

УДК 629.3.05

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-471

*Астахов Артур Михайлович*¹,
магистрант;

*Черенькая Людмила Васильевна*²,
профессор, д-р техн. наук, ст. науч. сотр.

ОЦЕНКА НАКАПЛИВАЮЩЕЙСЯ ОШИБКИ АКСЕЛЕРОМЕТРА И ГИРОСКОПА В ЗАДАЧЕ НАВИГАЦИИ ПРИ МОНИТОРИНГЕ И ОХРАНЕ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

^{1,2} Россия, Санкт-Петербург,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
¹ astahov.am@edu.spbstu.ru, ² chern_lv@spbstu.ru

Аннотация. Данное исследование направлено на разработку и создание инерциальной системы навигации для выполнения задач мониторинга магистральных трубопроводов на основе датчиков МЭМС технологии. Основные ограничения подобных разработок связаны с накапливающейся ошибкой при использовании акселерометра и гироскопа для ориентирования в пространстве. Задачами работы являются определение углов наклона, линейной скорости и пройденного расстояния при помощи используемых датчиков, а также разработка и внедрение методов снижения ошибки при расчетах.

Ключевые слова: инерциальная система навигации, гироскоп, акселерометр, мониторинг, программное обеспечение.

*Arthur M. Astakhov*¹,
Master's Student;
*Liudmila V. Chernenkaya*²,
Professor, Doctor of Technical Sciences

ASSESSMENT OF THE ACCUMULATING ERROR OF THE ACCELEROMETER AND GYROSCOPE IN THE TASK OF NAVIGATION DURING MONITORING AND PROTECTION OF MAIN PIPELINES

^{1,2} Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia,
¹ astahov.am@edu.spbstu.ru, ² chern_lv@spbstu.ru

Abstract. This research is aimed at developing and creating an inertial navigation system for performing the tasks of monitoring main pipelines based on MEMS technology sensors. The main limitations of such developments are related to the accumulating error when using accelerometers and gyroscopes for orientation in space. The objectives of the work are to determine the angles of inclination, linear velocity and distance traveled using the sensors used, as well as to develop and implement methods to reduce calculation errors.

Keywords: inertial navigation system, gyroscope, accelerometer, monitoring, software.

Введение

В настоящее время расширение систем автоматизации в нефтегазовой отрасли приводит к существенному развитию систем контроля и эксплуатации магистральных трубопроводов. Данная тенденция приводит к необходимости реализовывать проекты, связанные с автоматизацией процессов мониторинга магистральных трубопроводов не только с точки зрения внутренних изменений трубы, но и с точки зрения контроля происходящего на прилегающих территориях, относящихся к охранной зоне, которая представляет собой участок земли по 25 метров от оси трубопровода с каждой стороны [1]. Данные мероприятия необходимы для предупреждения утечек (в том числе криминальных врезок) из магистральных трубопроводов [2]. Применение автоматизированных средств дистанционно мониторинга позволят не только снизить экономические затраты на выполнения подобных мероприятий человеком, но и увеличить частоту проводимых мероприятий мониторинга.

Основной проблемой данной задачи является протяженность подобных магистральных трубопроводов, а также их расположение в труднодоступных местах, что ограничивает возможность эксплуатации традиционных методов управления и контроля за аппаратами, занимающимися мониторингом.

Применение концепции использования радиомаяков, позволяющих определять правильность движения аппарата мониторинга вдоль магистральных трубопроводов, также ограничено в связи с большими

расстояниями, что приведет к нерациональному использованию средств на установку чрезмерного количества подобного оборудования.

Для решения подобной задачи предлагается использовать классическую инерциальную систему, позволяющую осуществлять ориентирование аппарата в областях, где отсутствует радиомаяк. Тем самым будет возможна минимизация количества устанавливаемых радиомаяков, за счет возможности аппарата мониторинга ориентироваться в пространстве в процессе прохода участка от одного радиомаяка до другого.

Основным условием, которое требуется решить при реализации подобного проекта, является минимизация ошибки инерциальной системы навигации для возможности совершения перехода из зоны одного радиомаяка до другого.

В данной работе будет исследована задача по уменьшению ошибки определения основных показателей (углы наклона и учет пройденного расстояния), используемых для навигации аппарата мониторинга магистрального трубопровода.

1. Аппаратная часть системы инерциальной навигации

Рассмотрим основные компоненты, которые будут в дальнейшем использованы при создании инерциальной системы навигации, которые будут использоваться на аппарате наземного мониторинга и охраны магистрального трубопровода.

Для решения основных задач, связанных с определением углов наклона и пройденного расстояния, будут использоваться МЭМС-акселерометр и МЭМС-гироскоп (МЭМС – микроэлектромеханические системы), представленные в виде модуля GY-521 на базе микросхемы MPU-6050.

Детальнее рассмотрим основные задачи каждого компонента.

Акселерометр – это датчик, который измеряет ускорение по трем осям [3]. Особенностью акселерометра является то, что он отображает не только ускорение по осям в виде перемещения, но также он чувствителен при наклонах, а также при любых видах вибрации. В случае, если линейная скорость акселерометра по всем осям равно нулю, то акселерометр можно использовать как датчик для определения углов наклона. Данные особенности ограничивают возможности использования подобного датчика без использования гироскопа.

Гироскоп – это датчик, измеряющий угловую скорость вращения объекта [4]. Гироскоп, как и акселерометр, способен определять угол наклона по трем осям. Его отличие от акселерометра заключается в отсутствии возможности определения линейного ускорения по осям при перемещении аппарата, а также гироскоп не подвержен появлению ошибки в данных при вибрационных воздействиях на датчик.

Для полного комплекса, позволяющего проводить анализ и мониторинг охранной зоны трубопровода, также потребуются другие датчики и

системы фотовидеофиксации, но в рассматриваемой в данном исследовании задаче будем изучать только часть, связанную с углами наклона, скоростью и, следовательно, пройденным расстоянием.

В результате микросхема MPU-6050 подключается к вычислительной составляющей аппаратного комплекса навигации, а именно к Raspberry Pi с помощью I2C шины. Дальнейшая работа с данными акселерометра и гироскопа производится с помощью данного одноплатного компьютера.

2. Программное обеспечение навигации аппарата мониторинга и охраны магистрального трубопровода

Для разработки и дальнейшей реализации программного обеспечения (ПО) для навигации аппарата мониторинга и охраны магистрального трубопровода был использован язык программирования Python.

Также для корректной работы акселерометра и гироскопа требуется провести калибровку датчиков. Для этого было создано дополнительное программное обеспечение на языке программирования Python, которое позволяет определить коэффициенты, которые необходимо учитывать для работы основного ПО [5]. На рисунке 1 представлен результат работы данного калибровочного ПО.

```
Калибровка завершена.  
Коэффициенты калибровки акселерометра: [534.348, -249.552, -847.2039999999997]  
Коэффициенты калибровки гироскопа: [-5.495, -35.96, 23.538]
```

Рис. 1. Результат работы калибровочной программы

Опишем основные принципы его работы. Программа при подключении микросхемы MPU-6050 с помощью I2C шины получает данные с датчиков, после чего производится запуск цикла калибровки акселерометра и гироскопа. После выполнения всех циклов и суммирования всех значений по осям X, Y, Z, производится выявление итогового значения.

Далее перейдем к рассмотрению основного программного обеспечения, позволяющего определить углы наклона и пройденное расстояние [6].

Вначале опишем принцип действия алгоритма вычисления углов. Для определения углов наклона по осям X и Y используются данные гироскопа и акселерометра в пропорции, представленной в (1):

$$A_x = gyro_x \cdot m + accel_x \cdot n, \quad (1)$$

где A_x – угол наклона по оси X в градусах; $gyro_x$ – значение гироскопа по оси X; m – коэффициент для значения гироскопа; $accel_x$ – значение акселерометра по оси X; n – коэффициент для значения акселерометра.

Для вычисления угла наклона по оси Y формула имеет аналогичный вид, только берутся значения гироскопа и акселерометра по оси Y.

В классическом варианте коэффициенты для гироскопа и акселерометра следующие: $m = 0,98$, а $n = 0,02$. Такие же коэффициенты

используются и в реализуемом программном обеспечении. В данном случае из-за низкого влияния данных акселерометра на значение угла наклона возможно уменьшить погрешность при вибрациях. В то же время при данных коэффициентах присутствует некоторая задержка в значении угла. При изменении коэффициентов m и n будет преобладать одна из приведенных особенностей определения угла наклона.

Перейдем к основной части данного исследования, а именно к методу определения скорости и пройденного расстояния аппарата мониторинга и охраны магистрального трубопровода.

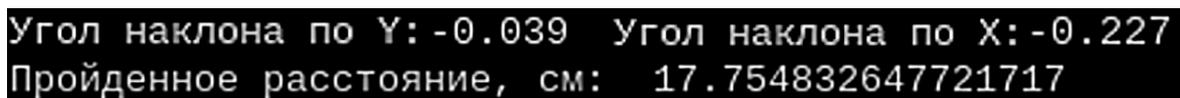
Использование только значений акселерометра не позволит дать качественный результат, так как при появляющемся наклоне аппарата мониторинга возникнет изменение значений акселерометра, что повлечет за собой искажение данных о скорости. Особенно проблемной данная ситуация станет при изменении углов положения аппарата мониторинга в двух плоскостях, что приводит к проявлению двух неизвестных, влияющих на значение линейной скорости.

Для предотвращения данного искажения используются ранее полученные на основе гироскопа и акселерометра углы наклона по осям X и Y . Благодаря корректированию значений акселерометра с помощью вычитания преобразованных данных об углах наклона возможно получение качественных показателей линейной скорости.

После проведения предварительной фильтрации данных производится дополнительная фильтрация, после которой производится определение и дальнейшее суммирование скорости аппарата мониторинга. Так как данные акселерометра не проходят фильтрацию, которая уменьшает шум графика получаемых данных (что обусловлено необходимостью учитывать максимальные значения акселерометра для возможности более точного определения линейной скорости), то для избежания возможных смещений линейной скорости при отсутствии ускорения производится обнуление значения акселерометра при линейной скорости аппарата близкой к нулю.

На основе данных ограничений производится суммирование линейной скорости для определения пройденного расстояния.

В результате было реализовано программное обеспечение [6]. Для тестирования и проверки проявляющейся ошибки данной системы было проведено некоторое количество испытаний. На рисунке 2 изображен результат работы данного программного обеспечения для определения перемещения на 20 сантиметров.



Угол наклона по Y: -0.039 Угол наклона по X: -0.227
Пройденное расстояние, см: 17.754832647721717

Рис. 2. Результат работы программного обеспечения

В данном случае ошибка вычисления пройденного расстояния составила 11,23 %, ошибка определения углов наклона не превышает 0,16 %. Среднее значение ошибки для вычисления пройденного расстояния при проведении 50 испытаний составило 9,37 %, для углов наклона – 0,12 %. Данные испытания производились при начальном запуске. При работе данной системы навигации более продолжительное время будет возникать дополнительный процент накапливающейся ошибки, что является классической проблемой эксплуатации подобных комплексов.

Заключение

Основным результатом работы является определение способов использования данных гироскопа для корректировки и фильтрации данных акселерометра для более точного определения линейной скорости аппарата мониторинга и охраны магистрального трубопровода при проходе участка между радиомаяками. Также результатом исследования является разработка готового программного обеспечения, удовлетворяющего всем поставленным задачам по определению углов наклона и линейной скорости аппарата мониторинга.

Предложенные в работе методы могут быть использованы при работе по разработке инерциальной системы навигации аппарата мониторинга и охраны магистральных трубопроводов, основанного на микроэлектромеханической системе.

Дальнейшее развитие данной темы связано с внедрением дополнительных датчиков и систем, позволяющих осуществить полный комплекс для осуществления мониторинга и охраны магистральных трубопроводов.

Список литературы

1. Романец Н. Н. Особенности транспортировки горюче-смазочных материалов по трубопроводам как элемент обстановки совершения краж ГСМ // Теория и практика общественного развития. – 2005. – № 1. – С. 85–88.

2. Глущенко Н. В., Шестаков Р. А., Комаров Д. Н., Ибрагимов М. И., Шестаков А. А. Организационно-правовые и технические аспекты обнаружения утечек нефти в магистральных трубопроводах // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2015. – № 2. – С. 34–39.

3. Жмудь В. А., Кузнецов К. А., Кондратьев Н. О., Трубин В. Г., Трубин М. В. Акселерометр и гироскоп MPU6050: первое включение на STM32 и исследование показаний в статике // Автоматика и программная инженерия. – 2018. – № 3(25). – С. 9–22.

4. Графкин В. В., Чеботарева С. В. Определение местоположения объектов в пространстве // Перспективные информационные технологии (ПИТ 2018). – 2018. – С. 978–982.

5. Астахов А. М. Программа калибровки модуля GY-521 на базе микросхемы MPU-6050. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024661030. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 15 мая 2024 г. Заявка № 2024660105. Дата поступления 09 мая 2024 г.

6. Астахов А. М. Программа определения пройденного расстояния и углов наклона на основе данных микросхемы MPU-6050. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024662716. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 30 мая 2024 г. Заявка № 2024661150. Дата поступления 18 мая 2024 г.