# ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ В USBL-СИСТЕМАХ

## Коррекция позиции подводных объектов

USBL (англ. ultra-short baseline) – это технология позиционирования, которая позволяет обнаруживать акустические (звуковые) сигналы с помощью массива гидрофонов для расчета дальности и направления на источник акустических сигналов на основе времени приема звуковой волны на каждом гидрофоне [1].

Предполагается, что буй подвергается волновым возмущениям, что приводит к угловым отклонениям относительно мировой системы отсчета выраженных терминологии Эйлера как , и для крена, тангажа и рысканья, соответственно.

Положение буя в мировой системе координат определяется как , и . Последняя величина определяется относительно уровня моря и представляет собой глубину буя, определяемую при помощи датчика давления.

Положение USBL-системы является ключевым моментов в пересчете координат наблюдаемого объекта. Определить его возможно при помощи GPS или ГЛОНАС систем, расположенных либо на базовой станции, либо непосредственно на USBL-буе. При этом требуется преобразование долготы и широты в прямоугольную метрическую систему координат для последующей обработки. Прямоугольные координаты точек в пространстве можно вычислить по известным геодезическим координатам этих точек (широта , долгота , высота ) по формулам [2]

где – радиус кривизны первого вертикала,

где и – экваториальный (большая полуось) и полярный радиусы (малая полуось), соответственно, – квадрат первого эксцентриситета эллипсоида.

Так как рассматриваемая система географически располагается в системе Земли, то экваториальный радиус км, а полярный радиус км.

Предполагается, что центр навигационной системы координат – это положение USBL-буя в начальный момент наблюдений. Полученные из уравнения (1) координаты возможно перевести в систему локальной плоскости с учетом принятого центра системы по следующим выражениям

где – координаты, смещенная относительно локального центра в прямоугольной системе отсчета, , .

В приложении к задаче позиционирования началом координат является положение USBL-буя в начальный момент наблюдений (рис. 1).

Как правило, USBL-системы возвращают величину наклонной дальности (slant range) до ответчика, а также угол курса (bearing angle) и угол наклона (elevation angle). Для повышения точности позиционирования подводных объектов требуется аппаратная надстройка, позволяющая определять углы наклона и курса USBL-буя, которая именуется AHRS (Attitude and Heading Reference System).

Объект

USBL

Рисунок 1 – Определение смещения до объекта

Используя элементарные тригонометрические выражения, возможно получить выражения для горизонтального и вертикального смещений как

где – горизонтальная дальность, – наклонная дальность, – вертикальная дальность, – угол курса.

Вертикальную дальность возможно определить по скалярной величине глубины USBL-буя и позиционируемого объекта по следующему выражению

где – матрица поворота относительно оси OX,

– матрица поворота относительно оси OY.

Матрицы поворота по крену и тангажу определяются в матричной форме по следующим выражениям

С учетом того, что USBL-буй возвращает дальности и азимутальные углы в собственной системе отсчета, требуется коррекция по угловым отклонениям.

USBL

Север (N)

Восток (E) (N)

Низ (D)

Рисунок 2 – Разделение систем координат

Ложное положение объекта определяется выражениями

Скорректированное (истинное) положение объекта определяется при повороте вектора положения на углы ориентации USBL-системы как

где матрица поворота по курсу определяется как

## Фильтрация инерциальных датчиков

Базовые комплементарные фильтры не способны хорошо бороться с вибрацией при внешних возмущениях. Вибрация вызывает ошибки вычисления углов наклона, от чего система ведет себя неустойчиво.

Есть два распространенных алгоритма, которые работают лучше комплементарного – это фильтр Калмана и фильтр Маджвика. Данный алгоритм объединения данных акселерометра, гироскопа и магнитометра был предложен Себастианом Маджвиком в 2009 году [3].

Помимо всего прочего, точность фильтра Маджвика достигает точности фильтра Калмана, но в отличие от последнего, требует меньше вычислительных ресурсов. Это очень полезное свойство, которое делает алгоритм пригодным для работы на слабых микроконтроллерах.

Углы Эйлера , и в так называемой аэрокосмической последовательности описывают ориентацию осей, достигаемую за счет последовательных вращений относительно системы отчёта А, с помощью угла вокруг оси Z, вокруг оси Y, и вокруг оси X. Такие углы Эйлера можно получить из кватерниона с помощью следующих уравнений

где – кватернион, описывающий ориентацию осей B по отношению к осям A.

Подробный алгоритм фильтра представлен в работе [3]. На рисунке приведена блок-схема, представляющая полный фильтр с магнитометром, включающий компенсацию магнитного искажения (группа 1) и компенсацию дрейфа гироскопа (группа 2).

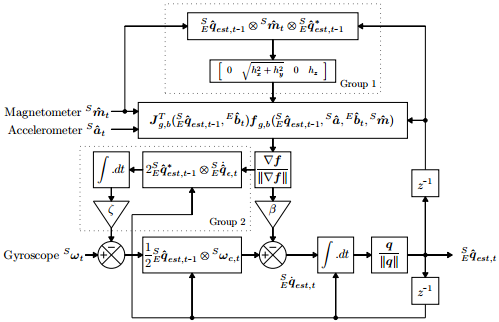


Рисунок 3 – Блок-схема фильтра Маджвика

## Реализация AHRS-платформы

Для макета AHRS будем использовать фильтр Маджвика для обработки данных с модуля MPU6050, который имеет в своем составе датчик ускорения – акселерометр и датчик скорости вращения – он же гироскоп, а также модуль HMC5883L, представляющий собой трехосевой цифровой компас.

В качестве вычислительного блока используется плата WeMos D1 R2. Программирование платы осуществляется с помощью стандартной среды разработки Arduino IDE. Контроллер включает в себя процессор, периферию, оперативную память и устройства ввода/вывода.

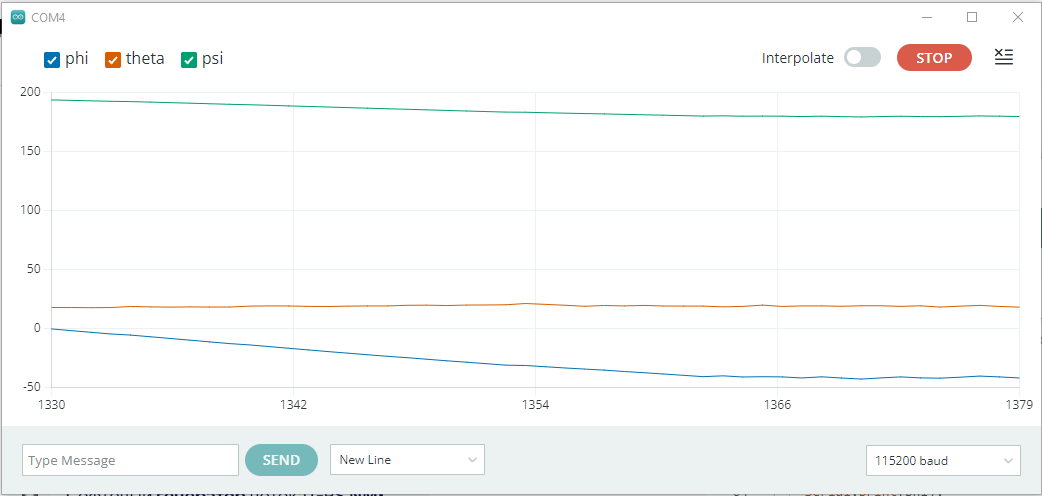


Рисунок 4 – Графики углов Эйлера с AHRS

В результате, имея ориентацию и положение USBL-системы, возможно произвести алгоритм коррекции позиционирования по наклонным дальностям и углам курса. Пример результата реализации алгоритма в Matlab приведен на рис. 5.



Рисунок 5 – Результаты работы алгоритма

# СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Kebkal K. G. [и др.]. Performance of a combined USBL positioning and communication system using S2C technology Yeosu, Korea (South): IEEE, 2012.C. 1–7.

2. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. Global Positioning System: theory and practice / B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, J. Collins, 4th, rev. ed-е изд., Wien: Springer-Verlag, 1997.

3. Madgwick, Sebastian. “An efficient orientation filter for inertial and inertial / magnetic sensor arrays.” (2010).