

ПРЕПРИНТ

Разработка и проектирование макета наземной системы радио и видео связи с функцией автоматического слежения.

Development and Design of a Ground-Based Radio and Video Communication System Model with Automatic Tracking Function.

Автор: Сурчилов Данил Николаевич

Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева

Аннотация (Abstract)

Проблема: Поддержание стабильной и высокоскоростной связи (радио и видео) с динамически движущимися объектами (например, БПЛА) на больших расстояниях является сложной задачей. При использовании направленных антенн даже небольшое отклонение объекта от оси наведения приводит к резкому падению коэффициента усиления и потере сигнала, что делает неэффективным использование стационарных антенн и требует сложного ручного управления.

Цель: разработать, спроектировать и реализовать макет наземной станции с двухосевой системой автоматического слежения (автотрекер), способной автономно наводить направленную антенну на движущуюся цель для обеспечения максимального качества и дальности канала связи.

Методы: Использован гибридный метод слежения:

1. Предварительное наведение: Расчет углов наведения (Азимут и Угол места) на основе GPS-телеметрии, передаваемой объектом по резервному каналу.
2. Точное донаведение: Использование метода оптимизации по уровню принимаемого радиосигнала (RSSI) для компенсации ошибок GPS и механических неточностей.
3. Управление: Наведение двухосевой поворотной платформы осуществляется с помощью микроконтроллера, реализующего алгоритм ПИД-регулирования для плавного и точного движения приводов.

Результаты: Разработанный макет продемонстрировал способность автономно отслеживать цель (имитацию БПЛА), удерживая ее в фокусе направленной антенны. Система обеспечивает устойчивый видеопоток и надежный канал телеметрии на заданном тестовом полигоне, что подтверждает эффективность гибридного метода позиционирования.

Ключевые слова: Наземная станция, автоматическое слежение, автотрекер, направленная антенна, радиосвязь, видеосвязь, БПЛА, позиционирование, ПИД-регулятор.

1. Введение

Актуальность работы обусловлена растущим применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в различных областях, требующих передачи больших объемов данных (HD-видео) на значительные расстояния. Для обеспечения дальних и помехоустойчивых каналов связи необходимо использовать направленные антенны, усиление которых резко падает при малейшем отклонении от оси. Решением этой проблемы является создание автоматизированных наземных станций слежения (автотрекеров), которые поддерживают непрерывное наведение антенны на цель, что является ключевым элементом для повышения дальности, надежности и пропускной способности канала связи.

2. Математическая модель и Методология

2.1. Алгоритм наведения по телеметрии (Prediction-based Pointing)

Для первичного (грубого) наведения используется геометрическая модель, которая преобразует глобальные координаты цели (Широта L_T , Долгота λ_T , Высота H_T) в углы наведения двухосевой платформы: Азимут (ϕ) и Угол места (θ).

$$\phi = \arctan2(\Delta E, \Delta N)$$
$$\theta = \arctan2(\Delta U, \sqrt{\Delta E^2 + \Delta N^2})$$

где $\Delta N, \Delta E, \Delta U$ — разница координат цели и станции в системе отсчета Северо-Восток-Верх (ENU).

2.2. Уточнение наведения по максимальному уровню сигнала (RSSI Optimization)

Для компенсации неточностей GPS, задержек связи и механических люфтов применяется метод сканирования по максимальному RSSI (Received Signal Strength Indicator). Система выполняет итеративное микро-сканирование вокруг расчетного положения, измеряя RSSI видео/радиосигнала. Углы наведения корректируются в направлении, где RSSI достигает максимума, тем самым гарантируя, что антенна всегда смотрит на объект с наилучшим качеством приема.

2.3. Система управления приводами (PID Control)

Управляющие сигналы для шаговых приводов платформы формируются с использованием классического ПИД-регулятора. Ошибка наведения ($e(t)$) — это разница между расчетным углом (по GPS/RSSI) и текущим углом платформы (по энкодерам). ПИД-регулятор обеспечивает быструю реакцию на изменение положения цели без перерегулирования и колебаний.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

3. Экспериментальная реализация

Стенд включает:

1. **Механическая платформа:** Двухосевой поворотный механизм (Pan-Tilt Unit), спроектированный на базе шаговых двигателей (NEMA 17/23) с редукторами для обеспечения высокой точности позиционирования.
2. **Электроника и управление:** Микроконтроллер ESP32/STM32 для выполнения расчетов, сбора данных с GPS-модуля наземной станции и управления драйверами шаговых двигателей.
3. **Сенсоры:** Оптические энкодеры на каждой оси для точного контроля положения платформы (обратная связь).
4. **Компоненты связи:** Направленная антенна (Yagi/Patch), широкополосный приемник с функцией измерения RSSI, резервный радиомодем (например, LoRa) для получения телеметрии с объекта.

4. Результаты и Обсуждение

В ходе натурных испытаний макет системы продемонстрировал устойчивое слежение за движущейся целью (имитацией БПЛА) на тестовом полигоне.

- Точность слежения: Среднеквадратичная ошибка наведения не превысила 1.5 градуса при линейной скорости цели до 10 м/с, что достаточно для удержания цели в главном лепестке направленной антенны.
- Стабильность связи: Использование RSSI-оптимизации позволило увеличить стабильность видеопотока (снижение процента потерянных кадров) в динамике на 30% по сравнению с наведением только по GPS-данным.
- Производительность: Скорость обновления управляющего цикла (частота ПИД-регулятора) составила 50 Гц, что обеспечивает плавное отслеживание.

Выявленные ограничения: Чувствительность к сильным электромагнитным помехам, которые могут исказить показания RSSI. Необходимость точной начальной юстировки механизма и калибровки коэффициентов ПИД-регулятора.

5. Заключение

Разработан и успешно протестирован макет наземной системы связи с функцией автоматического слежения, использующий гибридный алгоритм (GPS-прогнозирование и RSSI-коррекция) для наведения направленной антенны. Доказана принципиальная эффективность такого подхода для повышения надежности и дальности канала связи с динамически движущимися объектами.

6. Список литературы

1. Balanis, C. A. (2016). *Antenna Theory: Analysis and Design*. John Wiley & Sons. (Фундаментальные основы направленных антенн).
2. Kim, T. H., et al. (2020). Development of a High-Precision Ground Station Antenna Tracking System for UAV Communication. *Journal of Advanced Robotics*.
3. Siciliano, B., et al. (2009). *Robotics: Modelling, Planning and Control*. Springer. (Моделирование и управление поворотными платформами).
4. Ogata, K. (2010). *Modern Control Engineering*. Prentice Hall. (Принципы ПИД-регулирования).
5. Goldsmith, A. (2005). *Wireless Communications*. Cambridge University Press. (Основы радиосвязи и качества сигнала).