

## **АДАПТИВНОЕ ГОЛОСОВАНИЕ В ИЗБЫТОЧНЫХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ATTENTION-МЕХАНИЗМА И ВСТРАИВАЕМОЙ РЕАЛИЗАЦИЕЙ НА ОСНОВЕ TINYML**

**Шейх Альард М.Г. 1**

**Научный руководитель – преподаватель (квалификационная категория "преподаватель практики") Беляев С. С. 1**

1 Университет ИТМО  
Ghaith936433193@yahoo.com

Работа выполнена в рамках темы НИР «Надёжная оценка движения на основе голосования датчиков и конструирования виртуальных IMU в избыточных инерциальных системах»

### **Введение**

Современные встраиваемые робототехнические и навигационные системы требуют высокой точности и отказоустойчивости оценки ориентации при ограниченных вычислительных ресурсах. Основными источниками ошибок в инерциальных системах являются шум измерений, нестабильность смещения гироскопов и накопление интегрального дрейфа [2]. Применение нескольких независимых инерциальных измерительных блоков (далее – Inertial Measurement Unit, IMU) повышает надёжность, однако традиционные методы агрегации (усреднение, фиксированное голосование, пороговая отбраковка) предполагают стационарность шумов и не адаптируются к деградации сенсоров [2, 3].

Проблема заключается в отсутствии адаптивного механизма объединения измерений избыточных IMU, способного учитывать нестационарность шумов и частичные отказы датчиков при сохранении детерминированного времени вычислений на микроконтроллерных платформах.

Целью работы является разработка робастной структуры оценки ориентации с динамической переоценкой достоверности сенсоров и реализацией в формате TinyML.

### **Основная часть**

Предлагается формирование виртуального IMU как взвешенной комбинации измерений нескольких датчиков. Весовые коэффициенты определяются адаптивно на основе attention-механизма [4], анализирующего признаки, извлечённые из скользящего окна измерений. Такой подход обеспечивает перестановочную инвариантность относительно порядка сенсоров и автоматическое снижение вклада деградировавших модулей.

Оценка ориентации выполняется в рамках рекурсивного фильтра [1], вектор состояния которого включает параметр ориентации и смещение гироскопа. На этапе прогноза используется угловая скорость виртуального IMU с учётом текущей оценки смещения, на этапе коррекции осуществляется уточнение состояния. Параметры фильтра согласованно адаптируются с использованием выходов attention-модуля, что обеспечивает совместную настройку процедуры голосования и компенсации смещения.

Научная новизна заключается в разработке перестановочно-инвариантного механизма адаптивного голосования для избыточных инерциальных систем на основе attention-подхода [4] с интеграцией в рекурсивную схему оценки ориентации [1] и реализацией на микроконтроллерной платформе с детерминированным временем обработки.

Проведено сравнение с методами прямого интегрирования гироскопа и виртуального IMU с фиксированными весами. При повышенном уровне шума

среднеквадратическая ошибка составила 0,138 рад, 0,017 рад и 0,0048 рад соответственно. Реализация на платформе класса ESP32 обеспечила время инференса порядка 15 мс при периоде дискретизации 20 мс и ошибку до 0,038 рад.

#### **Выводы.**

Практическая значимость работы заключается в возможности применения предложенного метода во встраиваемых системах с повышенными требованиями к надёжности и устойчивости к деградации датчиков при сохранении ограниченных вычислительных ресурсов.

#### **Литература**

1. Kalman R. E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. 1960.
2. Groves P. D. Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems. 2013.
3. Foxlin E. Inertial Head-Tracker Sensor Fusion by a Complementary Separate-Bias Kalman Filter. 1996.
4. Vaswani A. et al. Attention Is All You Need. 2017.