

10.1;10.4

Солитоны Френкеля—Конторовой в регистрации малых физических полей

© В.А. Шульгин

Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия
E-mail: shulgin@cs.vsu.ru

Поступило в Редакцию 27 апреля 2023 г.

В окончательной редакции 27 апреля 2023 г.

Принято к публикации 4 марта 2024 г.

Представлены результаты эксперимента по возбуждению солитонов когерентного акустического поля в жидкостном резонаторе и регистрации реакции этого поля на векторное воздействие сил Кориолиса. Результатом эксперимента является определение направления на географический полюс Земли. В процессе исследований выявлен ряд закономерностей динамики акустического поля солитонов, соответствующих модели Френкеля—Конторовой.

Ключевые слова: ускорение Кориолиса, солитоны Френкеля—Конторовой, геокомпас, акустика.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.11.57905.19611

Данное исследование является развитием направления, впервые представленного в работах [1,2], посвященных созданию геокомпаса, определяющего положение объекта во вращающейся системе координат. Для повышения точности измерений используется взаимодействие солитонного акустического поля в конденсированной среде резонатора и векторного акустического поля, возбуждаемого ускорением Кориолиса вращающейся Земли. Исследование предложенного метода регистрации малых акустических полей в конденсированных средах представляется актуальным.

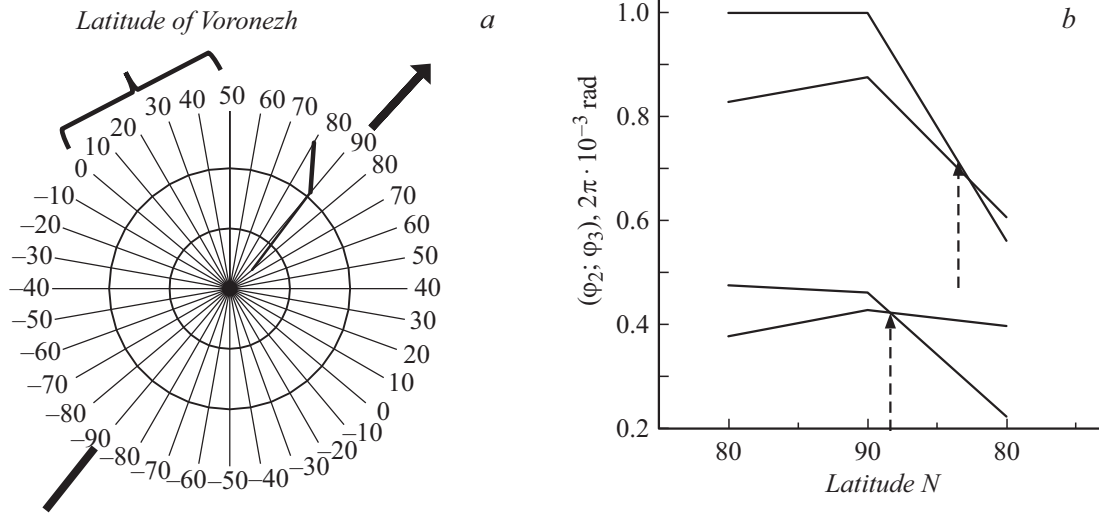
В известном техническом решении [2], регистрирующем интерференцию когерентных акустических полей, резонатор выполнен в виде пластины из плавленого кварца. Выяснилось, что в процессе сканирования пространства и соответствующего изменения положения пластины по отношению к вектору силы тяжести возникают изменения внутренних напряжений. Деформации искажают акустическое поле резонатора, что влияет на результаты измерений. Возбуждаемые в твердом теле одновременно продольные и поперечные волны усложняют структуру поля. Это затрудняет интерпретацию получаемых данных. Исключить поперечные волны и изгибные напряжения можно, используя жидкость в качестве конденсированной среды резонатора.

Для проведения эксперимента был изготовлен резонатор на основе кюветы 23-Q-10 (Starna Cells, Inc.), заполненный ртутью. Резонатор содержит пьезоэлемент C_1 возбуждающего электрода, подключаемый к генератору частот синхронного усилителя SR-7265, а также два боковых электрода C_2 и C_3 для регистрации осциллографом HDO4054 разности фаз напряжений φ_2 и φ_3 между C_1-C_2 и C_1-C_3 соответственно. Кювета установлена в термостатируемый контейнер ($T = 25^\circ\text{C}$, $\Delta T \sim 0.1^\circ\text{C}$), закрепленный на двухосном сканере. Линейные размеры внутреннего объема резонатора $10 \times 10 \times 40$ мм. Для

скорости звука в ртути 1453 м/с расчетная частота основной моды составляет $\sim 72\,650$ Hz.

Измерения показали, что в частотном спектре резонатора присутствуют резонансы как на расчетной частоте, так и на частоте 9080 Hz. Восьмикратное отличие последней от расчетной и большое время жизни возбужденных состояний ($\sim 10^5$ s), обнаруженное в процессе проведения экспериментов, свидетельствуют о наблюдении в ртути квазичастиц [3]. Во всех проявлениях эксперимента динамика взаимодействия поля ускорений Кориолиса с движением квазичастиц поля акустических когерентных колебаний имела ряд особенностей, соответствующих описанию модели солитонов Френкеля—Конторовой [3].

Согласно одномерной модели, в системе цепочка атомов—подложка закон дисперсии нелинеен. Возникающая в результате взаимная компенсация эффектов, вызванных нелинейностью колебаний при больших смещениях атомов в цепочке и дисперсией, обеспечивает возможность существования в ней солитонов. Нелинейность обусловлена средой, которая силовым воздействием удерживает цепочку атомов в сжатом состоянии с максимумом запасенной энергии в центре. Атомы в центре солитона находятся в состоянии неустойчивого равновесия. Даже малое стороннее воздействие может нарушить устойчивость солитона, что приведет к перестройке его структуры и макроскопических параметров. Возможность измерения вариаций этих параметров положена в основу настоящей работы. В модели Френкеля—Конторовой определен вариант возбуждения солитонов. Единичное возбуждение должно быть достаточно сильным, иначе в решетке возбуждаются обычные акустические волны, которым соответствуют акустические фононы, распространяющиеся со скоростью звука. В данном исследовании реализовано техническое решение, ранее предложенное в работе [4]. К объяс-



Общая схема сканирования вектором \mathbf{V}^* диапазона широт $80-90-80^\circ$, соответствующего инверсии знака силы Кориолиса (a), и график двух последовательных коррекций привязки шкалы сканера к результатам пассивной локализации положения оси вращения Земли (b). Широта места соответствует дополнению до 90° измеренного угла наклона оси относительно отвесной линии.

нению экспериментальных результатов работы [4] также применима модель солитонного акустического поля Френкеля–Конторовой. Отличие от модели — солитонное акустическое поле возбуждалось накачкой среды когерентным сигналом маломощного источника.

В модели [3] предусмотрено возбуждение парных солитонов: цепочек напряжения сжатия и разряжения — солитонов и антисолитонов, существующих в движении. Солитоны разного знака притягиваются друг к другу. Притяжение может привести или к аннигиляции, или к образованию связанного состояния — бисолитона, живущего бесконечно долго. В настоящей работе зафиксировано время жизни ~ 48 h после отключения генератора возбуждения. В этот период новый цикл измерений затруднен. Вновь возбуждаемые солитоны рассеиваются на бисолитонах. Обмен энергией приводит к потере информации. Для очистки памяти среды необходимо резонатор на короткое время возбудить на частоте основной моды для скорости звука в линейном режиме (72 650 Hz в данном исследовании).

Ускорение Кориолиса \mathbf{a}_C соответствует векторному произведению [5]:

$$\mathbf{a}_C = 2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{V}^*, \quad (1)$$

где $\boldsymbol{\Omega}$ — аксиальный псевдовектор угловой скорости вращения Земли, \mathbf{V}^* — вектор скорости возбуждаемых солитонов в среде резонатора. Для \mathbf{V}^* , лежащих в меридиональной плоскости, стационарное векторное поле ускорений Кориолиса (1) направлено по касательной к окружностям вращения вокруг оси Земли. В среде резонатора на эффективную массу m^* движущегося солитона действует сила \mathbf{F}_C в соответствии с ускорением (1). Параметры результирующего вектора для боковых

приемников определяются „правилом Жуковского“ [5], описывающим преобразование векторов

$$\begin{aligned} |\mathbf{F}_C|_2 &= 2m^*|\boldsymbol{\Omega}||\mathbf{V}^*| \sin \alpha \sin(\omega^*t + \varphi_2), \\ |\mathbf{F}_C|_3 &= 2m^*|\boldsymbol{\Omega}||\mathbf{V}^*| \sin \alpha \sin(\omega^*t + \varphi_3), \end{aligned} \quad (2)$$

где $|\mathbf{V}^*| \sin \alpha$ — проекция \mathbf{V}^* на ортогональ к оси вращения Земли, ω^* — частота возбуждения солитонов.

Изменение величины вектора \mathbf{F}_C осуществляется угловым сканированием вектора \mathbf{V}^* (2). Для параллельных векторов $\boldsymbol{\Omega}$ и \mathbf{V}^* величина $\mathbf{F}_C = 0$ в соответствии с векторным произведением (1). При сканировании в меридиональной плоскости в окрестности $\alpha = 0$ сила \mathbf{F}_C проходит через минимум и меняет направление на 180° . Этот переход в данном исследовании является основой определения направления псевдовектора $\boldsymbol{\Omega}$ и вычисления широты места навигационных измерений. На рисунке представлены общий тренд разности фаз датчиков C_2-C_3 и в увеличенном нормированном масштабе положение точки инверсии разности фаз, соответствующей истинному направлению оси Земли относительно шкалы сканера.

Для регистрации сверхмалой энергии векторного поля ускорений Кориолиса Земли резонатором, заполненным ртутью в объеме 4 ml, впервые применено акустическое поле солитонов, соответствующих модели Френкеля–Конторовой. Принцип самоорганизации солитонов, реагирующих на малые вариации стороннего акустического поля изменением макроскопических, измеряемых параметров, позволил зафиксировать направление вектора ускорений Кориолиса Земли при угловом сканировании пространства. Предложен алгоритм пассивной локализации направления оси вращения Земли как неподвижного линейного объекта в абсолютной

системе координат. Погрешность измерений углового расположения оси Земли относительно места нахождения аппаратных средств на данном этапе исследований не превышает 5° и ограничена точностью системы сканирования.

Благодарности

Автор выражает благодарность Г.В. Пахомову и С.В. Рябцеву (физический факультет ВГУ) за полезное обсуждение результатов эксперимента.

Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] В.А. Шульгин, *Способ навигации по вектору сил Кориолиса Земли и устройство для его осуществления*, патент RU 2775858 от 02.12.2020, опубл. 11.07.2022. Бюл. № 20.
- [2] В.А. Шульгин, Письма в ЖТФ, **48** (11), 21 (2022). DOI: 10.21883/PJTF.2022.11.52608.19209 [V.A. Shulgin, Tech. Phys. Lett., **48** (6), 14 (2022). DOI: 10.21883/TPL.2022.06.53575.19209].
- [3] Н.Б. Брандт, В.А. Кульбачинский, *Квазичастицы в физике конденсированного состояния* (Физматлит, М., 2007), с. 534–546.
- [4] V.A. Shulgin, *Ultrasound and temperature study of non-equilibrium phase transitions in surface-bound liquid layers*, arXiv:1203.2333. DOI: 10.48550/arXiv.1203.2333
- [5] А.П. Маркеев, *Теоретическая механика* (ЧеРо, М., 1999), с. 71–76.