

Санкт-Петербургский государственный университет

Направление (специальность) астрономия

Профиль (специализация) астрометрия

Миронова Светлана Михайловна

Анализ алгоритмов вычисления видимых мест звёзд

Дипломная работа

Научный руководитель:

доцент кафедры астрономии, к.ф.-м.н., Петров С.Д.

Рецензент:

зав. сектором геодинамики ГАО РАН, к.ф.-м.н., Горшков В. Л.

Санкт-Петербург

2016

SAINT-PETERSBURG STATE UNIVERSITY

Main Field of Study (Speciality) astronomy

Area of Specialisation (Specialisation) astrometry

Mironova Svetlana Mihaylovna

Analysis of algorithms of evaluation of apparent places of stars

Graduation Thesis

Scientific supervisor:

Assistant professor of the Astronomy Department, Ph. D., S. D. Petrov

Reviewer:

Head of Geodynamics sector, Central astronomical observatory, Ph. D., V. L.
Gorshkov

Saint-Petersburg

2016

Оглавление

1	Введение	4
2	Историческая часть	6
3	Обзор текущего состояния проблемы	10
4	Наблюдения звезд	26
5	Выводы	37
	Литература	38

Глава 1

Введение

В астрономии одной из важных задач является определение координат небесных объектов. Однако полученные в результате наблюдений с Земли координаты будут зависеть не только от положения самого объекта, но и от состояния атмосферы, положения Земли относительно Солнца и других факторов, действовавших в тот момент. Если полученные таким образом координаты отсчитываются в геоцентрической системе отсчета и отнесены к мгновенным полюсу мира и точке весеннего равноденствия, то их называют видимыми. В каталогах обычно приводятся средние места звезд, которые относятся к среднему экватору и равноденствию даты наблюдения в барицентрической системе отсчета.

Чтобы перейти от средних к видимым местам звезды, нужно учесть влияние годичной и суточной абберраций, прецессии и нутации [4]. Годичная абберрация вызывает смещение положения наблюдателя из-за обращения Земли вокруг Солнца, суточная – из-за суточного вращения Земли вокруг своей оси. Положение оси Земли меняется относительно среднего положения из-за несферичности Земли и несовпадения плоскостей экватора и эклиптики и описывается прецессией и нутацией.

В последнее время вновь становится актуальной задача координатных определений по наблюдениям звезд, поскольку:

- глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) критиче-

ски уязвимы в условиях радиоэлектронной борьбы;

- для целого ряда задач, таких как баллистика ракет, строительство, гравиметрия, требуются именно астрономические координаты или отклонения отвеса;
- в свою очередь отклонения отвеса наиболее точно определяются по наблюдениям звезд;
- современные технологии позволяют повысить точность астрономических координатных определений до уровня ГНСС;
- на кафедре астрономии возобновляются работы по астрономическим определениям координат пунктов (Светлое, Боровичи), требующие современного эфемеридного обеспечения.

Постановка задачи

Целью работы является оценка текущего состояния астрономического эфемеридного обеспечения, включая:

- положения и собственные движения фундаментальных звезд каталогов FK6 и Hipparcos;
- доступные алгоритмы и программные средства для вычисления видимых мест звезд;
- выполнение наблюдений звезд на пассажном инструменте с целью возможной верификации их видимых мест.

Глава 2

Историческая часть

Брадлей произвел первые шаги по определению ошибок измерительных инструментов. Его журналы наблюдений свидетельствуют о том, что он следил за состоянием инструмента, однако специальных исследований приборов не проводил. Ввел регистрацию показаний термометра и барометра во время наблюдений, эти данные учитывались при вычислении рефракции.

Вклад Бесселя в развитие методики наблюдений и обработки результатов сложно переоценить [8]. До него не было единой системы обработки данных, наблюдатели использовали различные методики, результаты разных обсерваторий было сложно или даже невозможно сравнить. Бессель разработал теорию инструментальных и личных ошибок, тем самым повысив точность единичных измерений. Также он составил унифицированные редукционные алгоритмы и таблицы, позволяющие сравнивать и объединять данные, полученные в разных обсерваториях. Кроме того, он повысил точность и надежность результатов серийных наблюдений с помощью математического аппарата теории вероятностей и математической статистики, примененного к обработке астрономических вычислений.

Для определения видимого места светила необходимо исправить полученные в результате наблюдений координаты от инструментальных и личных ошибок, учесть рефракцию. Астрономическая рефракция – явление преломления лучей от небесного объекта при прохождении земной атмосферы.

Смещение происходит по направлению к зениту, величина смещения зависит от показателя преломления воздуха μ , который связан с его плотностью δ следующим соотношением: $\mu - 1 = c\delta$. Здесь c – некоторая константа. μ также зависит от влажности воздуха. Для вывода формулы рефракции Бессель пользовался принятым тогда в физике соотношением между показателем преломления воздуха μ и его плотностью δ и зависимостью плотности воздуха от высоты h над поверхностью земли.

$$\mu^2 = 1 + 2k\delta,$$

$$\delta = \delta_0 \exp\left(-\beta\left(\frac{r_0 + h}{r_0}\right) - 1\right)$$

где $k = \frac{\mu_0^2 - 1}{2\delta_0}$; μ_0, δ_0 – значения в приземном слое; r_0 – средний радиус Земли; β – константа, определяется из наблюдений.

Истинное место звезды можно получить из видимого места, если учесть аберрацию [4]. Абберрация появляется из-за конечности скорости распространения света и перемещения наблюдателя относительно объекта наблюдения, исходя из этого, абберрационное смещение делят на поправку за абберрационное время и на звездную абберрацию. Абберрация смещает геометрическое направление на звезду в сторону апекса движения наблюдателя.

$$\Delta\theta = \theta - \theta',$$

где $\theta(\theta')$ – угол между геометрическим (видимым) направлением на звезду и апексом движения, $\Delta\theta$ – абберрационное смещение

$$\sin \Delta\theta = \frac{V}{c} \sin \theta'$$

Средняя величина $\frac{V}{c}$ называется постоянной абберрации κ .

Поправка за световой промежуток (абберрационное время) не зависит от движения объекта и равна его смещению по небесной сфере за время распространения сигнала от источника до приемника.

Земля как место наблюдения вращается вокруг своей оси, движется по орбите вокруг барицентра Солнечной системы и перемещается вместе с барицентром в пространстве, поэтому звездную абберрацию разделяют на

суточную, годовую и вековую. Бессель нашел постоянную аберрацию после обработки наблюдений Бадделя и своих наблюдений.

Среднее место получается после учета нутации, перевод среднего места из одной эпохи на другую – после учета прецессии [4]. Явление прецессии заключается в том, что точка весеннего равноденствия, относительно которой измеряются экваториальные координаты объектов, перемещается по эклиптике навстречу Солнцу. Периодические колебания точки весны описываются нутацией. Ось вращения Земли меняет свое положение из-за влияния Луны и Солнца, как следствие, полюс экватора смещается относительно полюса эклиптики; эта часть прецессии называется лунно-солнечной. Изменение положения полюса эклиптики вызывает прецессию от планет. Сложив обе компоненты прецессии, получим общую прецессию. Прецессионные параметры Бессель определил с помощью теории Лапласа. Постоянную прецессии нашел из предположения о том, что векторы собственных движений звезд распределены случайным образом, поэтому их суммой на отдельной площадке небесной сферы можно пренебречь.

Собственным движением звезды называется изменение ее координат на небесной сфере, вызванные относительным движением этого светила и Солнечной системы. Для учета собственных движений за время от эпохи t_1 к эпохе t_2 были применены формулы

$$\Delta\alpha = \mu_\alpha(t_2 - t_1)$$

$$\Delta\delta = \mu_\delta(t_2 - t_1),$$

здесь μ_α, μ_δ – годовые собственные движения светила по прямому восхождению и склонению соответственно.

Необходимо отметить опубликованное в ”Кенигсбергских таблицах” [11] и используемое с некоторыми поправками даже на данный момент соотношение (применялось в [9] – 1975 год, отсутствует в [5] – 1986 год, присутствует в [1] наравне с другим алгоритмом), осуществляющее переход между ви-

димыми и средними местами

$$\alpha_{vid} - \alpha_{sr} = Aa + Bb + Cc + Dd + E + \mu_{\alpha}t$$

$$\delta_{vid} - \delta_{sr} = Aa' + Bb' + Cc' + Dd' + \mu_{\delta}t$$

Величины $A, B, C, D, E, a, b, c, d, a', b', c', d'$ называются Бесселевыми числами. Числа, обозначенные заглавными буквами, не зависят от координат наблюдаемой звезды и являются функциями времени. Остальные числа считаются для каждой звезды отдельно.

Глава 3

Обзор текущего состояния проблемы

t – момент наблюдения, задан в шкале TDB

t_0 – момент времени, задан в шкале TDB

$\vec{r}_b(t)$ – вектор положения планеты в момент t относительно барицентра Солнечной системы на среднее равноденствие и экватор эпохи t_0

$\vec{r}_b(t)$ – вектор положения звезды в эпоху t_0 относительно барицентра Солнечной системы на среднее равноденствие и экватор эпохи t_0

$\vec{E}_b(t)$ – барицентрический вектор положения Земли в эпоху наблюдения t относительно барицентра Солнечной системы на среднее равноденствие и экватор эпохи t_0 .

Видимые места, отнесенные к истинному равноденствию даты, являются основным типом эфемерид небесных объектов, публикуемых в ежегодниках. Они вычисляются следующим образом [6]:

$$\begin{aligned}\vec{u}_s(t') &= N(t)P(t, t_0)A\left(G(\vec{r}_b(t_0) + (t - t_0)\dot{\vec{r}}_b(t_0) - \vec{E}_b(t))\right) \\ \vec{u}_p(t') &= N(t)P(t, t_0)A\left(G(\vec{r}_b(t - \tau) - \vec{E}_b(t))\right),\end{aligned}$$

где

t' – эпоха наблюдения в шкале $TT(TDT)$;

$\dot{\vec{r}}_b(t_0)$ – вектор пространственного движения звезды, учитывающий собственное движение, радиальную скорость и параллакс звезды для эпохи

t_0 ;

τ – световой промежуток (абберационное время), находится итерациями из следующей формулы.

Пусть E – модуль вектора гелиоцентрического положения Земли, P – геоцентрическое положение объекта, Q – его гелиоцентрическое положение, $\frac{\mu}{c^2} = 9.8704 * 10^{-9}$ а.е. – гравитационный радиус Солнца.

$$c\tau = P + \frac{2\mu}{c^2} \ln \frac{E + Q + P}{E + Q - P}$$

G – гравитационное отклонение света

A – учет звездной аберрации

$P(t, t_0)$ – матрица прецессии для перехода от среднего равноденствия эпохи t_0 к среднему в эпоху t

Матрицы вращения $R_i(\varphi)$ осуществляют повороты системы координат (с перпендикулярными осями) против часовой стрелки на угол φ относительно осей x, y, z (1, 2, 3)

$$R_1(\varphi) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix}$$

$$R_2(\varphi) = \begin{pmatrix} \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{pmatrix}$$

$$R_3(\varphi) = \begin{pmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$P = R_3(-z_A)R_2(\theta_A)R_3(-\xi_A)$$

ξ_A, z_A, θ_A – углы Эйлера: ξ_A – прецессия в экваторе за время $t - t_0$, $90^\circ + z_A$ – прямое восхождение узла, отсчитываемого по экватору t от равноденствия t , θ_A – наклон экватора t к экватору t_0 .

$N(t)$ – матрица учета нутации для перехода от среднего равноденствия к истинному в эпоху t .

$$\vec{r} = N\vec{r}_c = R_1(-\epsilon_0 - \Delta\epsilon_s)R_3(-\Delta\psi_s)R_1(\epsilon_0)\vec{r}_c$$

$u(t')$ – видимое геоцентрическое место звезды на момент наблюдения t' в шкале ТТ, отнесенное к истинному равноденствию и экватору.

Для приведения на видимое место были использованы пакеты SOFA (Standards Of Fundamental Astronomy) и NOVAS (Naval Observatory Vector Astrometry Software), сайты NAOJ и GAVO, а также алгоритм, описанный в [6] и использующий координаты из Астрономического Ежегодника за 2016 год [1]. В расчетах SOFA и NOVAS использовались эфемериды DE405, созданные в 1997 году. Согласно документу User's Guide to NOVAS Version C3.1, программы SOFA и NOVAS являются почти независимыми, поэтому их сравнение имеет смысл.

SOFA – IAU Service, которая обслуживает Standing Working Group under Division A (Fundamental Astronomy) [14]. МАС утвердил инициативу SOFA на Генеральной Ассамблее в 1994 году для публикации надежного набора констант и фундаментальной астрономии и алгоритмов. На следующей Генеральной Ассамблее в 1997 было заявлено о выборе места для центра SOFA (выхода продуктов SOFA). Ее программное обеспечение доступно на языках Fortran и C и содержит 166 "астрономических" и 55 вспомогательных "векторно-матричных" программ.

Астрометрическое программное обеспечение Морской Обсерватории (NOVAS) – это библиотеки, содержащие код на языках Fortran, C и Python. Вычисления NOVAS имеют миллисекундную точность. Существует три уровня функций: базовые, утилитарные и управляющие. Базовые функции поставляют значения фундаментальных переменных, таких как углы нутации и гелиоцентрические положения тел Солнечной системы, на различные эпохи. Утилитарные функции выполняют вычисления, соответствующие индивидуальным физическим эффектам или преобразованиям (абберация, искривление света, прецессия, движение полюса и т. д.). Управляющие функции вызывают базовые и утилитарные подпрограммы в необходимом порядке, чтобы рассчитать координаты звезд или тел Солнечной системы

на определенную дату и время. При желании пользователи могут взаимодействовать исключительно с управляющими функциями и не задумываться о подробностях геометрии или физических моделей, включенных в расчеты.

Версия NOVAS на языке Fortran относится к концу 1970х, но она регулярно обновлялась, чтобы использовать новые, более точные модели, которые представляют развивающиеся стандарты международного астрономического и геодезического обществ. В начале 1990х группа оптического интерферометра Морской Обсерватории США / Морской Научно-исследовательской Лаборатории преобразовала часть NOVAS в C для использования в своих проектах. Эта работа сформировала основу первого полного издания NOVAS в C, которое было завершено USNO Astronomical Applications Department и выпущено в 1996. Основное издание NOVAS на языке Fortran появилось в 1998 с первоначальной целью поддерживать данные, соответствующие Международной Небесной Системе Отсчета. Вскоре после этого C-версия NOVAS была обновлена до C2.0, чтобы отразить изменения на Fortran и расширить возможности. Позже NOVAS представила издание на языке Python.

При вычислениях с полной точностью, использующих одинаковые источники данных, различия в результатах Fortran и C изданиях NOVAS при одинаковых расчетах должны не превышать $6 * 10^{-8}$ мсд для тел Солнечной системы и $7 * 10^{-10}$ мсд ($3 * 10^{-15}$ рад) для звезд [12].

Для получения координат Полярной звезды с помощью пакета SOFA понадобится подпрограмма `iauAtco13`, которая преобразует склонение и прямое восхождение $[\alpha, \delta]$ на эпоху $J2000.0$ (в качестве вспомогательных данных требуются собственные движения вдоль α и вдоль δ , параллакс, лучевая скорость, юлианская дата, UT1-UTC, долгота, геодезическая широта, высота над эллипсоидом, координаты полюсов, давление, температура, влажность, длина волны) и получает видимые места объекта (видимый азимут, видимое зенитное расстояние, видимый часовой угол, видимое склонение, видимое прямое восхождение), и те подпрограммы, на которые она ссыла-

ется [13].

В таблицах 3.1, 3.2 представлены экваториальные координаты Полярной звезды с 1 марта 12 часов по 1 июня 0 часов с шагом 12 часов. В первом столбце приведена юлианская дата, во втором – соответствующее ей значение прямого восхождения в часах, минутах и секундах времени или склонения в градусах, минутах и секундах дуги. В последующих столбцах часы, градусы и минуты для краткости опускаются.

Таблица 3.1: прямое восхождение αUMi

дата	ежег.	novas	sofa1997	sofa2007	GAVO	NAOJ
2457449	2 51 32.61	32.65	33.27	33.30	32.60	33.30
2457449.5	2 51 31.85	31.89	32.51	32.54	31.84	32.54
2457450	2 51 31.09	31.14	31.75	31.79	31.09	31.79
2457450.5	2 51 30.33	30.38	30.99	31.03	30.33	31.03
2457451	2 51 29.57	29.62	30.23	30.26	29.57	30.27
2457451.5	2 51 28.79	28.84	29.46	29.49	28.79	29.49
2457452	2 51 28.00	28.06	28.67	28.71	28.01	28.71
2457452.5	2 51 27.20	27.26	27.87	27.91	27.21	27.91
2457453	2 51 26.39	26.44	27.05	27.09	26.39	27.09
2457453.5	2 51 25.54	25.60	26.21	26.25	25.55	26.25
2457454	2 51 24.69	24.74	25.36	25.39	24.69	25.39
2457454.5	2 51 23.81	23.87	24.48	24.52	23.82	24.52
2457455	2 51 22.92	22.98	23.59	23.63	22.93	23.63
2457455.5	2 51 22.03	22.08	22.69	22.73	22.03	22.73
2457456	2 51 21.13	21.18	21.80	21.83	21.13	21.83
2457456.5	2 51 20.25	20.29	20.91	20.94	20.24	20.94
2457457	2 51 19.38	19.42	20.04	20.07	19.37	20.07
2457457.5	2 51 18.54	18.57	19.19	19.22	18.52	19.22
2457458	2 51 17.72	17.76	18.37	18.41	17.71	18.41
2457458.5	2 51 16.95	16.98	17.59	17.63	16.93	17.63
2457459	2 51 16.20	16.24	16.85	16.89	16.19	16.89
2457459.5	2 51 15.50	15.54	16.15	16.18	15.49	16.18

2457460	2 51 14.83	14.87	15.48	15.52	14.82	15.52
2457460.5	2 51 14.19	14.23	14.85	14.88	14.18	14.88
2457461	2 51 13.57	13.62	14.23	14.27	13.57	14.27
2457461.5	2 51 12.98	13.02	13.64	13.67	12.97	13.67
2457462	2 51 12.38	12.43	13.05	13.08	12.38	13.08
2457462.5	2 51 11.79	11.85	12.46	12.50	11.80	12.50
2457463	2 51 11.20	11.26	11.87	11.90	11.21	11.90
2457463.5	2 51 10.60	10.65	11.27	11.30	10.60	11.30
2457464	2 51 9.98	10.04	10.65	10.69	9.991	10.69
2457464.5	2 51 9.35	9.41	10.02	10.06	9.36	10.06
2457465	2 51 8.71	8.763	9.377	9.412	8.713	9.412
2457465.5	2 51 8.04	8.099	8.713	8.748	8.049	8.747
2457466	2 51 7.36	7.418	8.033	8.067	7.369	8.067
2457466.5	2 51 6.67	6.724	7.339	7.373	6.675	7.373
2457467	2 51 5.97	6.019	6.634	6.668	5.970	6.668
2457467.5	2 51 5.26	5.307	5.921	5.956	5.257	5.956
2457468	2 51 4.54	4.590	5.205	5.239	4.541	5.239
2457468.5	2 51 3.83	3.874	4.488	4.523	3.825	4.523
2457469	2 51 3.11	3.163	3.777	3.811	3.113	3.811
2457469.5	2 51 2.41	2.459	3.074	3.108	2.410	3.108
2457470	2 51 1.72	1.769	2.383	2.417	1.719	2.417
2457470.5	2 51 1.05	1.094	1.708	1.742	1.044	1.742
2457471	2 51 0.39	0.4373	1.051	1.086	0.3876	1.086
2457471.5	2 50 59.76	59.8	0.4164	0.451	59.75	0.451
2457472	2 50 59.15	59.19	59.80	59.84	59.14	59.84
2457472.5	2 50 58.57	58.60	59.22	59.25	58.55	59.25
2457473	2 50 57.99	58.04	58.65	58.69	57.99	58.69
2457473.5	2 50 57.46	57.50	58.12	58.15	57.45	58.15
2457474	2 50 56.94	56.99	57.60	57.64	56.94	57.64
2457474.5	2 50 56.46	56.49	57.11	57.14	56.45	57.14
2457475	2 50 55.98	56.02	56.64	56.67	55.97	56.67
2457475.5	2 50 55.53	55.57	56.18	56.22	55.52	56.22
2457476	2 50 55.08	55.13	55.74	55.78	55.08	55.78

2457476.5	2 50 54.65	54.70	55.32	55.35	54.65	55.35
2457477	2 50 54.23	54.28	54.90	54.93	54.23	54.93
2457477.5	2 50 53.82	53.87	54.48	54.52	53.82	54.52
2457478	2 50 53.41	53.45	54.07	54.10	53.41	54.10
2457478.5	2 50 52.99	53.04	53.65	53.69	52.99	53.69
2457479	2 50 52.57	52.61	53.23	53.26	52.57	53.26
2457479.5	2 50 52.13	52.18	52.8	52.83	52.13	52.83
2457480	2 50 51.69	51.74	52.35	52.39	51.69	52.38
2457480.5	2 50 51.22	51.28	51.89	51.93	51.23	51.93
2457481	2 50 50.75	50.80	51.42	51.45	50.76	51.45
2457481.5	2 50 50.26	50.32	50.93	50.96	50.27	50.97
2457482	2 50 49.76	49.82	50.43	50.46	49.77	50.47
2457482.5	2 50 49.26	49.31	49.92	49.96	49.26	49.96
2457483	2 50 48.74	48.80	49.41	49.44	48.75	49.44
2457483.5	2 50 48.24	48.29	48.90	48.93	48.24	48.93
2457484	2 50 47.74	47.79	48.40	48.44	47.74	48.44
2457484.5	2 50 47.28	47.31	47.92	47.96	47.26	47.96
2457485	2 50 46.82	46.86	47.47	47.51	46.81	47.51
2457485.5	2 50 46.42	46.45	47.06	47.09	46.4	47.09
2457486	2 50 46.01	46.07	46.69	46.72	46.02	46.72
2457486.5	2 50 45.71	45.74	46.36	46.39	45.69	46.39
2457487	2 50 45.40	45.45	46.07	46.10	45.40	46.10
2457487.5	2 50 45.18	45.21	45.82	45.85	45.16	45.85
2457488	2 50 44.94	44.99	45.61	45.64	44.94	45.64
2457488.5	2 50 44.77	44.81	45.42	45.45	44.76	45.45
2457489	2 50 44.59	44.64	45.25	45.29	44.59	45.29
2457489.5	2 50 44.43	44.48	45.09	45.13	44.43	45.13
2457490	2 50 44.27	44.32	44.93	44.97	44.27	44.97
2457490.5	2 50 44.10	44.16	44.77	44.80	44.11	44.80
2457491	2 50 43.93	43.98	44.59	44.63	43.93	44.63
2457491.5	2 50 43.73	43.79	44.4	44.44	43.74	44.44
2457492	2 50 43.54	43.58	44.20	44.23	43.53	44.23
2457492.5	2 50 43.31	43.36	43.97	44.01	43.31	44.01

2457493	2 50 43.08	43.12	43.73	43.77	43.07	43.77
2457493.5	2 50 42.82	42.87	43.48	43.51	42.82	43.52
2457494	2 50 42.56	42.60	43.22	43.25	42.55	43.25
2457494.5	2 50 42.28	42.33	42.94	42.98	42.28	42.98
2457495	2 50 42.01	42.05	42.67	42.70	42.00	42.70
2457495.5	2 50 41.73	41.78	42.39	42.43	41.73	42.42
2457496	2 50 41.45	41.51	42.12	42.15	41.46	42.15
2457496.5	2 50 41.20	41.24	41.86	41.89	41.19	41.89
2457497	2 50 40.94	40.99	41.60	41.64	40.94	41.64
2457497.5	2 50 40.72	40.76	41.37	41.40	40.71	41.40
2457498	2 50 40.50	40.54	41.15	41.19	40.49	41.19
2457498.5	2 50 40.31	40.34	40.96	40.99	40.29	40.99
2457499	2 50 40.12	40.17	40.79	40.82	40.12	40.82
2457499.5	2 50 39.99	40.03	40.64	40.67	39.98	40.67
2457500	2 50 39.86	39.91	40.52	40.55	39.86	40.55
2457500.5	2 50 39.78	39.81	40.43	40.46	39.76	40.46
2457501	2 50 39.69	39.74	40.36	40.39	39.69	40.39
2457501.5	2 50 39.66	39.70	40.31	40.35	39.65	40.35
2457502	2 50 39.63	39.68	40.29	40.33	39.63	40.33
2457502.5	2 50 39.64	39.68	40.29	40.32	39.63	40.32
2457503	2 50 39.65	39.69	40.31	40.34	39.64	40.34
2457503.5	2 50 39.68	39.72	40.34	40.37	39.67	40.37
2457504	2 50 39.72	39.76	40.38	40.41	39.71	40.41
2457504.5	2 50 39.77	39.81	40.42	40.46	39.76	40.46
2457505	2 50 39.82	39.86	40.48	40.51	39.81	40.51
2457505.5	2 50 39.86	39.91	40.53	40.56	39.86	40.56
2457506	2 50 39.91	39.96	40.57	40.61	39.91	40.61
2457506.5	2 50 39.94	40.00	40.61	40.65	39.95	40.65
2457507	2 50 39.98	40.03	40.64	40.67	39.98	40.67
2457507.5	2 50 39.99	40.05	40.66	40.69	40.00	40.69
2457508	2 50 40.00	40.05	40.66	40.70	40.00	40.70
2457508.5	2 50 39.99	40.04	40.66	40.69	39.99	40.69
2457509	2 50 39.98	40.02	40.64	40.67	39.97	40.67

2457509.5	2 50 39.95	39.99	40.61	40.64	39.95	40.64
2457510	2 50 39.91	39.96	40.57	40.61	39.91	40.61
2457510.5	2 50 39.88	39.92	40.54	40.57	39.88	40.57
2457511	2 50 39.85	39.89	40.51	40.54	39.85	40.54
2457511.5	2 50 39.85	39.88	40.49	40.53	39.83	40.52
2457512	2 50 39.84	39.88	40.49	40.53	39.83	40.53
2457512.5	2 50 39.88	39.91	40.53	40.56	39.86	40.56
2457513	2 50 39.93	39.98	40.59	40.63	39.93	40.63
2457513.5	2 50 40.06	40.09	40.70	40.73	40.04	40.73
2457514	2 50 40.19	40.24	40.85	40.88	40.19	40.88
2457514.5	2 50 40.40	40.43	41.04	41.08	40.38	41.08
2457515	2 50 40.61	40.66	41.28	41.31	40.61	41.31
2457515.5	2 50 40.90	40.93	41.55	41.58	40.88	41.58
2457516	2 50 41.19	41.23	41.84	41.88	41.18	41.88
2457516.5	2 50 41.51	41.55	42.16	42.19	41.50	42.19
2457517	2 50 41.83	41.87	42.48	42.52	41.82	42.52
2457517.5	2 50 42.15	42.20	42.81	42.84	42.15	42.84
2457518	2 50 42.47	42.51	43.13	43.16	42.47	43.16
2457518.5	2 50 42.76	42.82	43.43	43.47	42.77	43.47
2457519	2 50 43.06	43.11	43.72	43.75	43.06	43.75
2457519.5	2 50 43.32	43.37	43.99	44.02	43.33	44.02
2457520	2 50 43.58	43.62	44.23	44.27	43.57	44.27
2457520.5	2 50 43.80	43.85	44.46	44.50	43.80	44.50
2457521	2 50 44.02	44.07	44.68	44.71	44.02	44.71
2457521.5	2 50 44.22	44.27	44.88	44.92	44.22	44.92
2457522	2 50 44.42	44.46	45.08	45.11	44.42	45.11
2457522.5	2 50 44.61	44.66	45.27	45.30	44.61	45.30
2457523	2 50 44.80	44.85	45.46	45.50	44.80	45.50
2457523.5	2 50 45.01	45.05	45.66	45.70	45.00	45.70
2457524	2 50 45.21	45.26	45.87	45.90	45.21	45.90
2457524.5	2 50 45.44	45.48	46.09	46.13	45.43	46.13
2457525	2 50 45.68	45.72	46.33	46.36	45.67	46.36
2457525.5	2 50 45.94	45.98	46.59	46.62	45.93	46.62

2457526	2 50 46.21	46.25	46.87	46.90	46.21	46.90
2457526.5	2 50 46.52	46.56	47.17	47.21	46.51	47.20
2457527	2 50 46.84	46.89	47.50	47.53	46.84	47.53
2457527.5	2 50 47.20	47.24	47.85	47.89	47.19	47.89
2457528	2 50 47.57	47.62	48.23	48.26	47.57	48.26
2457528.5	2 50 47.98	48.02	48.63	48.67	47.97	48.67
2457529	2 50 48.40	48.44	49.06	49.09	48.40	49.09
2457529.5	2 50 48.86	48.89	49.50	49.54	48.84	49.54
2457530	2 50 49.31	49.35	49.97	50.00	49.31	50.00
2457530.5	2 50 49.80	49.83	50.45	50.48	49.79	50.48
2457531	2 50 50.28	50.32	50.94	50.97	50.28	50.97
2457531.5	2 50 50.78	50.82	51.43	51.47	50.77	51.47
2457532	2 50 51.28	51.32	51.94	51.97	51.28	51.97
2457532.5	2 50 51.78	51.82	52.44	52.47	51.78	52.47
2457533	2 50 52.27	52.32	52.93	52.97	52.27	52.97
2457533.5	2 50 52.76	52.81	53.42	53.46	52.76	53.46
2457534	2 50 53.24	53.29	53.90	53.94	53.24	53.94
2457534.5	2 50 53.70	53.76	54.37	54.40	53.71	54.41
2457535	2 50 54.16	54.21	54.82	54.86	54.16	54.86
2457535.5	2 50 54.60	54.65	55.26	55.30	54.60	55.30
2457536	2 50 55.03	55.07	55.69	55.72	55.03	55.72
2457536.5	2 50 55.44	55.49	56.10	56.13	55.44	56.13
2457537	2 50 55.84	55.89	56.50	56.54	55.84	56.54
2457537.5	2 50 56.24	56.29	56.90	56.94	56.24	56.94
2457538	2 50 56.65	56.69	57.31	57.34	56.64	57.34
2457538.5	2 50 57.06	57.10	57.71	57.75	57.05	57.75
2457539	2 50 57.48	57.52	58.13	58.17	57.47	58.17
2457539.5	2 50 57.93	57.96	58.57	58.61	57.91	58.61
2457540	2 50 58.39	58.43	59.04	59.08	58.38	59.08
2457540.5	2 50 58.90	58.93	59.54	59.58	58.88	59.58

Таблица 3.2: склонение αUMi

дата	ежег.	novas	sofa1997	sofa2007	GAVO	NAOJ
2457449	89 20 7.91	7.91	7.98	7.97	7.91	7.97
2457449.5	89 20 7.83	7.83	7.90	7.90	7.84	7.90
2457450	89 20 7.76	7.76	7.83	7.83	7.77	7.83
2457450.5	89 20 7.70	7.69	7.76	7.76	7.70	7.76
2457451	89 20 7.63	7.63	7.70	7.69	7.63	7.69
2457451.5	89 20 7.57	7.56	7.63	7.63	7.57	7.63
2457452	89 20 7.50	7.50	7.57	7.56	7.50	7.56
2457452.5	89 20 7.44	7.43	7.50	7.50	7.44	7.50
2457453	89 20 7.37	7.37	7.44	7.44	7.38	7.44
2457453.5	89 20 7.31	7.31	7.38	7.37	7.31	7.37
2457454	89 20 7.24	7.24	7.31	7.30	7.24	7.30
2457454.5	89 20 7.17	7.17	7.24	7.23	7.17	7.23
2457455	89 20 7.09	7.09	7.16	7.16	7.10	7.16
2457455.5	89 20 7.01	7.01	7.08	7.08	7.02	7.08
2457456	89 20 6.93	6.92	6.99	6.99	6.93	6.99
2457456.5	89 20 6.83	6.83	6.90	6.89	6.83	6.89
2457457	89 20 6.73	6.73	6.80	6.79	6.73	6.79
2457457.5	89 20 6.62	6.62	6.69	6.69	6.63	6.69
2457458	89 20 6.51	6.51	6.58	6.57	6.51	6.57
2457458.5	89 20 6.40	6.39	6.46	6.46	6.40	6.46
2457459	89 20 6.28	6.27	6.35	6.34	6.28	6.34
2457459.5	89 20 6.16	6.16	6.23	6.22	6.16	6.22
2457460	89 20 6.04	6.04	6.11	6.10	6.04	6.10
2457460.5	89 20 5.93	5.92	5.99	5.99	5.92	5.99
2457461	89 20 5.81	5.81	5.88	5.87	5.81	5.87
2457461.5	89 20 5.70	5.70	5.77	5.76	5.70	5.76
2457462	89 20 5.59	5.59	5.66	5.65	5.59	5.65
2457462.5	89 20 5.49	5.49	5.55	5.55	5.49	5.55
2457463	89 20 5.39	5.38	5.45	5.45	5.39	5.45
2457463.5	89 20 5.29	5.29	5.36	5.35	5.29	5.35

2457464	89 20 5.20	5.19	5.26	5.25	5.19	5.25
2457464.5	89 20 5.10	5.09	5.16	5.16	5.10	5.16
2457465	89 20 5.00	5.00	5.07	5.06	5.00	5.06
2457465.5	89 20 4.90	4.90	4.97	4.96	4.90	4.96
2457466	89 20 4.80	4.80	4.87	4.87	4.80	4.86
2457466.5	89 20 4.70	4.70	4.77	4.76	4.70	4.76
2457467	89 20 4.60	4.59	4.66	4.66	4.60	4.66
2457467.5	89 20 4.49	4.48	4.55	4.55	4.49	4.55
2457468	89 20 4.38	4.37	4.44	4.44	4.38	4.44
2457468.5	89 20 4.26	4.25	4.32	4.32	4.26	4.32
2457469	89 20 4.14	4.13	4.20	4.20	4.14	4.20
2457469.5	89 20 4.01	4.01	4.08	4.07	4.01	4.07
2457470	89 20 3.88	3.88	3.95	3.94	3.88	3.94
2457470.5	89 20 3.75	3.74	3.81	3.81	3.75	3.81
2457471	89 20 3.61	3.61	3.68	3.67	3.61	3.67
2457471.5	89 20 3.47	3.47	3.54	3.53	3.47	3.53
2457472	89 20 3.33	3.33	3.40	3.39	3.33	3.39
2457472.5	89 20 3.19	3.18	3.25	3.25	3.19	3.25
2457473	89 20 3.04	3.04	3.11	3.11	3.04	3.10
2457473.5	89 20 2.90	2.89	2.96	2.96	2.90	2.96
2457474	89 20 2.75	2.75	2.82	2.81	2.75	2.81
2457474.5	89 20 2.61	2.60	2.67	2.67	2.61	2.67
2457475	89 20 2.47	2.46	2.53	2.53	2.47	2.53
2457475.5	89 20 2.33	2.32	2.39	2.39	2.32	2.39
2457476	89 20 2.19	2.18	2.25	2.25	2.19	2.25
2457476.5	89 20 2.05	2.04	2.11	2.11	2.05	2.11
2457477	89 20 1.92	1.91	1.98	1.98	1.91	1.98
2457477.5	89 20 1.79	1.78	1.85	1.84	1.78	1.84
2457478	89 20 1.65	1.65	1.72	1.71	1.65	1.71
2457478.5	89 20 1.53	1.52	1.59	1.59	1.52	1.59
2457479	89 20 1.40	1.40	1.46	1.46	1.40	1.46
2457479.5	89 20 1.28	1.27	1.34	1.34	1.28	1.34
2457480	89 20 1.15	1.15	1.22	1.22	1.15	1.21

2457480.5	89 20 1.03	1.03	1.10	1.09	1.03	1.09
2457481	89 20 0.90	0.902	0.971	0.967	0.906	0.97
2457481.5	89 20 0.78	0.776	0.845	0.841	0.781	0.84
2457482	89 20 0.65	0.648	0.719	0.715	0.652	0.71
2457482.5	89 20 0.52	0.516	0.586	0.582	0.52	0.58
2457483	89 20 0.38	0.379	0.449	0.445	0.383	0.44
2457483.5	89 20 0.24	0.236	0.305	0.301	0.24	0.30
2457484	89 20 0.09	0.0878	0.157	0.154	0.092	0.15
2457484.5	89 19 59.9	59.9	0.0024	60.0	59.9	0.00
2457485	89 19 59.8	59.8	59.8	59.8	59.8	59.8
2457485.5	89 19 59.6	59.6	59.7	59.7	59.6	59.7
2457486	89 19 59.4	59.4	59.5	59.5	59.4	59.5
2457486.5	89 19 59.3	59.3	59.3	59.3	59.3	59.3
2457487	89 19 59.1	59.1	59.2	59.2	59.1	59.2
2457487.5	89 19 59.0	58.9	59.0	59.0	58.9	59.0
2457488	89 19 58.8	58.8	58.9	58.8	58.8	58.9
2457488.5	89 19 58.6	58.6	58.7	58.7	58.6	58.7
2457489	89 19 58.5	58.5	58.5	58.5	58.5	58.5
2457489.5	89 19 58.3	58.3	58.4	58.4	58.3	58.4
2457490	89 19 58.2	58.2	58.2	58.2	58.2	58.2
2457490.5	89 19 58.0	58.0	58.1	58.1	58.0	58.1
2457491	89 19 57.9	57.9	58.0	58.0	57.9	58.0
2457491.5	89 19 57.8	57.8	57.8	57.8	57.8	57.8
2457492	89 19 57.6	57.6	57.7	57.7	57.6	57.7
2457492.5	89 19 57.5	57.5	57.6	57.5	57.5	57.5
2457493	89 19 57.4	57.3	57.4	57.4	57.3	57.4
2457493.5	89 19 57.2	57.2	57.3	57.3	57.2	57.3
2457494	89 19 57.1	57.1	57.1	57.1	57.1	57.1
2457494.5	89 19 56.9	56.9	57.0	57.0	56.9	57.0
2457495	89 19 56.8	56.8	56.8	56.8	56.8	56.8
2457495.5	89 19 56.6	56.6	56.7	56.7	56.6	56.7
2457496	89 19 56.5	56.5	56.5	56.5	56.5	56.5
2457496.5	89 19 56.3	56.3	56.4	56.4	56.3	56.4

2457497	89 19 56.1	56.2	56.2	56.2	56.2	56.2
2457497.5	89 19 56.0	56.0	56.1	56.1	56.0	56.1
2457498	89 19 55.8	55.8	55.9	55.9	55.8	55.9
2457498.5	89 19 55.7	55.7	55.7	55.7	55.7	55.7
2457499	89 19 55.5	55.5	55.6	55.6	55.5	55.5
2457499.5	89 19 55.3	55.3	55.4	55.4	55.3	55.4
2457500	89 19 55.1	55.1	55.2	55.2	55.1	55.2
2457500.5	89 19 55.0	55.0	55.0	55.0	55.0	55.0
2457501	89 19 54.8	54.8	54.9	54.9	54.8	54.9
2457501.5	89 19 54.6	54.6	54.7	54.7	54.6	54.7
2457502	89 19 54.5	54.5	54.5	54.5	54.5	54.5
2457502.5	89 19 54.3	54.3	54.4	54.4	54.3	54.4
2457503	89 19 54.1	54.1	54.2	54.2	54.1	54.2
2457503.5	89 19 54.0	54.0	54.0	54.0	54.0	54.0
2457504	89 19 53.8	53.8	53.9	53.9	53.8	53.9
2457504.5	89 19 53.7	53.7	53.7	53.7	53.7	53.7
2457505	89 19 53.5	53.5	53.6	53.6	53.5	53.6
2457505.5	89 19 53.4	53.4	53.4	53.4	53.4	53.4
2457506	89 19 53.2	53.2	53.3	53.3	53.2	53.3
2457506.5	89 19 53.1	53.1	53.1	53.1	53.1	53.1
2457507	89 19 52.9	52.9	53.0	53.0	52.9	53.0
2457507.5	89 19 52.8	52.8	52.9	52.9	52.8	52.9
2457508	89 19 52.6	52.6	52.7	52.7	52.7	52.7
2457508.5	89 19 52.5	52.5	52.6	52.6	52.5	52.6
2457509	89 19 52.4	52.4	52.4	52.4	52.4	52.4
2457509.5	89 19 52.2	52.2	52.3	52.3	52.2	52.3
2457510	89 19 52.1	52.1	52.1	52.1	52.1	52.1
2457510.5	89 19 51.9	51.9	52.0	52.0	51.9	52.0
2457511	89 19 51.8	51.8	51.8	51.8	51.8	51.8
2457511.5	89 19 51.6	51.6	51.7	51.7	51.6	51.7
2457512	89 19 51.5	51.4	51.5	51.5	51.5	51.5
2457512.5	89 19 51.3	51.3	51.4	51.3	51.3	51.4
2457513	89 19 51.1	51.1	51.2	51.2	51.1	51.2

2457513.5	89 19 50.9	50.9	51.0	51.0	50.9	51.0
2457514	89 19 50.8	50.8	50.8	50.8	50.8	50.8
2457514.5	89 19 50.6	50.6	50.7	50.7	50.6	50.7
2457515	89 19 50.4	50.4	50.5	50.5	50.4	50.5
2457515.5	89 19 50.3	50.3	50.3	50.3	50.3	50.3
2457516	89 19 50.1	50.1	50.2	50.2	50.1	50.2
2457516.5	89 19 49.9	49.9	50.0	50.0	49.9	50.0
2457517	89 19 49.8	49.8	49.9	49.9	49.8	49.9
2457517.5	89 19 49.6	49.6	49.7	49.7	49.6	49.7
2457518	89 19 49.5	49.5	49.6	49.6	49.5	49.6
2457518.5	89 19 49.4	49.4	49.4	49.4	49.4	49.4
2457519	89 19 49.2	49.2	49.3	49.3	49.2	49.3
2457519.5	89 19 49.1	49.1	49.2	49.2	49.1	49.2
2457520	89 19 49.0	49.0	49.0	49.0	49.0	49.0
2457520.5	89 19 48.8	48.8	48.9	48.9	48.8	48.9
2457521	89 19 48.7	48.7	48.8	48.8	48.7	48.8
2457521.5	89 19 48.6	48.6	48.6	48.6	48.6	48.6
2457522	89 19 48.4	48.4	48.5	48.5	48.4	48.5
2457522.5	89 19 48.3	48.3	48.4	48.4	48.3	48.4
2457523	89 19 48.1	48.1	48.2	48.2	48.2	48.2
2457523.5	89 19 48.0	48.0	48.1	48.1	48.0	48.1
2457524	89 19 47.9	47.9	47.9	47.9	47.9	47.9
2457524.5	89 19 47.7	47.7	47.8	47.8	47.7	47.8
2457525	89 19 47.5	47.5	47.6	47.6	47.6	47.6
2457525.5	89 19 47.4	47.4	47.5	47.5	47.4	47.5
2457526	89 19 47.2	47.2	47.3	47.3	47.2	47.3
2457526.5	89 19 47.1	47.1	47.1	47.1	47.1	47.1
2457527	89 19 46.9	46.9	47.0	47.0	46.9	47.0
2457527.5	89 19 46.8	46.8	46.8	46.8	46.8	46.8
2457528	89 19 46.6	46.6	46.7	46.7	46.6	46.7
2457528.5	89 19 46.5	46.4	46.5	46.5	46.5	46.5
2457529	89 19 46.3	46.3	46.4	46.4	46.3	46.4
2457529.5	89 19 46.1	46.1	46.2	46.2	46.1	46.2

2457530	89 19 46.0	46.0	46.1	46.1	46.0	46.1
2457530.5	89 19 45.9	45.9	45.9	45.9	45.9	45.9
2457531	89 19 45.7	45.7	45.8	45.8	45.7	45.8
2457531.5	89 19 45.6	45.6	45.6	45.6	45.6	45.6
2457532	89 19 45.5	45.4	45.5	45.5	45.5	45.5
2457532.5	89 19 45.3	45.3	45.4	45.4	45.3	45.4
2457533	89 19 45.2	45.2	45.3	45.3	45.2	45.3
2457533.5	89 19 45.1	45.1	45.1	45.1	45.1	45.1
2457534	89 19 45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0
2457534.5	89 19 44.8	44.8	44.9	44.9	44.8	44.9
2457535	89 19 44.7	44.7	44.8	44.8	44.7	44.8
2457535.5	89 19 44.6	44.6	44.7	44.7	44.6	44.7
2457536	89 19 44.5	44.5	44.6	44.6	44.5	44.6
2457536.5	89 19 44.4	44.4	44.5	44.4	44.4	44.5
2457537	89 19 44.3	44.3	44.3	44.3	44.3	44.3
2457537.5	89 19 44.1	44.1	44.2	44.2	44.1	44.2
2457538	89 19 44.0	44.0	44.1	44.1	44.0	44.1
2457538.5	89 19 43.9	43.9	44.0	44.0	43.9	44.0
2457539	89 19 43.8	43.8	43.8	43.8	43.8	43.8
2457539.5	89 19 43.6	43.6	43.7	43.7	43.6	43.7
2457540	89 19 43.5	43.5	43.6	43.6	43.5	43.5
2457540.5	89 19 43.4	43.3	43.4	43.4	43.3	43.4

Глава 4

Наблюдения звезд

Для получения видимых мест звезд использовался пассажный инструмент (ПИ). Принцип его работы основан на том, что в момент пересечения звездой истинного меридиана, то есть в момент верхней или нижней кульминации объекта, его часовой угол t по определению равен нулю. Поэтому формула для определения звездного времени S упрощается.

$$S = T + u = \alpha + t$$

$$u = \alpha - T,$$

здесь T – время прохождения звезды через нить окулярного микрометра, t – часовой угол светила, u – искомая поправка часов.

ПИ является одним из классических астрометрических инструментов, изобретен в XVII веке, однако из-за более современного способа регистрации отсчетов времени (середина XIX века, нажатие кнопки) позволяет получать координаты с точностью, достаточной для сравнения с вычисленными ранее координатами.

Пассажный инструмент устанавливается на двух фундаментах, удерживающих горизонтальную ось вращения, перпендикулярно которой прикрепляется астрономическая труба. Для регистрации прохождений светил фиксируются моменты их прохождений через нити окулярного микрометра, расположенного в фокальной плоскости объектива. ПИ, на котором производились наблюдения, установлен на двух опорах, и его труба двигается в

плоскости меридиана. После такой установки инструмента на нем можно измерять прямые восхождения. Реже пассажный инструмент устанавливается в первом вертикале, тогда на нем определяют склонения звезд.

Ошибка полученных координат состоит из ошибки инструмента и ошибки наблюдателя (случайной и систематической). Причиной ошибки инструмента является то, что "инструментальный" меридиан всегда отличается от истинного. При обработке наблюдений учитывают такое смещение, разделяя его на три компоненты: азимут инструмента a , наклон горизонтальной оси i , коллимацию c . Случайная компонента уменьшается, если увеличить число измерений, систематическая складывается из личной разности и ошибки при наблюдении ярких звезд и труднее поддается измерению.

Выбор звезд для таблицы эфемерид

Согласно программе наблюдений, за 1 ночь требовалось получить координаты как минимум 10 зенитных и 10 южных звезд, причем кульминация таких светил должна быть верхней. Таблица прямых восхождений и склонений была получена из программы Stellarium, зенитные звезды имеют зенитные расстояния $0^\circ - 3^\circ$, южные имеют склонения $+20^\circ - 10^\circ$.

Описание методики наблюдений

Перед началом наблюдений производилась проверка уровня – необходимо, чтобы правое и левое значения не "зашкаливали". Далее устанавливалось звездное время, находилась из таблицы эфемерид подходящая по времени звезда. Зенитная появляется в поле зрения примерно за 2 минуты до кульминации, южная – за 1 минуту; различие объясняется тем, что скорость звезды пропорциональна косинусу ее склонения [10]. Еще примерно 1-2 минуты требуется на наведение трубы на светило и запись показаний уровня. После появления звезды в окуляре необходимо перевести ее так, чтобы она оказалась между двумя центральными нитями. Поскольку, как правило, такая доводка была сравнительно небольшой или (реже) отсутствовала, значения уровня можно считать достаточно точными.

Обработка результатов

Для получения наблюдаемых координат светил была написана программа на языке *c#*, алгоритм взят из [7]. В качестве входных данных следует предоставить дату начала наблюдений, количество звезд, номера этих объектов по каталогу *Hipparcos*, средний по нитям момент прохождения (в UTC) и показания уровня i для каждого светила.

Вначале вычисляются коэффициенты формулы Майера A_i, I_i , для этого используются эфемериды звезд из отдельного файла.

$$A_i = \sin z_i \sec \delta_i$$

$$I_i = \cos z_i \sec \delta_i$$

Из сферической астрономии зенитное расстояние для верхней кульминации $z_i = |\varphi - \delta_i|$, широта для Службы Времени принималась равной $\varphi = 59^\circ 56' 32''$.

Для каждой звезды производился пересчет времени прохождения из *UTC* в звездное время с учетом смены даты в процессе наблюдений. Алгоритм перевода к звездному времени взят из [2]. После этого учитывалась наклонность горизонтальной оси Ii .

Затем усреднялись по всем зенитным звездам моменты прохождения и азимутальные коэффициенты. Полученные значения обозначим $\bar{\alpha}_z, \bar{A}_z$.

После учета зенитных звезд используем азимутальные: найдем для каждой из них значение азимута a_j , отсюда получим азимут инструмента \bar{a} усреднением по a_j .

$$a_j = \frac{\bar{\alpha}_z - \alpha_j}{\bar{A}_z - A_j},$$

где α_j – время прохождения с учетом поправок уровня.

Результат работы программы – список номеров звезд по каталогу *Hipparcos*; наблюдаемые моменты кульминаций, исправленные за азимут и уровень; моменты кульминаций из каталога.

Результат наблюдений представлен таблицей 4.1, промежуточные значения можно найти в таблицах 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10. Азимут с 4 по 6 мая из-за отсутствия южных звезд среди измеренных был взят похожим на азимуты 7-9 мая. 9 мая инструмент был более точно установлен

в меридиан, из-за чего \bar{a} уменьшился почти на 5 секунд. В перерыве между наблюдениями 9 и 12 мая были получены предварительные результаты обработки. После анализа этих данных в список измеряемых объектов были добавлены южные звезды.

Кроме вышеперечисленных поправок, существует систематическая ошибка в фиксировании времени прохождения звезды через нить окуляра, впервые замеченная Бесселем и описанная им в [3]. Точность результатов, полученных 12-14 мая, является слишком низкой, чтобы вводить поправку за личную разность.

Таблица 4.1: результаты наблюдений

дата	количество звезд	зенитные	южные	азимут	$\Delta\alpha$
4 мая	6	6	0	-26.5	0.48
5 мая	23	23	0	-26.5	0.20
6 мая	24	24	0	-26.5	-0.84
7 мая	31	27	1	-26.58	-1.35
8 мая	31	29	1	-26.56	-1.72
9 мая	17	15	1	-26.79	-1.59
12 мая	35	15	19	-21.56	-7.51
13 мая	30	14	14	-21.91	-8.46
14 мая	32	9	20	-22.51	-9.69

Таблица 4.2: 4 мая

номер	α_{obs}			α_{calc}			номер	α_{obs}			α_{calc}		
	h	m	s	h	m	s		h	m	s	h	m	s
60978	12	30	43,94	12	30	42,67	61767	12	40	18,07	12	40	18,01
62512	12	49	23,53	12	49	21,78	62956	12	54	44,10	12	54	44,66
63503	13	1	25,52	13	1	25,64	64208	13	10	13,78	13	10	13,30

Таблица 4.3: 5 мая

номер	α_{obs}			α_{calc}			номер	α_{obs}			α_{calc}		
	h	m	s	h	m	s		h	m	s	h	m	s
60978	12	30	43,50	12	30	42,67	61767	12	40	19,14	12	40	18,01
62512	12	49	23,63	12	49	21,78	62956	12	54	44,25	12	54	44,66
64208	13	10	13,98	13	10	13,30	65530	13	26	31,03	13	26	33,23
66198	13	34	44,51	13	34	44,95	66700	13	40	57,84	13	40	57,19
67485	13	50	17,38	13	50	17,55	68184	13	58	02,98	13	58	02,54
77738	15	52	40,27	15	52	39,50	78527	16	2	13,82	16	2	11,69
79204	16	10	16,49	16	10	13,38	79804	16	17	34,75	16	17	31,94
80331	16	24	13,54	16	24	13,03	80991	16	32	41,57	16	32	39,81
82020	16	45	37,59	16	45	36,57	82860	16	56	02,64	16	56	07,35
84496	17	16	30,96	17	16	41,49	85290	17	25	56,95	17	25	54,21
86036	17	35	10,11	17	35	10,00	86499	17	40	54,01	17	40	52,59
87585	17	53	49,96	17	53	48,80							

Таблица 4.4: 6 мая

номер	α_{obs}			α_{calc}			номер	α_{obs}			α_{calc}		
	h	m	s	h	m	s		h	m	s	h	m	s
58259	11	57	42,62	11	57	43,86	60978	12	30	42,99	12	30	42,67
62956	12	54	43,27	12	54	44,66	63503	13	1	25,02	13	1	25,64
64532	13	14	17,13	13	14	16,99	65530	13	26	30,45	13	26	33,23
66198	13	34	44,07	13	34	44,95	66700	13	40	57,31	13	40	57,19
67485	13	50	16,88	13	50	17,55	68756	14	4	45,35	14	4	50,10
79125	16	9	23,49	16	9	22,31	79804	16	17	33,95	16	17	31,94
80331	16	24	13,33	16	24	13,03	80991	16	32	40,85	16	32	39,81
81451	16	38	23,88	16	38	22,89	82020	16	45	36,95	16	45	36,57
83289	17	1	31,00	17	1	29,61	83847	17	8	19,91	17	8	19,18
84496	17	16	18,31	17	16	41,49	85086	17	23	40,14	17	23	39,80
85692	17	31	00,74	17	30	59,46	86499	17	40	53,16	17	40	52,59
87478	17	52	41,03	17	52	37,31	90905	18	32	51,98	18	32	51,51

Таблица 4.5: 7 мая

номер	α_{obs}			α_{calc}			номер	α_{obs}			α_{calc}		
	h	m	s	h	m	s		h	m	s	h	m	s
56211	11	32	04,67	11	32	21,44	57399	11	46	49,97	11	46	54,46
58001	11	54	38,25	11	54	41,04	59774	12	16	12,38	12	16	13,59
60316	12	22	49,96	12	22	50,80	60978	12	30	42,79	12	30	42,67
62512	12	49	22,42	12	49	21,78	63503	13	1	24,81	13	1	25,64
64208	13	10	13,24	13	10	13,30	64532	13	14	16,30	13	14	16,99
65530	13	26	30,08	13	26	33,23	66700	13	40	57,08	13	40	57,19
67103	13	45	48,84	13	45	49,41	67485	13	50	16,90	13	50	17,55
78676	16	4	01,63	16	3	59,98	79804	16	17	34,11	16	17	31,94
80331	16	24	13,02	16	24	13,03	80991	16	32	41,07	16	32	39,81
81451	16	38	23,76	16	38	22,89	82020	16	45	37,13	16	45	36,57
82677	16	54	17,60	16	54	15,48	83289	17	1	31,03	17	1	29,61
83847	17	8	20,05	17	8	19,18	84465	17	16	18,75	17	16	16,00
85086	17	23	40,17	17	23	39,80	85692	17	31	00,87	17	30	59,46
86036	17	35	09,50	17	35	10,00	87585	17	53	48,81	17	53	48,80
89348	18	13	55,40	18	13	59,60	90156	18	23	53,01	18	24	08,00
91262	18	37	23,36	18	37	29,44							

Таблица 4.6: 8 мая

номер	α_{obs}			α_{calc}			номер	α_{obs}			α_{calc}		
	h	m	s	h	m	s		h	m	s	h	m	s
57399	11	46	49,65	11	46	54,46	58001	11	54	38,21	11	54	41,04
58989	12	6	24,98	12	6	28,57	59774	12	16	12,65	12	16	13,59
60316	12	22	49,33	12	22	50,80	60992	12	30	49,98	12	30	49,84
61767	12	39	40,91	12	40	18,01	62512	12	49	22,30	12	49	21,78
62956	12	54	43,19	12	54	44,66	63503	13	1	24,74	13	1	25,64
64208	13	10	12,67	13	10	13,30	64532	13	14	16,40	13	14	16,99
65530	13	26	29,85	13	26	33,23	77738	15	52	39,38	15	52	39,50
78527	16	2	12,92	16	2	11,69	79125	16	9	23,21	16	9	22,31
79804	16	17	33,85	16	17	31,94	80309	16	24	12,55	16	24	00,43
80991	16	32	40,77	16	32	39,81	81451	16	38	23,52	16	38	22,89
82020	16	45	35,86	16	45	36,57	82677	16	54	16,85	16	54	15,48
83289	17	1	30,99	17	1	29,61	83847	17	8	19,78	17	8	19,18
85086	17	23	40,26	17	23	39,80	85692	17	31	00,44	17	30	59,46
86499	17	40	53,14	17	40	52,59	87585	17	53	48,74	17	53	48,80
88349	18	2	46,44	18	2	45,25	89348	18	13	55,05	18	13	59,60
90156	18	23	52,92	18	24	08,00							

Таблица 4.7: 9 мая

номер	α_{obs}			α_{calc}			номер	α_{obs}			α_{calc}		
	h	m	s	h	m	s		h	m	s	h	m	s
77272	15	46	56,94	15	46	58,30	77738	15	52	37,99	15	52	39,50
78527	16	2	12,54	16	2	11,69	79125	16	9	22,86	16	9	22,31
79804	16	17	33,75	16	17	31,94	80331	16	24	13,30	16	24	13,03
80991	16	32	39,40	16	32	39,81	81451	16	38	23,25	16	38	22,89
82020	16	45	35,57	16	45	36,57	83289	17	1	30,82	17	1	29,61
83847	17	8	19,89	17	8	19,18	84496	17	16	42,29	17	16	41,49
86036	17	35	09,94	17	35	10,00	87585	17	53	48,16	17	53	48,80
89348	18	13	56,54	18	13	59,60	90156	18	23	52,23	18	24	08,00
91262	18	37	19,66	18	37	29,44							

Таблица 4.8: 12 мая

номер	α_{obs}			α_{calc}			номер	α_{obs}			α_{calc}		
	h	m	s	h	m	s		h	m	s	h	m	s
62512	12	49	21,97	12	49	21,78	63090	12	56	10,66	12	56	25,63
63608	13	2	45,56	13	2	59,41	64238	13	10	31,35	13	10	47,84
64852	13	18	11,52	13	18	25,85	65530	13	26	31,07	13	26	33,23
66198	13	34	42,91	13	34	44,95	66700	13	40	56,34	13	40	57,19
67275	13	47	50,04	13	48	02,34	77272	15	46	57,32	15	46	58,30
77516	15	50	12,82	15	50	28,52	78072	15	57	00,06	15	57	12,46
78527	16	2	12,63	16	2	11,69	79043	16	8	36,73	16	8	48,85
79349	16	12	09,07	16	12	19,84	79882	16	18	55,32	16	19	11,22
80331	16	24	13,15	16	24	13,03	80991	16	32	41,00	16	32	39,81
81451	16	38	24,04	16	38	22,89	82073	16	46	23,56	16	46	37,04
82504	16	52	15,36	16	52	25,98	82860	16	56	04,31	16	56	07,35
83613	17	5	55,37	17	6	08,22	84379	17	15	31,51	17	15	42,24
85086	17	23	40,03	17	23	39,80	85692	17	31	00,14	17	30	59,46
86499	17	40	52,89	17	40	52,59	86974	17	46	56,12	17	47	05,82
87585	17	53	48,38	17	53	48,80	87933	17	58	14,21	17	58	24,05
88290	18	2	20,03	18	2	35,02	88601	18	6	01,99	18	6	17,23
89104	18	11	20,66	18	11	19,08	89962	18	21	53,50	18	22	09,33
91262	18	37	22,00	18	37	29,44							

Таблица 4.9: 13 мая

номер	α_{obs}			α_{calc}			номер	α_{obs}			α_{calc}		
	h	m	s	h	m	s		h	m	s	h	m	s
59774	12	16	12,20	12	16	13,59	60742	12	27	34,34	12	27	45,03
61394	12	35	28,06	12	35	40,89	61941	12	42	13,36	12	42	29,66
62512	12	49	22,38	12	49	21,78	63090	12	56	10,58	12	56	25,63
63608	13	2	45,67	13	2	59,41	64208	13	10	23,54	13	10	13,30
65530	13	26	31,33	13	26	33,23	66700	13	40	56,68	13	40	57,19
78493	16	1	56,22	16	2	05,91	79125	16	9	22,99	16	9	22,31
79593	16	14	56,26	16	15	12,24	80331	16	24	13,54	16	24	13,03
80816	16	30	43,80	16	30	55,48	81451	16	38	23,77	16	38	22,89
82073	16	46	23,21	16	46	37,04	82677	16	54	17,34	16	54	15,48
83847	17	8	20,31	17	8	19,18	84379	17	15	31,32	17	15	42,24
85086	17	23	40,15	17	23	39,80	86032	17	35	28,35	17	35	41,62
86499	17	39	53,10	17	40	52,59	86974	17	46	55,89	17	47	05,82
87585	17	53	48,49	17	53	48,80	88048	17	59	38,70	17	59	55,60
88794	18	8	00,74	18	8	10,86	89348	18	13	57,47	18	13	59,60
89962	18	21	53,30	18	22	09,33	91262	18	37	22,00	18	37	29,44

Таблица 4.10: 14 мая

номер	α_{obs}			α_{calc}			номер	α_{obs}			α_{calc}		
	h	m	s	h	m	s		h	m	s	h	m	s
60742	12	27	34,16	12	27	45,03	61281	12	33	58,64	12	34	10,53
61941	12	42	12,94	12	42	29,66	62512	12	49	22,31	12	49	21,78
63090	12	56	10,05	12	56	25,63	63503	13	1	23,95	13	1	25,64
64238	13	10	30,94	13	10	47,84	65530	13	26	31,12	13	26	33,23
66249	13	35	15,51	13	35	31,77	66700	13	40	56,20	13	40	57,19
67275	13	47	49,49	13	48	02,34	78493	16	1	55,78	16	2	05,91
79125	16	9	22,91	16	9	22,31	79593	16	14	55,52	16	15	12,24
79882	16	18	54,70	16	19	11,22	80816	16	30	43,72	16	30	55,48
82504	16	52	14,70	16	52	25,98	83168	17	0	07,20	17	0	06,04
83847	17	8	20,13	17	8	19,18	84379	17	15	30,85	17	15	42,24
84833	17	20	49,66	17	21	02,14	85355	17	27	04,56	17	27	19,58
85693	17	31	13,03	17	31	24,01	86032	17	35	27,90	17	35	41,62
86974	17	46	55,47	17	47	05,82	87585	17	53	48,62	17	53	48,80
87933	17	58	13,65	17	58	24,05	88192	18	1	12,48	18	1	27,86
88771	18	7	53,20	18	8	07,53	89348	18	13	57,10	18	13	59,60
89962	18	21	52,76	18	22	09,33	91262	18	37	21,62	18	37	29,44

Глава 5

Выводы

- Показано, что в качестве фундаментального каталога следовало бы использовать FK6, работа над которым не закончена. Пока остается только Hipparcos, несмотря на эпоху 25-летней давности и нереалистичные собственные движения.
- Сравнение основных алгоритмов вычисления видимых мест показало, что они имеют расхождения на уровне $1''$, причины которых выяснить пока не удалось.
- Выполнены наблюдения звезд на пассажном инструменте, эфемериды объектов были получены из программы Stellarium.
- К сожалению, точность наблюдений оказалась невысокой, на уровне $10''$, что можно объяснить недостатком опыта, и должна быть повышена в будущем.

Литература

- [1] Астрономический ежегодник на 2016 год. ИПА РАН, СПб, 2015, 689 с
- [2] Абалакин В. К., Геодезическая астрономия и астрометрия. Справочное пособие/ В. К. Абалакин, И. И. Краснорылов, Ю. В. Плахов. "Картгеоцентр"—"Геодезиздат", 1996, 435 с
- [3] Бессель Ф. В., Высшая геодезия и способ наименьших квадратов/Ф. В. Бессель. Под редакцией, с введением и примечаниями Г. В. Багратуни, перевод с немецкого Н. Ф. Булаевского. Издательство геодезической литературы, Москва, 1961, 279 с
- [4] Блажко С. Н., Курс сферической астрономии/ С. Н. Блажко. 2-е изд. М.: Гостех-издат, 1954
- [5] Бойко В. Н., Алгоритм перевода координат звезд, заданных в системе FK4, к системе астрономических постоянных МАС (1976 г.), эпохе и равноденствию J2000 и приведения на видимое место/ В. Н. Бойко. "Алгоритмы небесной механики. Материалы мат. обеспечения ЭВМ" 48, Ленинград, 1986
- [6] Брумберг В. А., Расширенное объяснение к "Астрономическому ежегоднику"/ В. А. Брумберг и др.. Труды ИПА РАН. Вып. 10, СПб, 2004, 488 с
- [7] Витязев В. В., Небесные и земные координаты. Учебное пособие по астрометрической практике/В. В. Витязев и др.. Издательский дом СПб-ГУ, СПб, 2011, 314 с

- [8] Лавринович К. К. Бесселева реформа астрономии/ К. К. Лавринович. Издательство Калининградского государственного университета, Калининград, 2003, 161 с
- [9] Серова С. В., Программа вычисления видимых мест близполюсных звезд на момент кульминации на эфемеридном меридиане/ С. В. Серова. "Алгоритмы небесной механики. Материалы мат. обеспечения ЭВМ" 05, Ленинград, 1975
- [10] Цингер, Курсъ астрономіи (часть практическая)/Н. Цингер. Военная Типографія (въ зданіи Главного Штаба), СПб, 1899, 281 с
- [11] Bessel F. W., Fundamenta Astronomiae pro anno MDCCLV deducta ex observationibus viri incomparabilis James Bradley in specula astronomica Grenovicensi, per annos 1750-1762 institutis/ F. W. Bessel. Königsberg, 1818
- [12] Bangert J., User's Guide to NOVAS Version C3.1/J. Bangert et al. U. S. Naval Observatory, 2011, 124 с
- [13] SOFA Astrometry Tools. IAU, 2014, 77 с
- [14] Standards Of Fundamental Astronomy Board. IAU, 2015, 330 с