

## АСТРОНОМИЯ

УДК 621.373.826

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО ГИРОСКОПА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ

В. Е. Жаров, В. А. Крайнов, С. Н. Маркова, М. В. Сажин

(ГАИШ)

Проведены измерения сейсмических шумов и вариаций температуры в помещении, где установлен лазерный гироскоп. Показано, что основной причиной, ограничивающей точность гироскопа, является нестабильность температуры фундамента. Определенная экспериментально добротность резонатора оказалась в 4—5 раз меньше расчетной.

## 1. Введение

Повышению точности измерения угловой скорости вращения Земли  $\Omega$  (и связанного с ней всемирного времени), увеличению временного разрешения и осуществлению непрерывности наблюдений (вне зависимости от погодных условий) в последние годы уделяется значительное внимание [1]. В первую очередь это обусловлено интересом геофизиков к связи вращения Земли с процессами в океанах, атмосфере, с присутствием жидкого ядра и др. [2]. Указанные процессы приводят к вариациям вращения Земли порядка  $10^{-9}$   $\Omega$ .

В настоящее время наблюдения проводятся на радиоинтерферометрах, лазерных дальнометрах. Успешно развивается и дает высококачественные результаты система глобального определения местоположения (GPS) [3].

Для изучения высокочастотных вариаций вращения Земли предлагаются лазерные гироскопы [4, 5] и гироскопы, основанные на эффекте сверхтекучести гелия [3, 6].

В настоящей работе изучаются характеристики лазерного гироскопа с пассивным резонатором [7], создаваемого в отделе службы времени ГАИШ, и прогнозируются возможности этого прибора.

## 2. Схема и принцип работы гироскопа

Из имеющихся схем лазерных гироскопов предпочтение было отдано гироскопу с пассивным резонатором, так как в этом случае модовая структура лазерного света в резонаторе определяется лишь геометрическими параметрами пассивного резонатора, нет влияния процессов, происходящих в активной лазерной среде (приводящих к неоднородности показателя преломления, переменному коэффициенту усиления среды), отсутствует эффект «затягивания частоты» [8, 9].

Блок-схема прибора показана на рис. 1. Резонатор квадратной формы со стороной 3,1 м образован двумя плоскими (1, 3) и двумя сферическими зеркалами (2, 4). Коэффициенты отражения плоских зеркал при падении луча под углом  $45^\circ$  равны 96%, а сферических — 99%. Сферические зеркала установлены на пьезокерамических столбиках, что позволяет осуществлять их перемещение (до 2 мкм) для подстройки резонатора.

Гелий-геоновый лазер ЛГН-303 генерирует излучение основной

TEM<sub>00</sub>-моды мощностью 1,5 мВт. На выходе лазера ставится светоделительный кубик, далее оба пучка пропускаются через согласующую систему [7] (на рисунке не показана) и вводятся в резонатор через плоское зеркало 1.

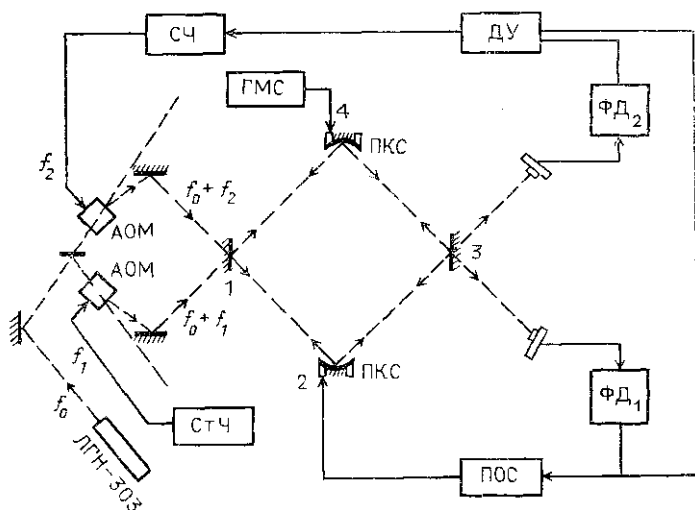


Рис. 1. Блок-схема лазерного гироскопа: АОМ — акусто-оптический модулятор, СЧ — синтезатор частоты, СтЧ — стандарт частоты, ДУ — дифференциальный усилитель, ФД — фотодетектор, ГМС — генератор модулирующего сигнала, ПОС — петля обратной связи, ПКС — пьезокерамические столбики, 1, 3 — плоские полупрозрачные зеркала, 2, 4 — сферические зеркала

Для стабильной работы лазера необходимо, чтобы возвращающийся из пассивного резонатора луч не попадал обратно в лазер и не вносил возмущения в собственный лазерный резонатор. Поэтому в вводной системе были использованы невзаимные оптические элементы — акустооптические модуляторы, отклоняющие лазерный луч от первоначального направления и смещающие частоту излучения  $f_0$ . Для луча, распространяющегося по часовой стрелке, это смещение постоянно и равно  $f_1=25$  МГц. Частота света, распространяющегося в противоположном направлении, смещается на переменную величину  $f_2$ . Разность частот  $f_2-f_1$  является измеряемой величиной:

$$\Delta f = f_2 - f_1 = \frac{4S\Omega}{\lambda L} \sin \varphi,$$

где  $S, L$  — площадь и периметр резонатора,  $\lambda=0,63$  мкм — длина волны,  $\varphi$  — широта.

Резонатор настраивается на частоту  $f_0+f_1$  с помощью петли обратной связи (ПОС), перемещающей сферическое зеркало 2. Необходимый для работы ПОС сигнал получается на выходе детектора ФД1. Для устойчивой работы ПОС сферическое зеркало 4 колеблется с частотой  $f_m=2$  кГц и амплитудой, равной десятым долям  $\lambda$ . Такая модуляция резонатора позволяет создать более простую и надежную ПОС [10].

Выходной сигнал с фотодетектора ФД2 управляет синтезатором частоты  $f_2$ . Для уменьшения шумов, общих для обоих пучков, сигнал с ФД1 предварительно вычитается из сигнала с ФД2. Таким обра-

зом, ПОС настраивает резонатор на частоту  $f_0 + f_2$  варьированием частоты  $f_2$ .

Оптический контур вакуумируется. Вакуумная система состоит из труб, сделанных из нержавеющей стали, и полостей для установки зеркал. Применяется трехступенчатая система откачки: форвакуумный насос, цеолитовый и магниторазрядный диодный насосы. Такая схема позволяет нам достигать вакуума до  $10^{-5}$  мм рт. ст.

### 3. Теоретические возможности созданной установки.

#### Теоретический предел точности измерений

Изменение параметров гироскопа: периметра  $\delta l/l$ , частоты лазера  $\delta f/f_0$ , наклона оси вращения к плоскости контура  $\delta\varphi$  приводят к изменению масштабного множителя  $4Sf_0/(cL)$ , где  $c$  — скорость света. Эти вариации даже при неизменной скорости вращения Земли  $\Omega$  приводят к вариациям измеряемой частоты  $\Delta f$ :

$$\delta(\Delta f) = \frac{f_0 \Omega}{c} \left( \frac{\delta \Omega}{\Omega} + \frac{\delta l}{l} + \frac{\delta f}{f_0} + \text{ctg} \varphi \delta \varphi \right) \sin \varphi,$$

где  $l$  — длина плеча квадратного резонатора. Чтобы определить  $\delta \Omega/\Omega$  с погрешностью  $10^{-9}$  за сутки, остальные параметры должны изменяться с погрешностью менее  $10^{-9}$ .

Рассмотрим возможные источники флуктуаций.

1. Стабильность частоты лазера должна быть меньше  $10^{-9}$ . Используемый в эксперименте лазер ЛГН-303 имеет паспортную стабильность частоты не более  $10^{-8}$ .

2. Изменения периметра резонатора из-за термического расширения фундамента не должны превышать половину длины волны используемого света, что соответствует изменению температуры на  $\approx 0,005^\circ$  за сутки.

3. Случайные сейсмические колебания зеркал тоже не должны превышать  $\lambda/2$ .

Теоретический предел точности определения  $\Omega$  связан с ошибкой  $\delta f$  измерения разностной частоты  $f_2 - f_1$ :

$$\delta \Omega = \frac{\lambda L}{4S} \delta f.$$

Ошибка  $\delta f$  при оптимальной амплитуде модуляции, как показано в [8], равна

$$\delta f \approx \frac{\sqrt{2} \Delta f_s}{\sqrt{N_{\text{ph}} \eta \tau}},$$

где  $N_{\text{ph}}$  — среднее число фотонов в секунду, попадающих на фотодетектор, эффективность которого равна  $\eta$ ,  $\tau$  — время интегрирования. Величина  $\Delta f_s$  есть полная ширина спектральной линии резонатора, измеряемой на половине интенсивности. Она связана с добротностью резонатора  $Q = 2\pi L/(\alpha \lambda)$  выражением

$$\Delta f_s = f_0/Q,$$

где  $\alpha$  — коэффициент суммарных потерь в резонаторе.

Учитывая, что  $N_{\text{ph}} = 1,5 \cdot 10^{14}$  фотон/с в каждом из пучков,  $\eta \approx 0,7$ ;  $\alpha \approx 0,1$ ;  $f_0 = 4,8 \cdot 10^{14}$  Гц, получим  $Q \approx 1,2 \cdot 10^9$  и  $\Delta f_s \approx 0,4$  МГц. Следовательно, теоретический предел точности  $\delta \Omega$  равен:

$$\delta\Omega \approx \begin{cases} 5 \cdot 10^{-6} \Omega & \text{при } \tau = 1000 \text{ с,} \\ 5 \cdot 10^{-7} \Omega & \text{при } \tau = 1 \text{ сут.} \end{cases}$$

Таким образом, гироскоп с используемым лазером и зеркалами имеет невысокую чувствительность. Тем не менее на первом этапе ее вполне достаточно, чтобы обнаружить вариации вращения Земли.

При замене лазера на более мощный ( $\sim 100$  мВт) и зеркал на зеркала более высокого качества можно достичь  $\delta\Omega = 10^{-8} \Omega$  при  $\tau = 1$  сут.

#### 4. Изучение температурных и сейсмических колебаний

Согласно полученной оценке точности можно считать, что вариации частоты лазера не являются критичными. Поэтому основным источником ошибок будут вариации температуры и микросейсмические смещения оптических элементов.

##### 1°. Исследования сейсмических колебаний фундамента

В 1990 г. в течение трех суток проводились измерения вибраций фундамента телескопа, не связанного со стенками помещения. Резонатор гироскопа был расположен в подвале, на нижней части фундамента. При измерении использовались датчики двух типов — пьезокерамический датчик ускорения и индуктивный сейсмодатчик. Измерения, выполненные двумя принципиально отличными датчиками, привели к идентичным спектрам. Это свидетельствует о том, что получены истинные спектры вибраций фундамента, а не шумы используемой измерительной аппаратуры.

На рис. 2 представлен спектр вертикальных вибраций в диапазоне 0—500 Гц. Максимальный уровень вибраций наблюдался в районе

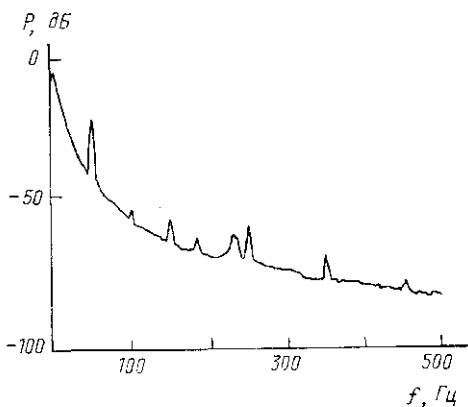


Рис. 2. Спектр вертикальных вибраций фундамента в диапазоне 0—500 Гц

$(1 \pm 0.03) \cdot 10^{-9} \text{ м} = 0,1 \text{ \AA}$ , что соответствует  $10^{-5} \lambda$ .

Особый интерес представляла проблема определения направления максимальной составляющей вибраций фундамента. Из рис. 3, а, б видно, что горизонтальные составляющие в среднем на 10 дБ меньше по амплитуде, чем вертикальные, а флуктуации вибраций на частоте 210—230 Гц отсутствуют. Это показывает, что горизонтальными вибрациями можно пренебречь в нашем случае.

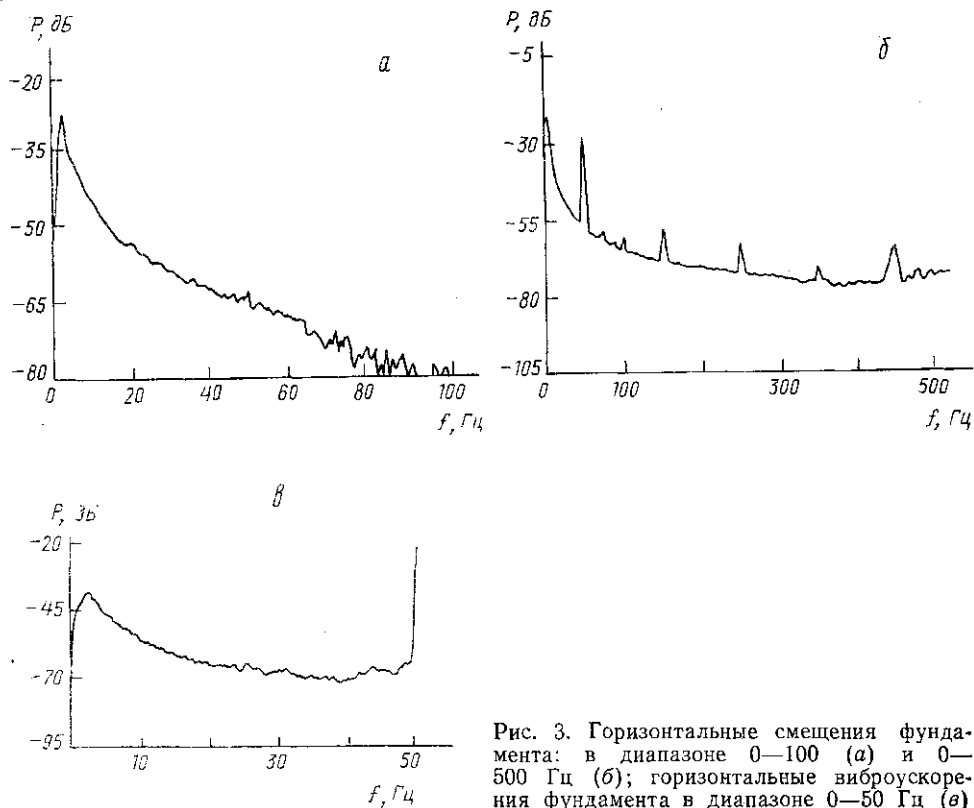


Рис. 3. Горизонтальные смещения фундамента: в диапазоне 0—100 (а) и 0—500 Гц (б); горизонтальные виброускорения фундамента в диапазоне 0—50 Гц (в)

На рис. 3, в представлен спектр вертикальных виброускорений фундамента в диапазоне частот 0—50 Гц. Максимальный уровень вибраций наблюдается в диапазоне 2—3 Гц. На частоте 3 Гц смещение составляло  $5,6 \cdot 10^{-5} \text{ м} = 5600 \text{ \AA}$ . Но на этой частоте фундамент совершает вертикальные и горизонтальные колебания как единое целое монолитное тело, т. е. все части фундамента колеблются синфазно.

Все сказанное выше дает нам возможность утверждать, что естественные колебания фундамента не влияют на работу лазерного гироскопа.

## 2°. Исследования колебаний температуры в помещении

Как сказано выше, к стабильности температуры в подвале башни, где установлен гироскоп, предъявляются очень строгие требования. Термостатирование такого большого помещения является достаточно трудной задачей. Частично данную проблему решает использование устройства стабилизации длины резонатора [10]. Однако для того чтобы выделить реальные вариации скорости вращения Земли, необходимо непрерывно измерять температуру фундамента. Это даст возможность исключить из значений  $\Delta f$  температурные вариации.

Для изучения распределения температуры внутри фундамента использовалась традиционная схема с мостовым включением термосопротивлений.

Измерения проводились 17—18 октября 1990 г. с 18 ч 30 мин до 6 ч. Наружная температура воздуха изменилась за это время с 10 до 5 °С. Изменение разностной температуры на одном из плеч резонатора показано на рис. 4. Видно, что один из углов фундамента остывал

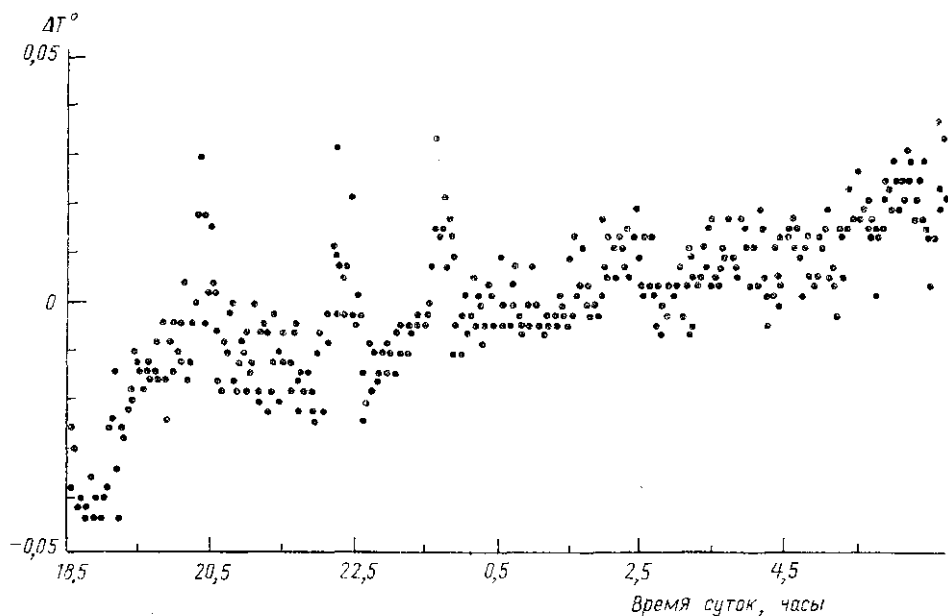


Рис. 4. Изменение разностной температуры на одном из плеч резонатора

быстрее другого — примерно на 0,002 град/ч; эта разница температур приводит к изменению  $\delta l/l \sim 10^{-8}$ , что пока не сильно влияет на показания гироскопа. Однако это говорит о существовании внутри фундамента тепловых потоков, которые необходимо будет учитывать при вычислении температурных вариаций длины резонатора.

### 3°. Измерение добротности резонатора

Добротность резонатора зависит от возбуждающей резонатор энергии и от потерь в резонаторе. Для увеличения доли энергии лазера, переходящей в энергию собственных мод резонатора, была рассчитана и собрана согласующая система [7], что позволило более эффективно использовать выходную энергию лазера. Потери внутри пассивного резонаторного контура определяются качеством покрытия зеркал, значением их коэффициента отражения и дифракционными потерями на зеркалах (в случае вакуумированного контура), а также нестабильностью резонатора. Поэтому сравнение измеренной добротности с теоретическим значением позволяет судить о реальных возможностях гироскопа.

Для измерения добротности использовалось изменение частоты продольных колебаний лазера во время выхода его на режим. При этом на экране осциллографа можно наблюдать спектр собственных частот резонатора (рис. 5). Интервал между соседними частотами одинаков и равен  $c/2L \approx 12,1$  МГц.

Ширина линии в нашем случае определяется амплитудой моду-

лирующего сигнала (на рис. 5 показан спектр при амплитуде модуляции, равной 30 В). Провал в центре линии связан с работой ПОС [10].

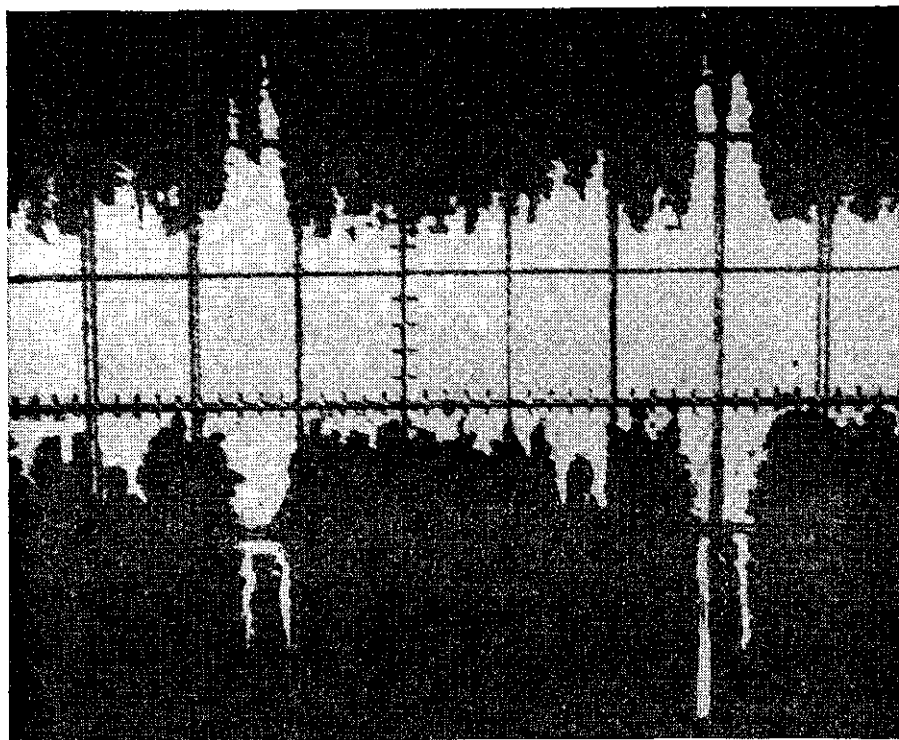


Рис. 5. Осциллограмма собственных частот резонатора при амплитуде модуляции 30 В

Изменяя амплитуду модуляции, можно определить ширину линии резонатора. Как оказалось, модуляция с амплитудой 30 В меняет собственную частоту резонатора. При этом интенсивность линии уменьшается примерно в 2 раза. Таким образом, ширина линии резонатора оказалась равной  $\sim 1,7\text{--}2,0$  МГц, т. е.  $Q \approx (0,24\text{--}0,28) \cdot 10^9$  (см. рис. 5). Измеренная добротность резонатора оказалась, таким образом, в 4—5 раз меньше расчетной, полученной по формуле, приведенной в работе [8].

## 5. Заключение

Как показали измерения сейсмических шумов и температуры, основным фактором, ограничивающим возможности гироскопа в определении вариаций скорости вращения Земли, будут изменения температуры фундамента. Учет тепловых потоков внутри фундамента приведет к достаточно сложной модели для исключения последствий термического расширения.

Измеренные добротности резонатора достаточно хорошо согласуются с теоретическими расчетами. Это говорит о хорошем качестве как оптических, так и механических деталей резонатора.

Авторы благодарны проф. Н. В. Кравцову за многочисленные и

полезные обсуждения и А. И. Иванникову за помощь при измерении сейсмических шумов. Работа выполнена по гранту А-02-027 (ESO) Южной Европейской обсерватории.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Feissel M., Gambis D.//Adv. in Space Research. Pergamon Press. 1993. 13, N 11. P. 143.
2. Мориц Г., Мюллер А. Вращение Земли: теория и наблюдения. Киев, 1992.
3. Carter W. E., Robertson D. S.//Adv. in Space Research. Pergamon Press, 1993. 13, N 11. P. 197.
4. Блинов Н. С., Жаров В. Е., Сажин М. В. и др.//Proc. Intern. Symp. «Geodesy and Physics of the Earth», 1988. Potsdam, 1989. N 102, part 1. P. 59.
5. Höling B. et al.//Appl. Phys. 1992. B55. P. 46.
6. Hess G. B.//Nature. 1992. 359. P. 192.
7. Жаров В. Е., Маркова С. Н., Сажин М. В. и др.//Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1992; 33, № 1. С. 85.
8. Ezekiel S., Balsamo S. R.//Appl. Phys. Lett. 1977. 30. P. 478.
9. Sanders G. A., Prentiss M. G., Ezekiel S.//Opt. Lett. 1981. 6. P. 569.
10. Крайнов В. А., Жаров В. Е.//Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1995. 36, № 2. С. 103.

Поступила в редакцию  
27.07.94