

главной оси инерции Cx). Средние движения полюсов P_ω и P по указанным эллипсам равны частоте Чандлера.

2°. Чандлеровскому движению полюса P_ω соответствует восьмеркообразное движение полюса экваториальной оси инерции e , для которого смещения вдоль экватора составляют 507,718 см, а отклонения от самого экватора являются весьма малыми ($\sim 0,048$ см).

3°. Сезонное возмущение движения полюса P_ω вызывает движение полярной оси инерции с тем же периодом. Траектория полюса P на плоскости P_0xy представляет собой эллипс с полуосями $a_a = 0,0287''$, $b_a = 0,0246''$ и с эксцентриситетом $e_a = 0,515$. Меньшая ось эллипса параллельна главной экваториальной оси инерции Земли Sy .

4°. Скорость движения полюса P по годичному эллипсу не остается постоянной. Ее минимальные значения имеют место при прохождении большей оси эллипса и составляют 306,8 град/год, а максимальные значения 422,4 град/год достигаются в моменты прохождения меньшей оси эллипса.

На основе формул (14) также были непосредственно вычислены координаты полюса по соответствующим значениям компонент угловой скорости Земли p , q для чандлеровского и для годового движений полюса оси вращения, рекомендованным МСВЗ [5]. Эти результаты представлены графически на рисунке.

В заключение работы отметим, что годичное движение полюса оси инерции Земли на основе данных наблюдений изучалось многими авторами. Одно из первых исследований этого явления выполнил А.Я. Орлов [9]. Изучая ряды широтных наблюдений более чем за 40 лет, он пришел к заключению, что среднее годовое колебание малой оси земного эллипсоида происходит с амплиту-

дой 0,03'' вокруг его наибольшей оси. Для объяснения этого явления обычно привлекаются метеорологические сезонные процессы на поверхности Земли, а также так называемый механизм "передачи движения от полюса инерции к полюсу оси вращения Земли" [4].

В данной работе фактически показано, что при интерпретации годового движения полюса оси инерции Земли должны учитываться также его смещения, вызванные вращательными деформациями.

Литература

1. Bursā M. // Bull. Astron. Inst. Czechosl. 1983. 34, №6. P.321.
2. Getino J., Ferrandiz J.M. // Celest. Mech. 1991. 51. P.35.
3. Barkin Yu. V. // Journées, 1995: Earth Rotation Reference System in Geodynamics and Solar System. Warsaw, Poland, September 18—20, 1995. P.83.
4. Куликов К.А. Изменяемость широт и долгот. М., 1962.
5. IERS Annual Report (1993). Central Bureau of IERS, July 1994.
6. Getino J., Ferrandiz J.M. // Celest. Mech. 1993. 57. P.279.
7. Stephenson F.R., Morrison L.V. // Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. A. 1995. 351. P.165.
8. Пудовкин И.М., Валуева Г.Е. // Геомагнетизм и аэронавигация. 1967. 7, №5. С.923.
9. Орлов А.Я. // ДАН. 1946. 51, №7. С. 507.

Поступила в редакцию
04.01.96

АСТРОНОМИЯ

УДК 681.373.826

ВЛИЯНИЕ НАКЛОНА ПЛОСКОСТИ ГИРОСКОПА НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ

В.Е. Жаров, С.Н. Маркова, М.В. Сажин

(ГАИШ)

В отделе службы времени ГАИШ создан лазерный гироскоп для определения параметров вращения Земли. В работе рассматривается влияние относительного наклона зеркал на точность определения этих параметров.

1. Введение

В отделе службы времени ГАИШ разработан лазерный гироскоп с пассивным резонатором для определе-

ния параметров вращения Земли с точностью $\delta\Omega_e/\Omega_e \sim 10^{-7}$, где Ω_e — угловая скорость вращения Земли. Для того чтобы прибор мог использоваться в астрономических и геофизических целях, необходимо достичь точ-

ности определения $\delta\Omega_e/\Omega_e \sim 10^{-9}$, что соответствует точности современных методов радиоинтерферометрии и лазерной дальнометрии. Для этого запланировано использование более мощного лазера с долговременной стабильностью по частоте лучше, чем 10^{-9} за 12 ч, и зеркал с более высоким показателем отражения (порядка 0,99).

Резонатор состоит из четырех зеркал, поэтому они определяют, вообще говоря, две плоскости, расположенные под некоторым углом друг к другу. При повышении точности до указанной величины станет актуальным вопрос о влиянии наклонов этих плоскостей на измеряемые величины.

Эта проблема анализируется в данной статье.

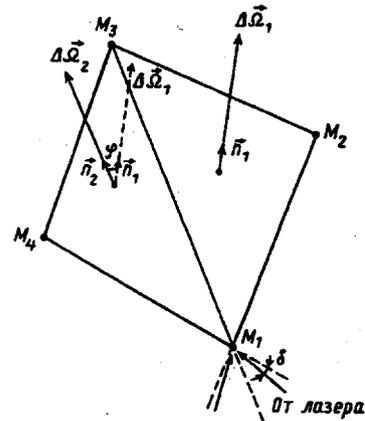
Для прикладного использования [1] разработаны трехзеркальные резонаторы, и эта проблема не возникает. При использовании гироскопов в геофизических целях необходимо разработать резонаторы больших размеров, имеющие, как правило, форму квадрата. Отношение площади к периметру для резонатора квадратной формы больше, чем для треугольного. У нашего гироскопа резонатор имеет форму квадрата со стороной 3,1 м. В Новой Зеландии немецкие ученые установили гироскоп с активным квадратным резонатором со стороной $\sim 0,87$ м, разрабатывается резонатор размерами $4,2 \times 4,2$ м [2,3]. В отличие от немецкого наш гироскоп установлен не на монолитном фундаменте. Поэтому возможны долгопериодические изменения положения зеркал относительно друг друга.

2. Основные уравнения

В работах [4,5] рассматривается определение вариаций вращения Земли при помощи лазерного гироскопа, имеющего съюстированный четырехзеркальный резонатор квадратной формы, называемый в дальнейшем идеальным, в котором центры всех четырех зеркал лежат в одной плоскости, а лучевой контур соответствует линиям, соединяющим центры зеркал. В этом случае, как показано в работе [6], измеряемый вектор $\delta\Omega_e$ перпендикулярен указанной плоскости. В реальном приборе возможна небольшая разъюстировка, когда реализуется следующая конфигурация: зеркала M_1, M_2, M_3 лежат в одной плоскости, а зеркала M_3, M_4, M_1 — в другой, причем нормали к этим плоскостям расположены под некоторым углом φ друг к другу (рисунок). Угол φ отличен от нуля, когда возбуждающий пучок входит под произвольным углом в систему резонатора. Такой резонатор имеет излом по диагонали M_1M_3 и результаты измерений можно представить вектором $\delta\Omega_e$, являющимся векторной суммой двух независимых векторов вращения $\Delta\Omega_1$ и $\Delta\Omega_2$, где $\Delta\Omega_1$ — вектор, перпендикулярный плоскости $(M_1M_2M_3)$, а $\Delta\Omega_2$ — вектор, перпендикулярный плоскости $(M_3M_4M_1)$.

”Изломанность” четырехзеркального резонатора возможна в случае входа возбуждающего лазерного пучка в пассивный резонатор под углом δ к линии, соединяю-

щей центры зеркал. Возможны вариации этого угла из-за различного температурного расширения частей фундамента и элементов установки. При этом замкнутый резонаторный контур возможен лишь при некотором наклоне зеркал относительно луча в идеальном резонаторе.



Уравнение плоскости $(M_1M_2M_3)$:

$$-x \sin \delta + y \sin \delta + z = 0,$$

плоскости $(M_3M_4M_1)$:

$$x \sin \delta - y \sin \delta + z = 0,$$

угол между нормальными к этим плоскостям определяется так:

$$\cos \varphi = \gamma^2(1 - 2 \sin^2 \delta),$$

где $\gamma = 1/\sqrt{1 + 2 \sin^2 \delta}$. Это и есть угол между векторами $\Delta\Omega_1$ и $\Delta\Omega_2$.

Определим нормальные векторы к двум плоскостям резонатора. Вектор, нормальный к плоскости $(M_1M_2M_3)$, есть

$$\mathbf{n}_1 = \gamma(-\sin \delta, \sin \delta, 1),$$

а к плоскости $(M_3M_4M_1)$ —

$$\mathbf{n}_2 = \gamma(\sin \delta, -\sin \delta, 1).$$

Для идеального резонатора разность частот света $\Delta f = f_2 - f_1$ при полном обходе резонатора равна

$$\Delta f = \frac{4S\Omega_e}{\lambda L} \sin \Psi,$$

где f_1, f_2 — частоты лучей, распространяющихся навстречу друг другу, S — площадь квадратного резонатора со стороной L (у нас $L = 3,1$ м), λ — длина волны лазера ($\lambda = 0,6328$ мкм), Ψ — широта, на которой установлен гироскоп. Частоты света f_1, f_2 пропорциональны скалярному произведению вектора вращения Земли и нормали к плоскости, определяемой лучами в резонаторе [6].

В нашем случае разность частот f_2 и f_1 при полном обходе изломанного контура выражается формулой

$$\Delta f' = \gamma \Delta f.$$

Отношение измеряемой нами частоты вращения Земли Ω_m к теоретически определенной частоте идеального резонатора Ω_e имеет вид

$$\frac{\Omega_m}{\Omega_e} = \gamma.$$

В случае абсолютно жесткого основания, на котором размещен резонатор, γ — постоянная величина. Сравнение измеренных значений Ω_m с данными Международной службы вращения Земли (МСВЗ) позволит найти величину угла δ и исключить, таким образом, "изломанность" резонатора. Учитывая, что при установке зеркал резонатора допускалась ошибка по высоте относительно их центров порядка $\pm 0,5$ мм, величина угла δ будет $\sim 30''$. Соответствующая величина параметра γ равняется $1,0 - 2 \cdot 10^{-8}$, т.е. измеренная величина скорости вращения будет отличаться от реальной в восьмом знаке после запятой.

В случае переменного значения угла δ возникнут переменные вариации измеряемого значения Ω_m . Эти переменные вариации определяются из выражения

$$\delta \Omega_m = -\Omega_e \gamma^3 \sin 2\delta \cdot \Delta \delta(t),$$

если зависимость $\delta(t)$ можно представить в виде $\delta(t) = \delta_0 + \varepsilon \cdot \sin(\frac{2\pi}{P}t + \psi)$, где δ_0 — постоянный угол, ε — амплитуда вариации, P — период изменения и ψ — произвольная фаза. Если амплитуда ε меньше δ_0 , то вариация скорости вращения будет

$$\delta \Omega_m \approx -2\pi \varepsilon \frac{\Delta t}{P} \Omega_e \cos(\frac{2\pi}{P}t + \psi) \sin 2\delta_0,$$

где Δt — время измерения разностной частоты $\Delta f'$.

Вариации угла $\delta(t)$ могут возникать из-за разницы температур различных частей фундамента. При этом меняется эффективная фазовая скорость света. Изменение фазовой скорости света можно вычислить из следующих соображений. Из-за градиента температуры будет меняться высота фундамента: $\delta h = \alpha \Delta T h$. Здесь α — коэффициент линейного расширения фундамента, ΔT — градиент температуры, h — высота фундамента над полом. Оценки показывают, что при изменении температуры на один градус h меняется на

$$\delta h = 5 \cdot 10^{-6} \frac{\Delta T}{1^\circ} h.$$

Перекокс фундамента определяется выражением

$$\theta = \frac{\delta h}{L},$$

и вызванное этим изменение длины оптического пути для двух плеч равно

$$\delta L_{\text{opt}} = 2,5 \cdot 10^{-11} \frac{h^2}{L} \left(\frac{\Delta T}{1^\circ} \right)^2. \quad (1)$$

Изменение оптического пути, необходимое для перестройки резонатора на другую моду, равно

$$\delta L_t \approx 0,09 \left(\frac{\lambda}{r} \right)^2 L, \quad (2)$$

где r — радиус зеркала резонатора. Выражения (1)-(2) мы получили, используя формулу для спектра собственных колебаний пустого резонатора [7, §1.3]. Тогда

$$\frac{\delta L_{\text{opt}}}{\delta L_t} \approx 2,7 \cdot 10^{-10} \left(\frac{r}{\lambda} \right)^2 \left(\frac{h}{L} \right)^2 \left(\frac{\Delta T}{1^\circ} \right)^2. \quad (3)$$

При $r = 2$ см, $h = 1$ м, $\Delta T = 1^\circ$ это отношение равно 0,04. Эта разность температур приводит к перекоксу фундамента на угол θ , приблизительно равный $0,3''$. Так как отношение (3) много меньше единицы, можно сделать вывод, что указанная величина ΔT не может приводить к перестройке резонатора на другие моды. В то же время мы наблюдали, что при изменении температуры на один градус происходит перестройка резонатора с моды TEM_{00} на TEM_{01} . Это возможно из-за жесткости конструкции резонатора. Изгиб металлических труб, вызванный различием между коэффициентами термического расширения стали и кирпича, из которого сложен фундамент, приводит к значительному изменению длины оптического пути. Из отношения $\delta L_{\text{opt}}/\delta L_t = 0,04$ можно вычислить, что угол θ будет равен $8''$. Указанный изгиб будет приводить к вариации измеренной скорости вращения Земли порядка $1 \cdot 10^{-8}$ при $\Delta t = 3$ ч. Угол θ меняется из-за изменения температуры с периодом, равным 1 сут. Из уравнения (1) видно, что изменение длины оптического пути пропорционально ΔT^2 . Поэтому при уменьшении вариации температуры в десять раз влияние изгиба труб уменьшится в сто раз.

Генерация поперечных мод является чисто паразитным эффектом. Она сбивает следящую систему гироскопа и должна подавляться. Это возможно путем температурной стабилизации системы с точностью $0,1^\circ$, когда изменение длины оптического пути становится значительно меньше, чем необходимо для перестройки мод.

3. Заключение

Если лазерный пучок вводится в резонатор под углом δ к линии, соединяющей центры зеркал, то в результате измеренная скорость вращения Земли будет отличаться от реальной. Разность скоростей постоянна, если угол δ постоянен, и может достигать величины $2 \cdot 10^{-8}$. Этот эффект можно обнаружить при калибровке инструмента из сравнения полученных данных с данными МСВЗ. Его нужно учитывать, если точность наших измерений $\sim 10^{-9}$. Вариации угла δ приводят к ошибкам измерения скорости вращения Земли порядка $1 \cdot 10^{-8}$ при времени накопления сигнала, равном 3 ч. Для уменьшения ошибок эти вариации должны подавляться температурной стабилизацией фундамента и взаимной развязкой различных частей гироскопа.

Литература

1. *Серегин В.В., Кукулиев Р.М.* Лазерные гиометры и их применение. М., 1990.
2. *Bilger H.R., Stedman G.E., Li Z. et al.* // IEEE Trans. Instrum. and Measur. 1995. 44, N2. P.468.
3. *Stedman G.E., Bilger H.R., Li Z. et al.* // Aust. J. Phys. 1993. 46. P.87.
4. *Жаров В.Е., Маркова С.Н., Сажин М.В., Федосеев Е.Н.* // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1992. №1. С. 85 (Moscow University Phys. Bull. 1992. N1. P.86).

5. *Жаров В.Е., Крайнов В.А., Маркова С.Н., Сажин М.В.* // Там же. 1995. №3. С. 81.
6. *Chow W.W., Gea-Banacloche J., Pedrotti L.M. et al.* // Rev. Mod. Phys. 1985. 57, N1. P.61.
7. *Ананьев Ю.А.* Оптические резонаторы и проблема расходимости лазерного излучения. М., 1979.

Поступила в редакцию
06.05.96

АСТРОНОМИЯ

УДК 524.388

**ИЕРАРХИЧЕСКИЕ ЗВЕЗДНЫЕ СКОПЛЕНИЯ
МАКСИМАЛЬНОЙ НАСЕЛЕННОСТИ**

В.Г.Сурдин
(ГАИШ)

Показано, что в Галактике могут существовать иерархические звездные системы, содержащие десятки компонентов. Их поиск возможен с помощью космических астрометрических инструментов и обещает при положительном исходе дать ценнейший материал для звездной космогонии.

1. Введение

Все звезды являются членами звездных систем — двойных и кратных звезд, рассеянных и шаровых скоплений, галактик. За исключением двойных звезд, каждая из этих систем может иметь один из двух типов внутренней организации: иерархический или хаотический. Двойные системы в этом смысле представляют вырожденный случай, обладающий крайней степенью устойчивости. Внутренняя структура систем, начиная с тройных, может быть представлена двумя характерными типами — иерархическим и хаотическим. Пример кратной звезды хаотического типа (С-системы) дает Трапеция Ориона, у которой взаимные расстояния между ее четырьмя звездами одного порядка. Эти системы крайне неустойчивы и распадаются за время, близкое к динамическому. Существуют также кратные системы иерархического типа (Н-системы), обладающие асимптотической устойчивостью. Примеры таких систем дают нам кратные звезды типа ϵ Луг, состоящие из двух относительно тесных пар, разделенных значительным расстоянием (рис.1). На каждом уровне иерархии динамика такой системы близка к динамике двойной звезды.

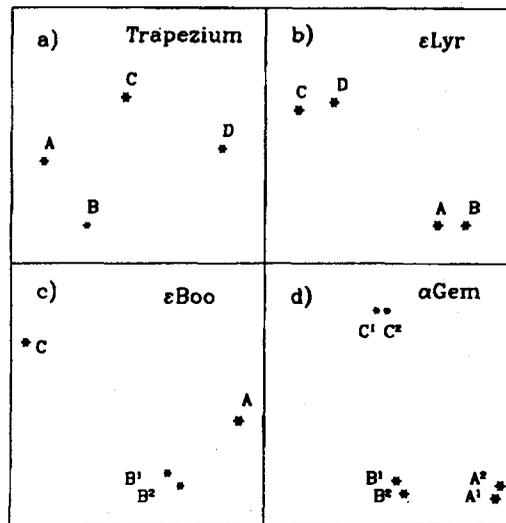


Рис.1. Примеры С- и Н-систем: а) 4-кратная хаотическая система Трапеция Ориона; б) и в) 4-кратные иерархические системы ϵ Лира и ϵ Волопаса двух крайних типов упаковки: ϵ Луг относится к типу $(n + n)$ и имеет два уровня иерархии ($H = 2$), а ϵ Вово принадлежит к типу $(n + 1)$ и имеет $H = 3$; д) 6-кратная Н-система α Близнецов (Кастор) имеет промежуточный тип упаковки и $H = 3$. Масштаб на рисунках б), в) и д) не выдержан.