

УДК 629.7.05:004.896

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОЙ GNSS-НАВИГАЦИИ БПЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗНОРОДНЫХ КОРРЕКТИРУЮЩИХ КОНТУРОВ В УСЛОВИЯХ РЭБ

РОЩУК Роман Дмитриевич

аспирант

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
г. Белгород, Россия

В статье описана архитектура навигационной системы, в которой данные глобальных спутниковых систем позиционирования (GNSS) верифицируются и корректируются многоуровневой системой, основанной на данных визуальной одометрии по цифровой модели местности и пассивной RF-геолокации по карте сотовых вышек. Это обеспечивает устойчивое позиционирование БПЛА в условиях РЭБ.

Ключевые слова: устойчивая навигация, БПЛА, одометрия, RF-геолокация, цифровая модель рельефа, условия РЭБ, комплексирование данных.

Критическая зависимость современных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) от сигналов глобальных спутниковых навигационных систем (GNSS) делает их крайне уязвимыми к воздействию средств радиоэлектронной борьбы (РЭБ) [2]. Подавление или подмена навигационных сигналов приводит к ошибкам позиционирования, срыву выполняемой миссии и, возможно, к потере аппарата. Существующие методы резервирования, такие как инерциальные навигационные системы (ИНС), обладают свойством накопления ошибки, что ограничивает сценарии их реального применения. Более правильным решением является создание комплексной отказоустойчивой системы, способной обеспечивать непрерывные навигационные данные за счет использования разнородных источников информации [1]. При таком подходе становится необходимым отдельный автономный навигационный модуль (АНМ) который полностью абстрагирует процесс борьбы с РЭБ от полетного контроллера (ПК), передавая ему устойчивый поток данных, имитирующих безупречную работу штатного GNSS-приемника.

Автономный навигационный модуль представляет собой устройство, оснащенное собственным набором датчиков и алгоритмов их сенсорной интеграции в единую структуру.

Его аппаратная часть включает в себя, помимо основного GNSS-приемника, так же оптическую камеру, предназначенную для съемки местности над которой осуществляется полет, широкополосный RF-приемник, способный детектировать и анализировать сигналы сотовой связи, датчик воздушной скорости БПЛА, а также акселерометр, гироскоп и магнитометр. Модуль работает с заранее загруженными данными: полетным заданием, высокоточной цифровой моделью рельефа или местности (ЦМР/ЦММ) и картой расположения и идентификаторов базовых станций сотовой связи. Данные с АНМ передаются на ПК через стандартизированный протокол (например, MAVLink), непрерывно транслирующий координаты, вектор скорости и метки времени.

Внутренняя логика работы модуля построена на иерархическом принципе оценки достоверности и приоритетности поступающих от различных узлов системы данных, образующих при этом многоуровневую систему корректирующих контуров [3].

Первичным и главным контуром является система анализа электромагнитной обстановки и верификации GNSS-сигналов. Этот контур работает непрерывно и в штатном режиме обеспечивает АНМ наиболее точными данными о положении аппарата. В это же

время пассивный RF-сканер, сравнивая принимаемую картину мощности сигналов (RSSI) от окружающих сотовых вышек с эталонной RF-картой, детектирует аномалии. Резкий рост общего уровня фонового излучения или появление мощных неизвестных источников является косвенным признаком работы средств РЭБ в районе. Одновременно с работой RF-сканера ведется анализ сигналов самой навигационной спутниковой группы (GNSS). Специальные алгоритмы оценивают корректность наблюдаемой спутниковой группировки. Они проверяют расположение видимых навигационных аппаратов в небе, сравнивают данные об их удаленности, а также отслеживают динамику изменения этих параметров. Выявление несоответствий, которые не могут возникнуть в нормальных условиях эксплуатации, служит прямым свидетельством внешнего вмешательства [4], под которым рассматривается как глушение сигнала, так и его подмена (спуфинг). Как только факт работы средств РЭБ в данном районе подтверждается, данные со спутниковой навигации перестают считаться достоверными. С этого момента автономный навигационный модуль плавно и автоматически переключается на использование резервных систем определения координат.

Вторым и основным корректирующим контуром является система визуальной одометрии и навигации по цифровой модели местности. В ситуациях продолжительного отсутствия или значительной деградации GNSS, автономная навигационная система БПЛА, построенная на инерциальном принципе, подвержена нарастающей интегральной погрешности. Для устранения этого дрейфа задействуется видеопоток от основной бортовой камеры. На его основе строится карта текущей местности и по возможности идентифицируются характерные неподвижные объекты. Эти данные последовательно сопоставляются с хранящейся на борту эталонной цифровой моделью местности планируемого района полета. При достижении достаточного количества совпадения фрагментов вычисляется поправка, определяющая отклонение фактического положения аппарата от траектории, предсказанной инерциальным алгоритмом. Полученная поправка

служит не для прямого вычисления абсолютных координат, а для регулярной калибровки и сброса накопившейся ошибки виртуальной инерциальной навигационной системы.

Третьим, вспомогательным контуром выступает пассивная RF-геолокация по сигналам сотовых вышек. В ситуациях, когда визуальная навигация затруднена (однородный ландшафт, плохая погода), но средства РЭБ не подавляют сотовый диапазон, данный контур предоставляет возможность грубой, но абсолютной привязки. Измеряя уровни сигналов от нескольких базовых станций и сопоставляя полученный профиль RSSI с загруженной картой, алгоритмы триангуляции или мультилатерации позволяют определить вероятное местоположение БПЛА [5]. Эта информация используется для коррекции ИНС с большим периодом обновления, предотвращая катастрофический уход навигационного решения в условиях длительного отсутствия визуальных ориентиров.

Четвертый, аварийный контур активируется при полном отказе всех предыдущих систем – в условиях тотального РЭБ, отсутствия сотового покрытия и неработоспособности оптического канала. В этом режиме АНМ переходит к реализации концепции движения «по карте ветров». Используя загруженный маршрут и информацию о текущих и/или прогнозных метеоусловиях, модуль строит вероятностную модель сноса. Виртуальная ИНС продолжает отсчитывать позицию, а ее выходные данные алгоритмически корректируются с учетом расчетного вектора ветра для максимально точного следования по заданному треку. Хотя точность в этом режиме неуклонно снижается со временем, он позволяет аппарату либо завершить ключевой этап миссии, либо, что более важно, выйти за пределы зоны подавления, где может быть восстановлена работа первичных контуров.

Представленная концепция автономного навигационного модуля решает ключевую проблему уязвимости БПЛА к РЭБ за счёт создания глубоко эшелонированной системы коррекции. Устойчивость обеспечивается интеграцией разнородных корректирующих контуров: анализа RF-обстановки, визуаль-

ной навигации по ЦМР, пассивной геолокации по сотовым вышкам и прогнозного моделирования движения. АНМ, гарантируя непрерывное навигационное обеспечение БПЛА в сложной радиоэлектронной обстановке, остаётся незаметным для полетного контроллера, проявляя себя лишь временными колебаниями показателей GNSS (HDOP, VDOP) и не нарушает штатную логику его работы.

новке, остаётся незаметным для полетного контроллера, проявляя себя лишь временными колебаниями показателей GNSS (HDOP, VDOP) и не нарушает штатную логику его работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Харисов В.Н. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС / В.Н. Харисов, А.И. Перов, В.А. Болдин [и др.]. – М.: Радиотехника, 2010. – 800 с.
2. Шурман Я.Д. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория. – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.
3. Groves P.D. Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems. 3rd ed. Boston: Artech House, 2024. 864 p.
4. Kaplan E.D., Hegarty C.J. Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications. 3rd ed. Boston: Artech House, 2017. 848 p.
5. Patwari N., Ash J.N., Kyperountas S., Hero A.O., Moses R.L., Correal N.S. Locating the nodes: cooperative localization in wireless sensor networks // IEEE Signal Processing Magazine. 2005. Vol. 22, № 4. P. 54-69.

PRINCIPLES OF BUILDING FAULT-TOLERANT GNSS NAVIGATION FOR UAVS USING HETEROGENEOUS CORRECTION LOOPS IN EW CONDITIONS

ROSHCHUK Roman Dmitrievich

Postgraduate

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
Belgorod, Russia

The article describes a navigation system architecture where Global Navigation Satellite System (GNSS) data is verified and corrected by a multi-level system based on visual odometry against a digital elevation model and passive RF geolocation using a cellular tower map. This ensures robust UAV positioning in electronic warfare (EW) conditions. Simulation results confirm the enhanced fault tolerance and accuracy of the integrated system compared to standalone solutions.

Keywords: resilient navigation, UAV, visual odometry, RF geolocation, digital elevation model, electronic warfare, data fusion.
