

СПЕКТРОСКОПИЯ ЗЕМНЫХ КОЛЕБАНИЙ С ПОМОЩЬЮ ГРАВИТАЦИОННО-ВОЛНОВЫХ ИНТЕРФЕРОМЕТРОВ

А.В.Копеев, В.Н.Руденко

*Государственный астрономический институт им.П.К.Штернберга
Московский государственный университет
119899 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 14 апреля 1994 г.

Рассматривается возможность использования большебазовых гравитационно-волновых антенн на свободных массах в качестве высокочувствительных наклономеров для исследования глобальных геодинамических характеристик.

В настоящее время начато финансирование строительства двух лазерных гравитационно-волновых антенн на свободных массах с базой в несколько километров: проект LIGO в США [1] и совместный франко-итальянский проект VIRGO [2]. Эти установки должны обеспечить регистрацию метрических возмущений от $h = 10^{-21}$ до $h = 10^{-23}$ по мере совершенствования измерительной аппаратуры; при этом полоса приема $\approx 10^3$ Гц, а диапазон принимаемых частот ≈ 10 Гц – 2кГц [1–3]. Практическая реализация таких экстремальных характеристик связана с нетривиальным техническим обеспечением [1, 2], что делает эти проекты весьма дорогостоящими предприятиями, оправданными фундаментальностью лишь одной конечной цели – овладения новым гравитационно-волновым каналом астрофизической информации. В данной заметке мы обращаем внимание на принципиальную возможность другого независимого применения данных установок для решения актуальных задач геофизики, в частности, изучения глобальных характеристик системы "ядро – мантия". Ниже указываются конкретные геодинамические эффекты, разъясняется идея их измерения гравитационно-волновыми интерферометрами, обсуждаются инструментальные и фоновые ограничения чувствительности.

1. Интегральные физические характеристики Земли, такие как коэффициенты упругости (числа Лява), величины потерь и их спектры измеряются по реакции Земли на импульсные или периодические возбуждения глобального характера. Импульсное возбуждение при сильных землетрясениях позволяет регистрировать собственные земные моды в диапазоне частот выше 10^{-3} Гц [4, 5]. Колебания ядра отвечают более низким частотам, где периодическое возбуждение обеспечивается приливным воздействием лунно-солнечной системы. При этом амплитудно-фазовая реакция упруго-вязкой Земли на приливное возбуждение описывается суммой гармонических колебаний типа $k_i A_i \sin(\omega_i t + \phi_i + \kappa_i)$, где k_i – безразмерный коэффициент увеличения упруго-вязкой Землей амплитуды A_i приливной гармоники с частотой ω_i и начальной фазой ϕ_i ; κ_i – фазовая поправка на затухание [5]. Для количественной ориентации укажем, что на широте 47° полная величина вертикального смещения земной коры вследствие прилива составляет 35–40 см, изменение силы тяжести 100–200 мк/Гал ($1 - 2 \cdot 10^{-7} g$); и отклонение отвесной линии 0,01 – 0,03 угл.сек. Измеряемые гравиметрами и наклономерами амплитудные факторы k_i традиционно обозначаются δ_i и γ_i и связаны с числами Лява простыми линейными соотношениями [6]. Возможность спектроскопии вынужденных колебаний Земли (измерения амплитуд и фаз приливных гармоник), равно как и наблюдения собственных

колебаний ядра, определяется инструментальной чувствительностью и возможностью фильтрации наблюдаемого эффекта на шумовом геофизическом фоне. Собственные шумы криогенных гравиметров [7] в суточной и полусуточной полосах составляют несколько нГал ($2 - 5 \cdot 10^{-12} g$), или $0,1 \text{ мкГал/Гц}^{1/2}$. При этом относительная точность определения амплитудных факторов δ_i составляет $\sim 0,1\%$. Наклонометры в лучшем случае обеспечивают чувствительность $\sim 0,0001 \text{ угл.сек/Гц}^{1/2}$ и относительную точность определения γ_i не более 1% [8]. Оба типа приборов успешно использовались для регистрации фундаментального эффекта, предсказанного в [9], так называемого "резонанса жидкого ядра", за счет многолетнего накопления данных, см. [10] для гравиметров и [11] для наклонометров. Однако увеличение относительной точности даже на порядок позволило бы детально исследовать эффект [9], уточнить форму границы "ядро - мантия" и добротность ядра. Отметим также актуальность тонкого разрешения спектра собственных колебаний Земли [4] и наблюдения собственных колебаний ядра с основным периодом, близким к 14 ч [7], и внутреннего ядра с периодом 3ч 18 мин из-за колебаний барицентра системы "Земля - Луна" [12].

2. Лазерная гравитационная антенна на свободных массах в принципе может рассматриваться как двухкоординатный наклономер с потенциальной чувствительностью на несколько порядков выше достигнутого уровня. Долговременный "дежурный" режим работы гравитационной антенны естественно обеспечит возможность многолетнего накопления данных. Поясним принцип работы такой антенны как наклонометра и дадим оценку чувствительности.

Антенна [1, 2] является интерферометром Майкельсона (ИМ), в плечи которого включены высокодобротные резонаторы Фабри-Перо (ФП), образованные, в свою очередь, плоскими входными и сферическими выходными зеркалами, являющимися в то же время низкочастотными механическими маятниками с периодами порядка 1 сек. Нулевая интенсивность на выходе ИМ поддерживается следящими системами для частот ниже 10 Гц. Таким образом, интересующая нас информация о медленных движениях зеркал дается сигналами ошибок в цепях обратной связи. Отдельные следящие системы отвечают за "частотную расстройку" (поддержание фиксированной базы ФП) и за "юстировку соосности" (совпадение оси луча с осью резонатора). Имеется по меньшей мере три независимых фотодетектора выходных сигналов: один на выходе ИМ и два - за концевыми сферическими зеркалами ФП-плечей. Работа следящих систем, поддерживающих юстировку ФП, строится на детектировании первой неосевой моды TEM_{10} на фоне основной рабочей моды TEM_{00} . При этом используется дополнительная подмодуляция на разностной частоте мод, а ФП-фотодетекторы имеют квадратурную пространственную структуру (так называемая "техника Андерсона" [13]). Замечательно то, что сигнал ошибки, создаваемый наклонами плоского зеркала (смещения нормально лучу вырождены), отличается по фазе на $\pi/2$ от сигнала ошибки, производимого боковыми сдвигами сферического зеркала (чистые наклоны вырождены). Таким образом, плоское зеркало может рассматриваться как пробная масса отвеса-наклонометра, а сферическое - как репер. Два плеча ИМ образуют двухкоординатный наклономер. (Ресайклинг - "запирание" уходящего света в интерферометре за счет размещения дополнительного полупрозрачного зеркала на пути входного луча - перемещивает возмущения плеч, но не исключает возможности разделения "сигналов ошибки" за счет различной фазовой окраски [2]).

Естественными причинами, ограничивающими точность систем, следящих за наклонами зеркал, являются дробовой шум фототока и тепловой шум подвесок зеркал.

а) Ограничения флуктуаций фототока

Величина разьюстировочного сигнала, соответствующего отклонению зеркала $\Delta\alpha$, в технике Андерсона [13] дается следующей формулой:

$$\Delta i_s = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{4\pi e \eta \lambda}{\hbar c} P_0 T J_0(m) J_1(m) \frac{\Delta\alpha}{\alpha_0}, \quad T = \frac{2}{1 - R_1} (1 - R_2^2), \quad (1)$$

где, кроме констант (заряд электрона e , скорость света c , постоянная Планка \hbar), входят параметры установки: длина волны $\lambda = 1,04 \cdot 10^{-5}$ см, квантовый выход фотокатода $\eta = 0,8$, коэффициенты отражения плоского $R_1 = 0,98$ и сферического $R_2 = 0,99995$ зеркал. Проектная мощность, попадающая на фотодиод $P_{pd} = P_0 T = 5$ В; $J_0(m)$ и $J_1(m)$ – Бесселевы функции основной и первой внеосевых мод (при глубине модуляции $m = 0,2$ их значения есть $J_0 \simeq 1,0$; $J_1 \simeq 0,1$). Принципиальный параметр, определяющий крутизну преобразования угловых смещений в ток ошибки – расходимость луча $\alpha_0 = 1,04 \cdot 10^{-5}$, вычисляемая по формуле $\alpha_0 = \lambda/\pi D$, где D – диаметр пучка на плоском зеркале. Средний ток через фотодиод и его шумовая компонента составят:

$$\langle i \rangle = \frac{2\pi\eta\lambda e}{\hbar c} P_0 T J_0^2 \simeq 0,25 \text{ А}, \quad \langle \delta i^2 \rangle^{1/2} = \{2 \langle i \rangle e\}^{1/2} \simeq 3 \cdot 10^{-10} \text{ А/Гц}^{1/2}. \quad (2)$$

Сравнение (1) и (2) дает оценку угловой чувствительности

$$\Delta\alpha_{\min} \geq 5 \cdot 10^{-14} \text{ рад/Гц}^{1/2} \text{ (или } 1 \cdot 10^{-8} \text{ угл.сек/Гц}^{1/2}\text{)}. \quad (3)$$

б) Ограничения тепловых шумов зеркал.

Учитывая, что измерения проводятся на частотах, значительно ниже резонансной частоты подвесов, используем следующую формулу для оценки угловых термических флуктуаций:

$$\Delta\alpha_{\min} \geq (\kappa T / I \omega_0^2 Q)^{1/2} \simeq 10^{-15} \text{ рад/Гц}^{1/2}, \quad (4)$$

где учтены значения момента инерции $I = 10 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ и добротности подвески $Q = 10^6$, $\kappa T = 4,2 \cdot 10^{-23}$ Дж. Тепловые шумы (4) оказываются слабее шумов фотодетектирования, которые допускают прогноз потенциальной угловой чувствительности на четыре порядка лучше типичного уровня наклономерной техники. Экспериментальный опыт работы [13] по автоустойровке зеркал лазерного гироскопа на частотах от 0,1 Гц и выше дал результат $\sim 10^{-10}$ рад/Гц^{1/2} при слабой мощности $P_0 T = 160$ мкВт. При пересчете на мощность 5 Вт получим чувствительность порядка 10^{-12} рад/Гц^{1/2}, что на два порядка лучше уровня современной наклономерной техники. Потеря двух порядков по сравнению с (3) характеризует уровень фликкер-шума в эксперименте [13].

3. Регистрация тонких эффектов типа собственных колебаний ядерных мод и близзучного резонанса жидкого ядра существенно зависит от возможности выделения их на превосходящем фоне сейсмических и температурных помех, которые могут составить $\simeq 10^{-3}$ угл. сек и более. Точно прогнозировать такую возможность затруднительно. Укажем несколько аргументов в пользу благоприятного прогноза.

Прежде всего, многолетние наблюдения обеспечат снижение фона аналогично [10, 11]. Наличие нескольких (как минимум трех) независимых каналов съема выходных данных создает условия для компенсации помех нежелательной окраски. (Отметим в этой связи, что гравитационно-волновой лазерный интерферометр как геофизический прибор не сводится только к рассмотренному двухкоординатному наклономеру, но включает также двухкоординатные горизонтальные и вертикальные деформометры.) Длинная база прибора способствует устранению локальных возмущений. Обработка данных с корреляционным учетом записей вариаций температуры, атмосферного давления и микросейсмического фона также поможет снижению фона. В случае собственных колебаний Земли и ядра частотная окраска позволяет снизить фон за счет сужения полосы приема. Это не относится к близуточному резонансу земных приливов, где температурные и барометрические эффекты будут индуцировать когерентную помеху. Здесь можно надеяться, что совместная работа двух установок в различных полушариях при отборе коррелированных сигналов заметно ее подавит. Однако решающим фактором было бы заглубление антенн на несколько метров от дневной поверхности, а еще лучше – размещение их в туннелях старых шахт или нейтринных обсерваторий, аналогично лазерному интерферометру ГАИШ МГУ в БНО РАН [14]. Это резко снизило бы геофизический шумовой фон за счет естественного пассивного термостатирования и ослабления поверхностных микросейсмиков. Увеличение затрат на строительство, по нашему мнению, окупается в этом случае многоцелевым характером приобретаемого прибора.

В заключение авторы выражают искреннюю признательность А.Джиадзотто и Дж.Маттоне за разъяснение некоторых деталей проекта VIRGO.

1. A.Abramovichi, W.E.Althouse, R.W.Drever, et al., *Science* **258**, 325 (1992).
2. VIRGO: final conceptual design Italian-French Proposal submitted to INFN (Italy) and CNRS (France) Comissions. - 1992.
3. C.Bradaschia, R.Del Fabbro, L.Ddi Fiore et al., *Nucl. Instr. Method Phys. Res. A* **289**, 518 (1990).
4. Собственные колебания Земли. Сб. науч. тр. М.: Наука, 1964.
5. В.А.Магницкий, Внутреннее строение и физика Земли. М.: Наука, 1965.
6. П.Мельхиор, Земные приливы. М.: Наука, 1968.
7. P.Melchior and B.Ducarme, *Phys. Earth & Plan. Int.* **42**, 129 (1986).
8. Г.А.Гусев, А.Б.Манукин, *Изв. АН СССР. Физика Земли* **7**, 86 (1982).
9. M.S.Molodenskii, *Comm. Obs. R. Belgique* **288**, 25 (1961).
10. W.Zurn, P.Rydelek, and B.Richter, *Proc. 10-th Int. Symp. Earth Tides, Madrid, CSIC.* 1986, p.141.
11. A.Venedikov, P.Melchior, and B.Ducarme, *Proc. 10-th Int. Symp. Earth Tides, Madrid, CSIC.* 1986, p.149.
12. Ю.Н.Авсюк, *АН СССР* **212**, №5, 1103.
13. D.Anderson and N.Sampas, *Applied Optics* **29**, №3, 394 (1990).
14. V.Rudenko, V.Milyukov, V.Nesterov, and I.Ivanov, *Astron. & Astrophys. Trans.* **4**, 1 (1993).