

В. М. АГАФОНОВ, Е. В. ЕГОРОВ, Д. Л. ЗАЙЦЕВ, К. А. НЕУМОИН, М. В. САФОНОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОЛЕКУЛЯРНО-ЭЛЕКТРОННОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ НА ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ СЕВЕР

Представлены результаты экспериментального исследования возможности высокоточного определения направления на географический Север с использованием молекулярно-электронного устройства. Рассматривается метод поиска направления меридиана вращением датчика угловой скорости относительно вертикальной оси, ортогональной оси чувствительности сенсора.

Введение

Задачи высокоточного определения положения тела и его ориентации в пространстве являются одними из самых актуальных на современном этапе развития научно-технических и практических отраслей деятельности во всем мире. В частности, важнейшей остается проблема точного определения направления на земной поверхности по отношению к географическим сторонам света. Данная проблема актуальна для широкого круга практических приложений, начиная от ориентирования туристических и спасательных групп на местности, и заканчивая навигацией транспортных средств различного назначения.

Целью настоящей работы является исследование возможности применения молекулярно-электронной технологии, получившей существенное развитие в последние годы [1-5], для решения задачи высокоточного определения направления на географический Север.

Макет устройства для определения направления на географический Север, созданный на основе молекулярно-электронной технологии

Важнейшим отличием молекулярно-электронных датчиков от инерционных измерителей параметров движения других типов является то, что в нем жидкость – раствор электролита, – протекающая через преобразователь, одновременно играет роль преобразующей среды и инерционной массы. Действие измерительных приборов, построенных по молекулярно-электронной технологии, основано на физических процессах диффузионного переноса заряда в условиях вынужденной конвекции, возникающей под действием внешнего ускорения [6]. Основным элементом таких приборов является молекулярно-электронный

Агафонов Вадим Михайлович. Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры, руководитель Центра молекулярной электроники МФТИ (Москва).

Егоров Егор Владимирович. Аспирант МФТИ (ГУ).

Зайцев Дмитрий Леонидович. Кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник Центра молекулярной электроники МФТИ.

Неумоин Константин Анатольевич. Аспирант МФТИ (ГУ).

Сафонов Максим Владимирович. Кандидат физико-математических наук, сотрудник Центра молекулярной электроники МФТИ.

(электрохимический) преобразователь [7], схематично показанный на рис. 1. Внутри трубки 1, выполненной из диэлектрического и химически стойкого материала и заполненной раствором электролита 2, расположены две пары сетчатых электродов 3 и 4, дающие возможность свободного протекания жидкости через электродный узел в случае возникновения движения электролита в трубке преобразователя. Внешние электроды используются в качестве анодов, внутренние — в качестве катодов. Сигнал снимается, как правило, с катодов по разностной схеме.

В рабочем режиме к каждой паре электродов преобразователя прикладывается постоянная разность потенциалов, обеспечивающая, в отсутствие внешнего сигнала, протекание между анодом и катодом фоновых токов, обусловленных обратимыми окислительно-восстановительными реакциями на электродах. Наличие избытка фоновых электролитов значительно ослабляет электрическое поле в объеме электролита, и, как следствие, вклад составляющей тока, связанной с миграцией ионов в электрическом поле. В результате межэлектродный ток практически целиком определяется вызванной внешним сигналом конвективной диффузией ионов, участвующих в реакциях окисления-восстановления на электродах. Обычно используют водный раствор на основе КJ с относительно небольшой добавкой молекулярного йода J_2 . При этом в растворе происходит почти полная диссоциация КJ на отрицательно заряженные ионы J⁻ и положительные ионы K⁺, а молекулярный йод вступает в реакцию с ионами J⁻, с образованием трийодида: $J_2 + J^- = J_3^-$. Таким образом, на фоне высококонцентрированного раствора КJ (фоновый электролит) в системе присутствует сравнительно небольшое количество ионов трийодида (активный компонент). В неподвижном электролите скорость доставки определяется скоростью диффузии активных ионов, под воздействием внешнего возмущающего сигнала (скорости или ускорения) происходит перенос носителей тока гидродинамическим потоком жидкости и к диффузии добавляется конвективный перенос, что приводит к вариациям тока во внешней цепи. Эти вариации тока и являются сигналом МЭП.

Если концы трубки 1 замкнуть в тор, целиком заполненный раствором электролита, получается датчик вращательного движения (рис. 2, 3).

Для того чтобы такой датчик мог применяться для определения угловой скорости вращения Земли в системах поиска направления на север, его чувствительность должна быть как минимум в несколько раз выше 40 мкрад/с, соответствующей горизонтальной составляющей угловой скорости вращения Земли (на широте ~56°).

Для решения поставленной задачи определения направления меридиана молекулярно-электронный датчик вращательного движения 2 устанавливается на платформу 1, способную вращаться с некоторой постоянной угловой скоростью $\omega_{ст}$, так, чтобы его ось чувствительности к угловому движению была ортогональна вектору угловой скорости вращения платформы $\vec{\omega}_{ст}$ (рис. 4).

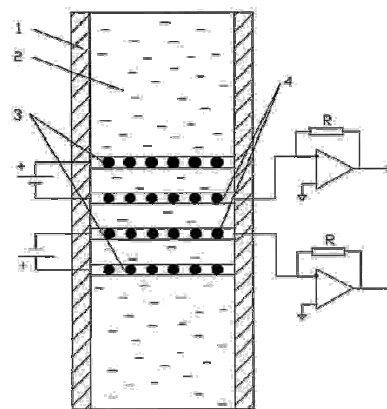


Рис. 1. Молекулярно-электронный преобразователь: 1 - керамическая трубка (корпус преобразователя), 2 - электролит, 3 - аноды, 4 - катоды

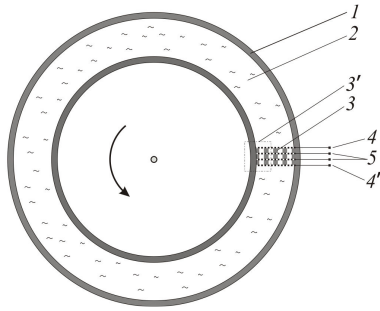


Рис. 2. Молекулярно-электронный датчик вращательного движения: 1 - керамический корпус; 2 - канал, заполненный электролитом; 3 - электродный узел; 4, 4' - аноды; 5 - катоды



Рис. 3. Молекулярно-электронный датчик вращательного движения диаметром 50 мм

Ось вращения платформы выставлена по направлению вектора силы тяжести. Угловая скорость вращения Земли $\vec{\omega}_3$ при этом имеет составляющую $\vec{\omega}_3$ на плоскость поверхности платформы, на которой установлен датчик, и составляет угол $\beta(t)$ с осью чувствительности сенсора [8].

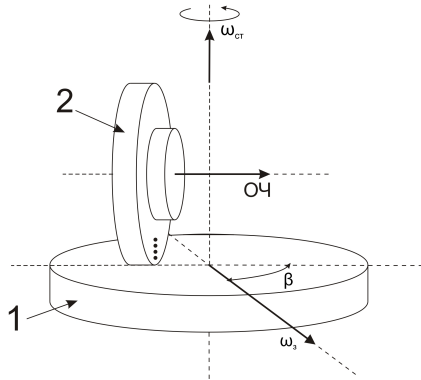


Рис. 4. Схема экспериментальной установки: ОЧ – ось чувствительности датчика угловых движений, $\omega_{ст}$ – скорость вращения платформы, ω_3 – проекция скорости вращения Земли на горизонтальную плоскость, $\beta = \omega_{ст}t$ – угол между осью чувствительности датчика и проекцией скорости вращения Земли на горизонтальную плоскость

При вращении платформы горизонтальная проекция вектора скорости вращения Земли на ось чувствительности датчика меняется по гармоническому закону с частотой $\omega_{ст}$ вращения платформы. При этом на чувствительный элемент действует угловое ускорение, равное $\omega_3 \cdot \omega_{ст} \cdot \sin(\omega_{ст}t)$. Определяя амплитуду и фазу сигнала с помощью сенсора, можно найти не только значение горизонтальной проекции скорости вращения Земли на данной широте, но и направление на географический Северный полюс, совпадающее с максимумом регистрируемой проекции скорости вращения Земли.

Амплитудно-частотные, фазочастотные, динамические и температурные характеристики датчиков вращательного движения были экспериментально исследованы

с помощью прецизионного колебательного вибростенда, разработанного в Центре молекулярной электроники МФТИ, способного задавать гармонические колебания в широком диапазоне амплитуд и частот [9], а также высокоточного имитатора движений Actidyn ST1144C с термокамерой 750T30/4 Climats.

Для изучения возможности высокоточного определения направления на географический Север молекулярно-электронным устройством были изготовлены несколько образцов измерителей угловой скорости (на основе датчиков вращательного движения). В табл. 1 приведены основные параметры используемых молекулярно-электронных измерителей вращательного движения, исследуемых в рамках решения задачи высокоточного определения азимутального направления.

При исследовании макета устройства для определения направления на географический Север в качестве вращательной платформы использовался одноосный имитатор движений ST1144C производства Actidyn SA, смонтированный внутри термостабилизационной камеры 750T30/4 Climats компании BLM Sinergy (рис. 5).

Т а б л и ц а 1

Технические параметры молекулярно-электронного датчика угловой скорости

Показатель	Молекулярно-электронный измеритель угловой скорости
Диаметр преобразователя, мм	50
Тип выходного сигнала	аналоговый, недифференциальный, пропорционален угловой скорости
Рабочая полоса частот, Гц	0,03 – 20
Коэффициент преобразования, В/(рад/с)	50
Максимальная неравномерность АЧХ в рабочей полосе частот, дБ	$\pm 0,4$
Максимальный выходной сигнал, В	± 5
Максимально измеримый сигнал с гармоническими искажениями $< 2\%$, рад/с	0,01
Спектральная плотность шума в диапазоне частот 0.01-1 Гц (плоская в единицах эквивалентного углового ускорения), рад/(с ² ·√Гц)	$7,5 \cdot 10^{-7}$
Рабочий температурный диапазон, °С	- 12 .. + 55
Предельная ошибка температурной компенсации в рабочем диапазоне частот, %	< 10
Масса, г	50
Питание, В	12
Потребление, мА	5

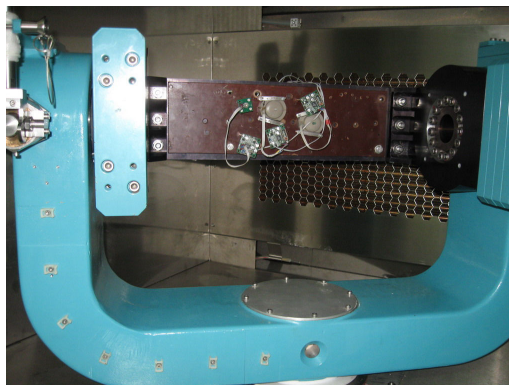


Рис. 5. Экспериментальная установка для определения направления на географический Север на основе молекулярно-электронных измерителей угловых движений

Точность поворота платформы стенда на заданный угол составляет величину $3 \cdot 10^{-4}$ град. Модификация имитатора движений ST1144C позволяет изменять угол наклона крепежной площадки платформы по отношению к вертикальной

оси вращения стенда на углы с шагом в 45° , при этом точность выставления заданного к вертикали угла составляет $0,003^\circ$. Используемый одноосный имитатор движения оборудован высокоточным датчиком угла поворота с разрешением 10^{-5} град. Одноосный имитатор движения выставлен в пространстве лаборатории таким образом, что азимут нулевого положения высокоточного датчика платформы имеет значение $254,23^\circ$ с погрешностью не хуже $0,02^\circ$. Стабильность вращения стола с заданной угловой скоростью $\sim 10^{-3}\%$.

Модулированный с частотой вращения платформы сигнал молекулярно-электронного датчика угловой скорости и сигнал высокоточного датчика положения стенда регистрировался 24-разрядной системой сбора данных E-24 L-Card. На основании показаний датчика угла поворота имитатора движений определялось текущее положение платформы к направлению на север в каждый отсчет времени.

При этом был использован следующий способ измерений, который, с одной стороны, исключает необходимость определения начальной фазы сигнала датчика, что по ряду причин сложно сделать с высокой точностью, а с другой, существенно повышает точность самого метода в целом. Метод состоит в переменном вращении платформы по и против часовой стрелки с последующим сложением полученных фаз сигнала на частоте вращения стенда. Предположим, что молекулярно-электронное устройство закреплено на платформе, так что ось чувствительности сенсора направлена вдоль некоторого (нулевого) направления, азимут которого мы хотим определить. Будем вращать платформу по часовой стрелке с определенной постоянной угловой скоростью и совершим полное число оборотов N . Датчик угловой скорости зарегистрирует модулированный с частотой вращения платформы сигнал. Выполним анализ данных путем вычисления быстрого преобразования Фурье. Амплитуда спектра на частоте вращения платформы даст величину проекции скорости вращения Земли на плоскость вращения оси чувствительности сенсора, а фаза сигнала содержит информацию об искомом азимуте и равна $\varphi_{\text{по}} = \varphi_1 + \varphi_0$, где φ_1 – азимут, измеренный относительно начального положения оси чувствительности, φ_0 – определяется фазовой характеристикой сенсора. Снова приведем во вращение платформу с той же угловой скоростью, но уже против часовой стрелки и осуществим то же самое число оборотов N в противоположную сторону. Тогда $\varphi_{\text{пр}} = -\varphi_1 + \varphi_0$ – фаза сигнала на частоте вращения платформы, при этом φ_0 не изменяется. Для того чтобы устранить неизвестный угол φ_0 , найдем разницу регистрируемых $\varphi_{\text{по}} - \varphi_{\text{пр}}$. Таким образом, искомый азимут есть полуразность измеренных фаз при вращении платформы по и против часовой стрелки $\alpha_{\text{North}} = (\varphi_{\text{по}} - \varphi_{\text{пр}})/2$.

На рис. 6 представлен спектр, соответствующий регистрируемому молекулярно-электронным датчиком сигналу. На частоте вращения платформы наблюдается максимум спектра сигнала, амплитуда которого, приведенная к чувствительности углового датчика, дает измеряемую молекулярно-электронным сенсором горизонтальную проекцию скорости вращения Земли на данной широте. Соответствующая данному максимуму спектра разность фаз при вращении по и против часовой стрелки дает информацию об искомом азимутальном направлении. Ниже представлены экспериментальные результаты по определению азимута с помощью макета устройства для определения направления на географический Север с использованием молекулярно-электронных датчиков угловой скорости. Широта места расположения лабораторной установки составляет $55,93^\circ$ (г. Долгопрудный, Московская обл.), соответствующая горизон-

танальная проекция скорости вращения Земли на указанной широте $4,08 \cdot 10^{-5}$ рад/с.

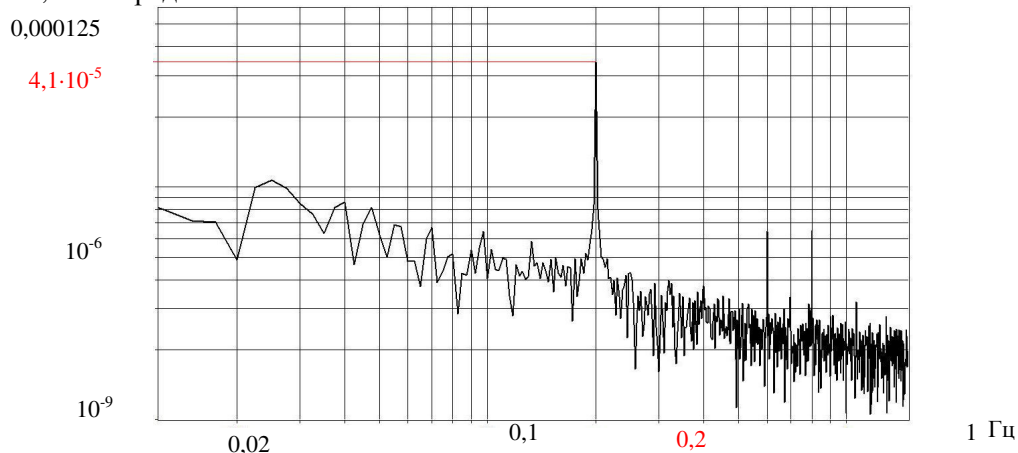


Рис. 6. Спектр сигнала датчика при вращении платформы. Двойной логарифмический масштаб

Данное исследование включало серию экспериментов, отличающихся частотой вращения платформы. Продолжительность отдельного измерения составляла 100 с. Были исследованы восемь различных образцов молекулярно-электронных датчиков.

Результат статистического исследования разброса экспериментально измеренных углов направления на север сведены в табл. 2.

Таблица 2

Истинное значение азимута – $254,23^\circ$

Частота вращения платформы, Гц	Среднее значение направления на север, град	Стандартное отклонение отдельного измерения от среднего значения, град (СКО)
0,05	254,22	0,24
0,1	254,33	0,17
0,2	254,36	0,28

Таким образом, в условиях проведенных экспериментов ошибка отдельного измерения составляет $0,2 - 0,3^\circ$. В то же время источники этой ошибки могут иметь совершенно различную природу. Соответственно, в зависимости от доминирующих механизмов, различными должны быть и подходы к их снижению. Так, ошибки, носящие случайный характер могут быть снижены путем усреднения сигнала, а также оптимизации шумовых параметров датчиков. Неточность в ориентации оси чувствительности датчиков, можно определить при калибровке и учитывать при обработке данных. Поэтому последующий анализ был направлен на выделение отдельных источников ошибок.

Моделирование ошибки определения азимута, обусловленной собственным шумом углового измерителя

В целях повышения точности измерений, определения основных источников ошибок и разработки методов снижения их влияния было проведено численное моделирование, в котором исследовалось, к какой ошибке в фазе измеряемого

сигнала приводят собственные шумы молекулярно-электронного датчика вращательных движений.

Для последующего сравнения с экспериментальными данными был проведен расчетный эксперимент, моделирующий описанные выше измерения, в предположении, что единственным источником ошибок являются шумы датчика. Для этого программными средствами создавался синусоидальный сигнал длительностью соответствующей количеству оборотов совершенных реальным измерителем азимута, частотой, равной частоте вращения платформы, амплитудой, равной регистрируемой в эксперименте проекции скорости вращения Земли, а начальной фазой, соответствующей начальному углу поворота оси чувствительности сенсора относительно известного направления на географический Север. Далее этот сигнал обрабатывался фильтром Баттерворта с полосой пропускания и порядком спада полностью соответствующим техническим параметрам измерителя (см. табл. 1).

Кроме того, было проведено моделирование шумового сигнала молекулярно-электронного датчика. Для этого изначально моделировался шумовой сигнал с нормальным распределением, имеющим, как известно, частотно независимый спектр. Учитывалось, что спектральная плотность мощности шума молекулярно-электронного датчика угловой скорости не зависит от частоты в единицах приложенного углового ускорения [10]. Соответственно в единицах измеряемого сигнала (угловой скорости) спектральная плотность должна быть обратно пропорциональна частоте. С учетом вышесказанного моделирующий шумовой сигнал интегрировался и умножался на масштабный коэффициент, подбираемый таким образом, чтобы среднеквадратичная ошибка моделирующего сигнала и экспериментальный шум измерителя соответствовали друг другу в использованном диапазоне частот. После этого полученный случайный сигнал складывался с синусоидальным, моделирующим влияние вращения Земли. Таким образом, в ходе моделирования виртуальный сигнал как бы «копировал» спектральное поведение реального сигнала измерителя, моделируя как полезный сигнал проекции скорости вращения Земли, так и вклад собственного шума измерителя (рис. 7).

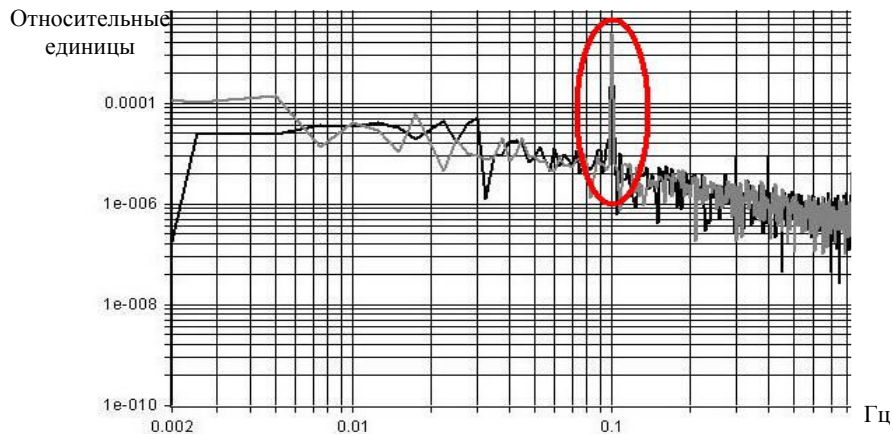


Рис. 7. Спектры реального и имитирующего сигналов:
 темный – реальный экспериментальный сигнал, светлый – смоделированный, выделен пик соответствующий регистрируемой проекции скорости вращения земли.
 Двойной логарифмический масштаб

В ходе моделирования было проведено статистическое исследование того, каким образом внесение дополнительной помехи эквивалентной низкочастотному шуму молекулярно-электронного измерителя угловой скорости влияет на ошибку в определении фазы регистрируемого сигнала и соответственно азимута. Статистическое исследование включало изучение влияния длительности измерения, а также частоты вращения платформы на точность определения фазы для разработанной модели и для реального эксперимента, а также сравнение полученных данных. Для обработки использовались экспериментальные данные, полученные в большом количестве экспериментов с использованием одного измерителя. При этом изменялись только частота вращения платформы и продолжительность записи. Остальные условия: температура, способ закрепления датчика на платформе, частота опроса и состав регистрирующей аппаратуры оставались неизменными.

Сравнение экспериментальных данных с результатами моделирования

Результаты математического моделирования вклада собственных шумов измерителя в ошибку фазы измеряемого сигнала приведены в табл. 3, где представлены следующие данные: первый и второй столбцы – частота вращения платформы и длительность записи; третий столбец – среднеквадратичное отклонение ошибки в определении азимута по результатам моделирования (стандартное отклонение результата, подсчитанное по 15 независимым генерациям имитирующего сигнала); четвертый столбец – среднеквадратичное отклонение от среднего значения экспериментально определенного азимута по 15 экспериментам, проведенным в идентичных условиях; пятый столбец – систематическая ошибка эксперимента, подсчитанная в каждом случае как среднее значение 15 абсолютных погрешностей отклонения экспериментального азимута от истинного азимута нулевого положения платформы (известного при аттестации платформы изготовителем и составляющего $254,23^\circ \pm 0,02^\circ$).

Т а б л и ц а 3

Результаты математического моделирования вклада собственных шумов измерителя в ошибку фазы измеряемого сигнала

Частота обращения платформы, Гц	Длительность участка записи, с	СКО в определении фазы моделирующего сигнала по 15 генерациям, град	СКО экспериментального определения истинного севера, град	Систематическая ошибка в эксперименте, град
0,05	400	0,13	0,13	0,07
0,05	200	0,18	0,16	0,06
0,05	100	0,20	0,21	0,06
0,1	400	0,07	0,08	0,06
0,1	200	0,09	0,1	0,08
0,1	100	0,16	0,13	0,06
0,2	400	0,04	0,09	0,02
0,2	200	0,05	0,1	0,03
0,2	100	0,08	0,13	0,05

Обсуждение результатов

Представленные экспериментальные результаты, а также данные численного моделирования вклада собственных шумов углового измерителя в ошибку определения азимута дают основание сформулировать следующие выводы.

Точность определения направления на географический Север составляет $0,1^{\circ}$ – $0,2^{\circ}$ на данной широте ($\varphi_n = 55,93^{\circ}$), что близко к точности, достигаемой с помощью современных прецизионных гироскопов.

Наилучшая точность, при заданных условиях эксперимента, достигается на частотах вращения платформы 0,1 и 0,2 Гц, с уменьшением частоты точность падает, что, по-видимому, объясняется нарастанием к низким частотам собственных шумов молекулярно-электронного датчика угловой скорости.

На частотах обращения платформы 0,05 и 0,1 Гц результаты моделирования в предположении, что единственным источником ошибок являются собственные шумы датчика вращательных движений полностью соответствуют экспериментальным данным.

Данный результат позволяет утверждать, что в этом случае собственные шумы молекулярно-электронных измерителей угловых движений являются основным фактором, задающим неточность в определении направления на географический Север. Соответственно методы уменьшения ошибок должны включать снижение собственных шумов датчика, что можно достичь, например, путем увеличения размеров, а также снижения гидродинамического сопротивления преобразующего элемента.

На более высокой частоте вращения платформы моделирование предсказывает меньшее значение ошибки определения азимута, чем удалось наблюдать в реальном эксперименте. Это связано, по-видимому, с невысокой, достижимой для использованного оборудования частотой дискретизации данных и как следствие уменьшения разрешения измерений по углу поворота при высокой частоте обращения платформы имитатора движений. Детальное исследование механизмов, ответственных за ошибки измерений на более высоких частотах вращений, должны быть темой отдельных исследований.

Систематическая ошибка в определении направления на географический Север в данном случае меньше случайной и, по всей видимости, обусловливается совокупным влиянием неортогональности оси чувствительности датчика посадочной площадке, отклонением оси вращения от вертикали, влиянием чувствительности датчиков угловых движений к линейным ускорениям, и т.д. В то же время, как показывает сопоставление с данными в табл. 2, ошибка может иметь сравнимую величину или быть даже больше случайной. Как отмечалось выше, ее влияние может быть учтено посредством предварительной калибровки.

В целом полученные данные демонстрируют, что создание на указанных принципах действующего устройства, обеспечивающего точность определения направления на географический Север $0,1^{\circ}$ и даже в несколько раз лучше, является вполне реальной задачей.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ грант 10-07-00650-а.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Козлов, В.А.** Современное состояние разработок в области молекулярно-электронных преобразователей параметров движения и волновых полей // *Успехи современной радиоэлектроники*. - 2004. - № 5-6. - С. 138–144.
2. **Сафонов, М.В.** Перспективы применения молекулярно-электронных сенсоров вращательного движения в различных научно-технических областях / М.В.Сафонов, В.М.Агафонов, В.А.Козлов // *Материалы X Международной конференции и Российской научной школы*. Ч. 1. – М.: Радио и связь, 2005. - С. 108.
3. **Зайцев, Д.Л.** Способ изготовления электродного узла молекулярно-электронного измерителя линейных и угловых движений / Д.Л.Зайцев [и др.] // *Патент на изобретение № 2006131449 / 280(034193)*. - 2006.
4. **Бугаев, А.С.** Молекулярно-электронное устройство для измерения механических движений // А.С.Бугаев, М.В.Сафонов // *Патент РФ на полезную модель № 82 862 U1, заявка № 2008144490/22*. - 2008.
5. **Зайцев, Д.Л.** Создание новой элементной базы для инерциальной навигации на основе молекулярно-электронной технологии / Д.Л.Зайцев, Е.В.Егоров, И.В.Егоров // *Материалы Всероссийской конференции аспирантов и студентов "Индустрия наносистем и материалы"*. - Зеленоград, 2006. - С. 105-109.
6. **Введение** в молекулярную электронику / Под ред. Н.С.Лидоренко. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 320 с.
7. **Abramovich I. A., Kharlamov A.V.** Patent No US 6,576,103 B2.
8. **Reiner J., Naroditsky M.** Patent No US 6502055 B1, G06F 15/00.
9. **Сахаров, К.А.** Исследование спектральных характеристик молекулярно-электронных преобразователей: Лабораторная работа по курсу «вакуумная электроника» / К.А.Сахаров, А.С.Шабалина. - М.: МФТИ, 1999. - С. 18-26.
10. **Козлов, В.А.** Собственные шумы молекулярно-электронных преобразователей диффузионного типа / В.А.Козлов, К.А.Сахаров // *Физические основы жидкостных и твердотельных измерительных систем и устройств обработки информации*. - М.: МФТИ, 1994. - С. 43-49.

Abstract. This paper represents results of research of possibility of application of molecular electronic technology for the solution of a problem of high-precision detection of a direction on the geographical north.

Work of molecular electronic transducers is based on reversible oxidation-reduction reactions to electrodes and on the diffusion of free carrier of charge of electrolyte in the condition of induced convection, arising under the influence of external acceleration (Fig. 2,3, Tab.1).

The method of modulation of a signal of the molecular electronic sensor of angular motion is offered. It is based on rotation of sensor around gravitational vector and axe of sensitivity is perpendicular to the gravitational vector (Fig.1). Amplitude and phase of a signal give the information about the magnitude of projection of rate of rotation of the Earth on datum latitude and about the direction on the geographical north. And this direction coincides with the maximum of registrable projection of rate of rotation of the Earth (Fig. 6, 7). The calculated values of required quantities perfectly coincide with their true values within an error (Tab.2).

The obtained data corresponds to level of the best modern gyrocompasses. Thus, on the basis of the developed experimental model serial products can be created, which will be capable to solve problem of detection of azimuth of meridian successfully. These devises can be included in various navigation systems.

Материал поступил 8.07.09