощью сплайн-функции. Сплайн — это специальный

многочлен, принимающий в узлах значения $y(x) = y_i = y(x_i)$ и обеспечивающий непрерывность в них производных. Обычно достаточно обеспечить непрерывность первой и второй производных. Поэтому используем сплайн-многочлен третьего порядка (кубический сплайн) [2, 17].

Для каждого отрезка $[x_i, x_{i+1}]$ кубическая сплайн-функция записывается в виде

$$f_i(x) = [m_i(x_{i+1} - x)^3 + m_{i+1}(x - x_i)^3] / (6h_i) + \\ + \left\{ \left[y_i - (m_i(h_i)^2 / 6) \right] (x_{i+1} - x) + \right. \\ \left. + \left[y_{i+1} - (m_{i+1}(h_i)^2 / 6) \right] (x - x_i) \right\} / h_i, \quad (5)$$

где $h_i = x_{i+1} - x_i$; $f_i(x) = y(x)$; $m_i = f''(x_i)$; $i = 1, 2, \dots, n$ (n — число узлов); f'' — вторая производная по x .

Если выполнить условие $f_i(x) = y_i$, то вышеуказанное выражение для кубических сплайнов приводит к системе линейных уравнений, из которых находятся m_i :

$$h_i m_i + 2(h_i + h_{i+1}) m_{i+1} + h_{i+1} m_{i+2} = \\ = 6[(y_{i+2} - y_{i+1}) / h_{i+1} - (y_{i+1} - y_i) / h_i]. \quad (6)$$

Однако эта система не полностью определяет все m_i . Для этого нужно задать дополнительные граничные условия в виде $m_1 = 0$, $m_n = 0$.

На основе вышеприведенных выражений разработана программа расчета сплайн-аппроксимации.

4. Компенсация погрешности опорно-поворотного устройства системы наведения

В соответствии с выражением (6) рассчитаны коэффициенты m_{nk}^a для оси A при постоянном значении угла β оси U [2, 17]:

$$m_{nk}^a = \begin{pmatrix} m_{11}^a & m_{12}^a & \dots & m_{1n}^a \\ m_{21}^a & m_{22}^a & \dots & m_{2n}^a \\ m_{j1}^a & \dots & \dots & m_{ji}^a \\ m_{k1}^a & \dots & \dots & m_{kn}^a \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Аналогично, в соответствии с (6), рассчитаны коэффициенты m_{ji}^u для оси U при постоянном значении угла α азимутальной оси [2, 17]:

$$m_{nk}^u = \begin{pmatrix} m_{11}^u & m_{12}^u & \dots & m_{1n}^u \\ m_{21}^u & m_{22}^u & \dots & m_{2n}^u \\ m_{j1}^u & \dots & \dots & m_{ji}^u \\ m_{k1}^u & \dots & \dots & m_{kn}^u \end{pmatrix} \quad (8)$$

Все коэффициенты m_{ji} вычисляются заранее, т.е. перед штатной работой, и используются в сплайн-функциях (5) [2, 17].

Пусть КО имеет угловые координаты β_v оси U и α_μ оси A . Для угла β_v оптического датчика оси U и для угла α_μ оптического датчика оси A нужно найти поправки. Данная процедура осуществляется следующим образом. Для каждой строки матрицы A_{kn} строится сплайн-функция и находится поправка для угла α_μ . В результате получаем матрицу поправок, элементы которой зависят от угла β_v . Таким образом, каждый элемент матрицы δ_μ является поправкой для датчика оси A при фиксированных значениях углов оси U в соответствии с выражением (1):

$$\delta_\mu = \begin{pmatrix} \delta_\mu^{(1)} \\ \delta_\mu^{(2)} \\ \dots \\ \delta_\mu^{(k)} \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Далее для угла β_v оптического датчика оси U находим поправку из матрицы (9). Для этого вычисляем коэффициенты m и строим сплайн-функцию. Затем вычисляем поправку δ_μ^a оптического датчика азимутальной оси при заданном угле β_v .

Аналогично азимутальной оси для каждой строки матрицы U_{nk} строится сплайн-функция и находится поправка для угла β_v :

$$\delta_v = \begin{pmatrix} \delta_v^{(1)} \\ \delta_v^{(2)} \\ \dots \\ \delta_v^{(k)} \end{pmatrix}. \quad (10)$$

В результате получаем матрицу поправок, элементы которой зависят от угла α .

Таким образом, каждый элемент матрицы δ_v является поправкой для датчика оси U при фиксированных значениях углов α оси A в соответствии с формулой (3).

Для угла α_μ оптического датчика оси A находим поправку из матрицы (10). Для этого вычисляем коэффициенты m и строим сплайн-функцию. Затем находим поправку δ_v^u оптического датчика угломерной оси при заданном угле азимутальной оси α_μ .

5. Экспериментальные значения поправок и их сплайн-аппроксимация

На рис. 3 представлена зависимость поправки δ от угла α оптического датчика оси A при угле $\beta = 85^\circ$ датчика оси U .

Для проведения калибровки оптических датчиков угол датчика оси U изменялся в диапазоне $(10 \div 88)^\circ$, а датчика оси A — в диапазоне от $+70$ до -70° . Шаг изменения углов использовался не постоянный — в пределах $(10 \div 20)^\circ$, что обеспечивало выбор наиболее ярких звезд видимого

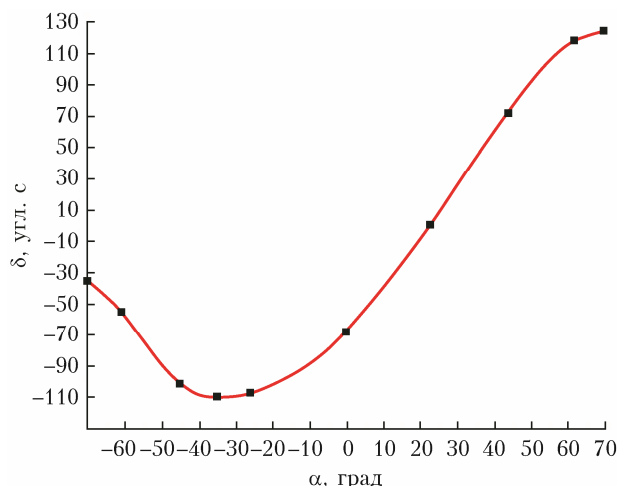


Рис. 3. Зависимость поправки δ от угла α оптического датчика оси A при угле $\beta = 85^\circ$ датчика оси U

диапазона из каталога [15]. На рис. 3 изображены калибровочные точки (узлы сплайн-функции) и их сплайн-аппроксимация.

Заключение

Разработан алгоритм компенсации погрешности оси визирования телескопа многоспектральной ОЭС по показаниям оптических датчиков, установленных на двусосном опорно-поворотном устройстве. На основе звездного каталога определено положение оси оптического канала и проведена калибровка оптических датчиков.

С помощью кубического сплайна найдены промежуточные значения между калибровочными точками, обеспечивающие минимальную погрешность.

Список литературы

1. Знаменский И.В., Тихомиров А.А. Система обзора космического пространства для мониторинга объектов техногенного происхождения // Оптика атмосф. и океана. 2022. Т. 35, № 12. С. 1051–1057. DOI: 10.15372/AOO20221213.
2. Волков Е.А. Численные методы: Учеб. пособие для вузов. 2-е изд., испр. М.: Наука, 1987. 248 с.
3. Федосеев В.И., Колосов М.П. Оптико-электронные приборы ориентации и навигации космических аппаратов: учебное пособие. М.: Логос, 2007. 248 с.
4. Баунин В.Г., Новоселов Б.В. Проблемы проектирования и производства управляемых опорно-поворот-

- ных устройств антенн радиосвязи // Изв. ТулГУ. Сер. Технические науки. Вып. 5. 2011. С. 21–30.
5. Васильев В.Н., Томасов В.С., Шаргородский В.Д., Садовников М.А. Состояние и перспективы развития прецизионных электроприводов комплексов высокоточных наблюдений // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 6. С. 5–12.
6. Зайцев Н.А., Адякин Ю.Н., Малютин Д.М., Борисов А.В., Орлов В.А. Формирование облика опорно-поворотного устройства нового поколения // Изв. ТулГУ. Сер. Технические науки. 2022. Вып. 10. С. 145–150. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-10-145-150.
7. Латышев С.М. Конструирование точных (оптических) приборов: Учеб. пособие. СПб.: Политехника, 2007. 579 с.
8. Open optical encoders Renishaw. URL: <https://www.renishaw.com/en/open-optical-encoders-6433> (last access: 13.12.2023).
9. Толмачев В.А., Антипова И.В., Фомин С.Г. Математическая модель следящего электропривода оси опорно-поворотного устройства // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2007. № 44. С. 142–146.
10. Толмачев В.А., Никитина М.В., Сергеева М.Е. Синтез системы управления электропривода азимутальной оси алтайского телескопа ТИ-3.12 // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2010. № 5 (69). С. 39–43.
11. Сомов С.Е. Юстировка и калибровка информационно-измерительной системы для определения ориентации спутника землеобзора и его наблюдательного оборудования // Изв. Самарского научного центра РАН. 2018. Т. 20, № 1. С. 87–95.
12. Рязанцев Д.А. Разработка системы измерения угловых перемещений // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2018. № 4. С. 5–9.
13. Строилов Н.А., Никитин А.В., Куркина А.Н., Бессонов Р.В., Белинская Е.В., Воронков С.В. Методика наземной взаимной привязки систем координат звездных датчиков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 4. С. 52–63. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-52-63.
14. Сметанин П.С., Аванесов Г.А., Бессонов Р.В., Куркина А.Н., Никитин А.В. Геометрическая калибровка звездного датчика высокой точности по звездному небу // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 2. С. 9–23. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-9-23.
15. Цветков А.С. Руководство по практической работе с каталогом Hipparcos: учебно-метод. пособие. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2005. 104 с.
16. Шишаков К.В. Информационные оптические системы космического назначения с многоканальным управлением: учеб. пособие. Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2011. 346 с.
17. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1984. 835 с.

I.V. Znamenskii, A.A. Tikhomirov, A.T. Tungushpaev. Reducing the pointing error of a space surveillance system for monitoring man-made objects.

To monitor objects of man-made origin, the issues of reducing the errors of pointing an optoelectronic system (OES) of a space survey at an object, which are associated with the influence of mechanical factors on the design of a pivoting device, are considered. To reduce these errors, the calibration of the optical sensors of the OES by stars is used. Mathematical methods of processing measurements are used to increase their accuracy, or interpolation methods are used to determine intermediate values between measured calibration points. The work uses spline approximation to find corrections to the readings of optical sensors of the azimuthal and elevation axes.