

10.1;10.4

## Геокомпас высоких широт

© В.А. Шульгин

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

Поступило в Редакцию 1 апреля 2022 г.

В окончательной редакции 12 апреля 2022 г.

Принято к публикации 12 апреля 2022 г.

Рассмотрена автономная навигационная система ориентации на поверхности, под водой, под поверхностью Земли. Пассивная локация оси вращения Земли осуществляется вектором диаграммы направленности геокомпаса при угловом сканировании пространства. Предложена и реализована конструкция геокомпаса, в котором деформации среды твердого тела под действием переменного акустического поля и поля ускорений Кориолиса Земли формируют вектор диаграммы. Экспериментальное сканирование пространства подтверждает формирование вектора направления, совпадающего с ортогональю к оси вращения Земли, что позволяет квалифицировать устройство как геокомпас, ориентированный в высоких широтах на географический полюс.

**Ключевые слова:** ускорение Кориолиса, вращение Земли, акустика, навигация.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.11.52608.19209

В работе представлены результаты исследований в области создания аппаратных средств полностью автономной системы навигации на поверхности Земли, под водой, в подземных горизонтах, которая не подвержена воздействию внешнего электромагнитного поля и не излучает электромагнитных и акустических сигналов. Исследование базируется на применении известных величин: вектора силы тяжести, векторного поля ускорений Кориолиса вращающейся Земли и взаимодействия этого поля со средами распространения акустических волн.

Спутниковые навигационные системы достаточно эффективны, но они дороги, уязвимы и не везде доступны, в частности под водой, под поверхностью Земли, куда не проникает электромагнитное излучение. Условно автономными являются инерционные навигационные системы. Многочисленные варианты приборов данного типа быстро развиваются начиная с середины прошлого века. Точность инерционных датчиков со временем возрастает, что делает их все более пригодными с точки зрения габаритов, веса, стоимости, точности навигации и использования в системах наведения объектов [1]. Ошибки инерционных датчиков все еще представляют серьезную научную проблему в условиях эксплуатации, когда им приходится длительное время работать без обновления данных по координатам от вспомогательных, в частности наземных, стационарных датчиков. Причина в том, что эти устройства создают изолированный аналог абсолютной системы координат и в результате накапливают ошибки. Поэтому развитие направления исследований по созданию автономной системы навигации представляется актуальным.

В работе [2] предложено решение этой задачи. Регистрация ортогонального направления к оси вращения Земли как неподвижного объекта в абсолютном

(в пределах Земли) пространстве позволит определить навигационные параметры. Широта — это угол между направлением на центр Земли и ортогональю к оси вращения. Регистрация взаимного расположения оси вращения Земли и оси вращения центра масс системы Земля–Луна в привязке к всемирному времени достаточна для определения долготы. Размер орбиты Земли вокруг барицентра Земля–Луна  $\sim 0.74R$ , где  $R$  — радиус Земли. Термины „новолуние“, „полнолуние“ можно применять и к положению Земли относительно линии Солнце–барицентр, т.е. регистрация взаимного расположения как оси вращения Земли относительно барицентра, так и оси Земли эквивалентна привязке навигационных измерений к небесной сфере в соответствующий момент времени. На этом может быть построен алгоритм определения долготы.

В работе [2] описан вариант датчика регистрации вектора ускорения Кориолиса Земли в виде акустического резонатора, заполненного газом. Была выбрана концепция когерентного автогенератора с резонатором в цепи обратной связи, а также спектральная область для обработки и регистрации данных. Исследования показали, что низкая чувствительность не позволяет рассчитывать на его практическое применение.

В [3] дается определение, согласно которому в общем случае абсолютное ускорение точки равно сумме переносного, относительного и кориолисового ускорений. Рассмотрим лишь частный случай: датчик неподвижен относительно поверхности Земли. Только ускорение Кориолиса в этом случае определяет силовое воздействие на движущиеся массы среды твердотельного датчика. Движение в предлагаемом устройстве — это периодическая деформация среды, создаваемая полем акустического сигнала внешнего генератора частоты. Ускорение Ко-

риолиса  $\mathbf{a}_c$  определяется векторным произведением [3]:

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

где  $\boldsymbol{\Omega}$  — аксиальный вектор угловой скорости вращения Земли,  $\mathbf{V}$  — вектор скорости частиц среды. В случае продольных волн вектор  $\mathbf{V}$  коллинеарен направлению распространения акустической волны в резонаторе. Абсолютное значение вектора ускорения

$$|\mathbf{a}_c| = 2|\boldsymbol{\Omega}||\mathbf{V}| \sin \alpha, \quad (2)$$

где  $\alpha$  — угол между  $\boldsymbol{\Omega}$  и  $\mathbf{V}$ . Ускорение максимально в ортогональном направлении  $\mathbf{V}$  к оси вращения и изменяется по закону  $\sin \alpha$ . Поле ускорений Кориолиса создает акустическую волну, которая по направлению распространения ортогональна возбуждающей волне и может быть зарегистрирована. Сканирование по углу  $\alpha$  (2) является методом формирования диаграммы направленности, позволяющей определить ортогональное направление к оси вращения Земли. Функциональное назначение датчика можно определить как геокомпас высоких широт, так как на экваторе диаграмма направленности ориентирована на центр Земли, а в высоких широтах на географический полюс.

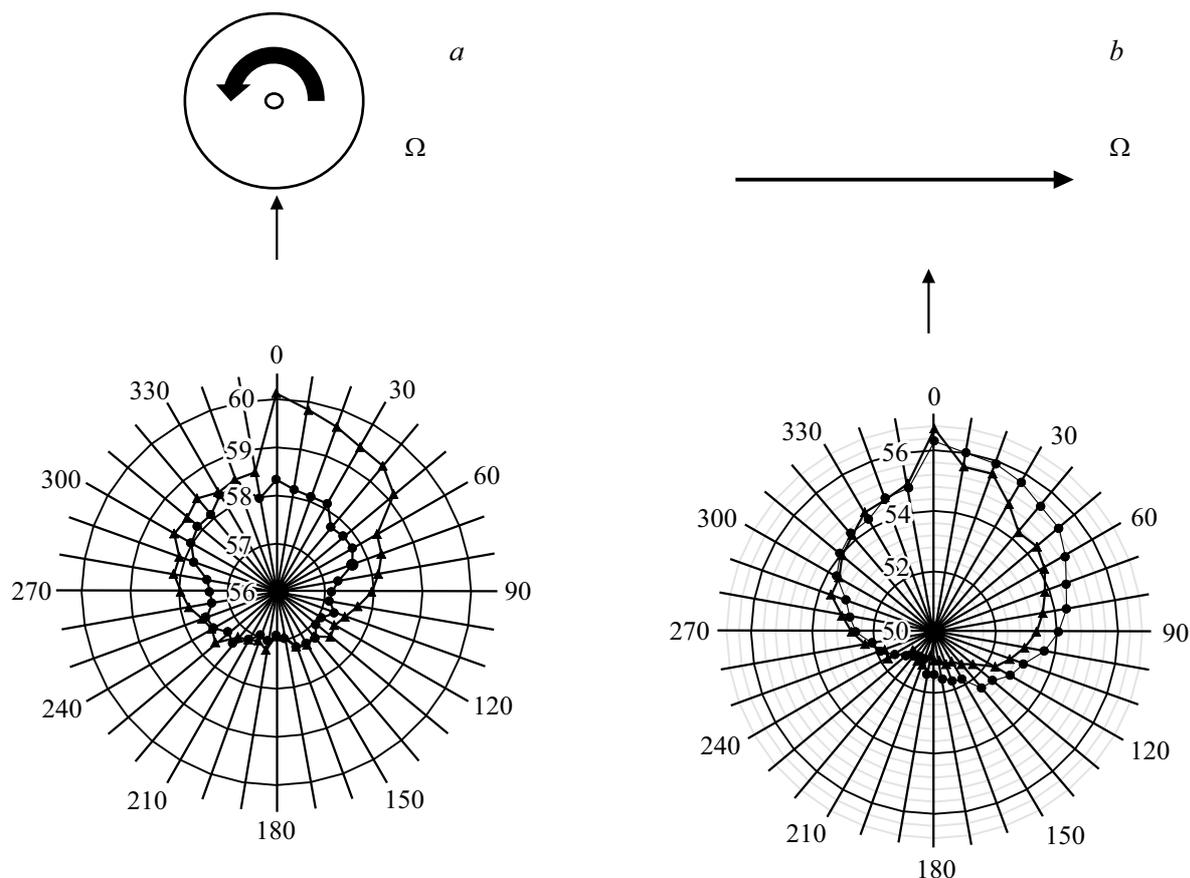
Результат настоящей работы — действующий образец датчика, средой распространения акустических волн в котором является шлифованная пластина из плавленного кварца размером  $113 \times 55 \times 3.5$  mm. На торцах (55 mm) приклеены пьезопреобразователи: один для возбуждения акустической продольной волны от внешнего генератора, другой для осциллографического анализа распределения акустического поля пластины, что необходимо, в частности, для выбора способа крепления резонатора. К боковым граням приклеены пьезосенсоры, регистрирующие как исходную волну, возбуждаемую генератором, так и волну ортогонального направления, возникающую согласно векторному произведению (1), имеющую ту же частоту. Механическим поворотом резонатора варьируется направление  $\mathbf{V}$  и осуществляется пассивная локация. Вследствие осевой симметрии конструкции возбуждаемая генератором волна на боковые пьезосенсоры приходит с одинаковой задержкой, создавая синфазные сигналы, в то время как ортогональный по направлению сигнал  $|\mathbf{a}_c|$  на этих сенсорах сдвинут по фазе из-за последовательного прохождения сенсоров фронтом акустической волны Кориолиса. Регистрируется сумма двух сигналов — синфазного и дифференциального. На этом основан принцип выделения информации путем подавления большого синфазного сигнала и усиления малого дифференциального. В работе использовались осциллограф HDO4054 и синхронный усилитель SR-7265 со встроенным синтезатором частот. Рабочая частота датчика 22 660 Hz. Амплитуда сигнала возбуждения 5 V, амплитуда напряжения сигнала Кориолиса регистрировалась в процентах шкалы 50 mV прибора SR-7265. На рисунке представлены результаты кругового сканирования во встречных направлениях и двух

ортогональных сечениях: в плоскости, ортогональной к оси вращения Земли для  $52^\circ$  северной широты (*a*), и в плоскости, содержащей ось вращения Земли и меридиан  $39^\circ$  восточной долготы (*b*) (Воронеж). Начальная точка по шкалам сканера  $0^\circ$  — это ортогональное направление к вектору  $\boldsymbol{\Omega}$  оси вращения Земли. Векторное произведение (1) для вектора  $\mathbf{V}$ , имеющего нулевую проекцию на ортогональное направление к оси  $\boldsymbol{\Omega}$  ( $90$  и  $270^\circ$  по шкале сканера), должно иметь значение  $|\mathbf{a}_c| = 0$ . На рисунке (фрагменты *a* и *b*) этого минимума нет. Причина в том, что излучающий пьезопреобразователь наряду с продольными волнами генерирует поперечные волны, которые в точках  $90$  и  $270^\circ$  создают максимальный уровень поперечной волны Кориолиса. В дальнейшем необходимо дополнить геокомпас заградительным фильтром, подавляющим поперечные волны.

В процессе измерений обнаружен ожидаемый эффект „маятника Фуко“: волновое поле резонатора существует в абсолютном пространстве [1] и „повернуть“ его за короткое время не удастся. Смена направления  $\mathbf{V}$  при сканировании сопровождается долгой перестройкой поля. Отключение генератора на время смены направления сократило этот процесс до 20 s для единичного измерения. Но и в этом случае время перестройки также возрастает, если резонатор в исходной точке долго находится под воздействием акустического поля. График в районе стартовой точки это подтверждает. Старт в направлении  $0-350^\circ$ , как следует из рисунка, *a*, сопровождается асимптотическим приближением к стационарному динамическому режиму измерений. В обратном направлении  $350-0^\circ$  цикл завершается как продолжение стационарного динамического режима. Предполагается, что эффект дополнительного накопления задержки обусловлен локальным разогревом среды при длительном воздействии акустического сигнала возбуждения.

Графики, соответствующие двум ортогональным сечениям пространственной диаграммы направленности, имеют экстремум в направлении ортогонали к оси вращения Земли. Отношение отклонений точек каждого угла противоположных направлений стационарного динамического режима измерений по отношению к динамическому диапазону сигнала, обусловленного ускорением Кориолиса Земли, составляет  $\sim 0.1$ .

Известные технические решения характеризуются тем, что условно автономными следует считать инерционные системы, сохраняющие ограниченное время абсолютную систему координат, в которой существует ось вращения Земли. Показано, что полностью автономная система навигации может быть реализована, если регистрировать вектор поля ускорения Кориолиса Земли и соответственно ортогональное направление к оси ее вращения. Актуальность решения этой задачи несомненна прежде всего для навигации подводных аппаратов. Такое устройство было предложено и испытано в настоящей работе. Это акустический резонатор из плавленного кварца, в котором волновой процесс деформаций среды, взаимодействуя с векторным полем ускорений



Результаты кругового сканирования пространства геокомпасом во встречных направлениях и ортогональных сечениях: в плоскости, ортогональной оси  $\Omega$  для  $52^\circ$  северной широты (a), и в плоскости, содержащей ось вращения Земли и меридиан  $39^\circ$  восточной долготы (b). По шкалам сканера  $0^\circ$  — ортогональное направление к вектору  $\Omega$  оси вращения Земли.

Кориолиса, создает силовое воздействие, возбуждающее акустическую волну той же частоты в направлении, определяемом векторным произведением вектора вращения Земли и вектора направления смещения среды в процессе деформации. Проведены измерения диаграммы направленности геокомпаса при угловом сканировании пространства в окрестности ортогонального направления к оси вращения Земли. Трехмерная диаграмма экспериментальных данных имеет экстремум в этом направлении. Термостатирование кварцевого резонатора на данном этапе исследований не применялось.

### Благодарности

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

### Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] N. El-Sheimy, A. Youssef, *Satell Navig.*, **1**, 2 (2020). DOI: 10.1186/s43020-019-0001-5
- [2] В.А. Шульгин, в сб. *XXVII Междунар. науч.-техн. конф. „Радиолокация, навигация, связь“* (Изд. дом ВГУ, Воронеж, 2021), т. 3, с. 81. <https://rlnc.ru/>
- [3] А.П. Маркеев, *Теоретическая механика* (ЧеРо, М., 1999), с. 71–76.