

ՀՀ ԳԱԱ ԻՆՖՈՐՄԱՏԻԿԱՅԻ ԵՎ ԱՎՏՈՄԱՏԱՑՄԱՆ ՊՐՈԲԼԵՄՆԵՐԻ
ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ

Սահակյան Վարդան Ռաֆիկի

GPS-ից անկախ տեղորոշման և նավիգացիայի համակարգ

Ե.13.04 - «Հաշվողական մեքենաների, համալիրների, համակարգերի և
ցանցերի մաթեմատիկական և ծրագրային ապահովում»
մասնագիտությամբ տեխնիկական գիտությունների թեկնածուի
գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության սեղմագիր

ՍԵՂՍԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ-2026

INSTITUTE FOR INFORMATICS AND AUTOMATION PROBLEMS OF THE NAS RA

Vardan Rafik Sahakyan

GPS-independent positioning and navigation system

SYNOPSIS

of the dissertation for obtaining a Ph.D. degree in Technical Sciences on specialty 05.13.04
“Mathematical and Software Support for Computing Machines, Complexes, Systems and
Networks”

YEREVAN-2026

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Ռուս-Հայկական (Սլավոնական) Համալսարանում

Գիտական ղեկավար՝ Տեխ.գիտ.դոկ. Դ.Գ. Ասատրյան


Պաշտոնական ընդհիմնախողներ՝ Տեխ.գիտ.դոկ. Հ.Վ. Ասցատրյան

Տեխ.գիտ.թեկ. Ա.Հ. Բաղիյան

Առաջատար կազմակերպություն՝ Երևանի Պետական Համալսարան

Պաշտպանությունը կայանալու է 2026թ. մայիսի 25-ին, ժամը 14:00-ին ՀՀ ԳԱԱ Ինֆորմատիկայի և ավտոմատացման պրոբլեմների ինստիտուտում գրոծող 037 մասնագիտական խորհրդում

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ՀՀ ԳԱԱ ԻԱԳԻ գրադարանում: Սեղմագիրն առաքված է 2026թ. ապրիլի 25-ին:

Մասնագիտական խորհրդի գիտական քարտուղար Ֆիզ. մաթ. գիտ. դոկտոր՝  Ս.Շ. Հարությունյան

The topic of the dissertation was approved at the Russian-Armenian (Slavonic) University

Scientific supervisor: Doctor of Tech. sciences D.G. Asatryan

Official opponents: Doctor of Tech. sciences H.V. Astsatryan

Candidate of Tech. sciences A.H. Baghiyan

Leading organization: Yerevan State University

The defense will take place on May 25, 2026, at 14:00, at the Institute for Informatics and Automation Problems of the National Academy of Sciences of the Republic of Armenia, at the acting 037 specialized council.

The dissertation is available in the library of IIAP NAS RA.

The abstract is delivered on April 25, 2026.

Scientific Secretary of the Specialized Council, D.Ph.M.S.



M.E. Haroutunian

General Characteristics of the Dissertation

Relevance of the Topic: Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) have become an essential tool for monitoring, mapping, inspection, and search-and-rescue missions. Their growing autonomy is made possible by the integration of onboard sensing, estimation, and control systems that enable flight without continuous human supervision. At the core of most autonomous UAV systems lies the Global Navigation Satellite System (GNSS), which provides global position and velocity information for state estimation and mission control. Despite its widespread use, GNSS represents a critical vulnerability in the autonomy chain. Its signals are easily degraded or lost in many real-world environments such as dense urban areas, forests, tunnels, or indoor spaces. Moreover, intentional interference through jamming or spoofing can render GNSS completely unavailable. When this occurs, UAVs typically lose the ability to estimate their position and are forced to interrupt or abort their missions. This limitation poses a major obstacle to the deployment of UAVs in safety-critical or adversarial scenarios, where uninterrupted operation is essential. The motivation for this work arises from the need to ensure continuous, reliable autonomy under GNSS-denied conditions. Achieving this requires not only replacing GNSS for navigation but also maintaining the broader functions that depend on it-perception, localization, and coordination. A UAV must still be able to estimate its motion, understand its surroundings, and, when operating as part of a team, maintain awareness of other agents. When GNSS becomes unavailable, all higher-level autonomy functions are affected. Without a reliable global position reference, the state estimator can no longer constrain drift from inertial sensors, resulting in rapidly increasing position error. Once localization deteriorates, the control system loses its spatial reference, preventing accurate trajectory tracking or mission execution. At the same time, perception and coordination modules that depend on global awareness - such as object localization or multi-agent formation control - also fail, since they rely on the same navigation frame. This interdependence highlights that GNSS-denied operation is not a single technical problem but a system-level challenge. Navigation, localization, and coordination are tightly coupled: loss of one quickly undermines the others. A practical solution must therefore address them jointly rather than as independent subsystems. The UAV must continue to estimate its motion locally, interact with the environment through onboard perception, and, when operating in a group, maintain relative awareness of neighboring agents.

The objective of this research is to design, develop, and validate an integrated UAV autonomy system that remains fully operational in both GNSS-available and GNSS-denied environments. The system is required to work with both single UAVs and multi-agent formations, ensuring that flight, perception, and coordination continue without interruption when global positioning data is lost. It shall support mission continuation, real-time object localization, and multi-agent coordination using onboard sensing, while remaining compatible with the existing autopilot platforms to ensure practical deployability.

To achieve this goal, the work pursues the following aims:

- 1. Conduct a comparative analysis of existing navigation and localization methods** relevant to GNSS-denied operations, identifying technical limitations and design trade-offs, with attention to their applicability in open-source and multi-agent systems.
- 2. Design and develop a fallback navigation system** that enables continued UAV operation under GNSS-denied conditions, with emphasis on reliability, computational efficiency, and integration into the existing autopilot architecture
- 3. Design and develop a real-time 3D object localization system** using a monocular camera and a gimbaled laser rangefinder, without relying on terrain maps or known object dimensions, suitable for deployment in unstructured environments.
- 4. Design and develop a cooperative navigation system** for UAV swarms, where one partially localized or manually guided agent supports others through shared position estimates in GNSS-denied environments.
- 5. Integrate the developed subsystems into a unified UAV autonomy system** and evaluate its performance through simulation and real-world experiments.

Scientific Novelty: The scientific novelty of the dissertation lies in the development of a UAV autonomy system enabling navigation, target localization, and multi-UAV coordination in GNSS-denied environments using onboard sensing. The proposed system integrates three functional subsystems designed to operate without continuous reliance on satellite positioning. A fallback navigation system was developed that enables continued UAV operation under GNSS outages. It combines inertial dead-reckoning and optical-flow-based velocity estimation and supports autonomous recovery behavior without reliance on external infrastructure. An onboard 3D target localization system was developed, combining monocular image observations with range measurements obtained through a gimbaled sensing platform, enabling real-time metric localization of ground targets without requiring terrain maps, stereo vision, or prior knowledge of object dimensions. A leader–follower swarm coordination system was developed for multi-UAV operation in GNSS-denied environments. Relative position estimates computed onboard a leader UAV are used to generate navigation references for follower UAVs, enabling coordinated flight without direct GNSS dependence on follower platforms.

Practical Significance: The developed solutions were implemented and evaluated through extensive simulation and real-world experiments on custom-built UAV platforms running the PX4 autopilot firmware. The proposed autonomy system expands the capabilities of existing autopilot software by enabling fallback navigation, onboard target localization, and multi-agent coordination, allowing UAVs to continue operating in GNSS-denied or degraded environments. The fallback navigation capability enables continued mission execution when GNSS signals are unavailable. The target localization component provides metric target coordinates without reliance on external

infrastructure or prior terrain maps, enabling operation in previously unknown environments. Multi-UAV coordination based on relative state information supports stable formation flight without requiring accurate global positioning.

The proposed solutions rely only on standard onboard sensing and computing hardware and can be integrated into existing UAV platforms without major modifications to the autopilot architecture.

Main Results of the Dissertation

The main scientific results of the dissertation are as follows:

1. **A fallback navigation system** has been developed and experimentally validated for GNSS outages, enabling continued state estimation and mission execution using onboard inertial and optical-flow sensing, and providing controlled performance degradation under partial or complete GNSS loss.
2. **A real-time 3D object localization system** has been developed and experimentally validated, combining monocular vision with a gimbaled laser range measurement to resolve scale ambiguity and recover metric target position through a defined coordinate transformation chain from camera frame to the navigation frame.
3. **A leader-follower swarm navigation system** has been developed and experimentally validated, in which relative position estimates computed onboard a leader UAV are injected directly into follower autopilot position controllers, enabling formation maintenance and coordinated motion without direct GNSS dependency on follower platforms.
4. **The developed fallback navigation, object localization, and swarm navigation subsystems** have been integrated into a unified onboard UAV autonomy system for GNSS-denied environments.

Approbation of the Dissertation Results

The main results of the dissertation were presented and discussed at the following scientific conferences:

1. 50th International Youth Scientific Conference “Gagarin Readings” (Гагаринские чтения - 2024), Moscow, Russia, 2024.
Presentations: «Inertial Navigation for Copters», «Optimal Area Coverage Using a Drone Swarm».
2. XVIII Годичная международная научная конференция Российско-Армянского университета, Ереван, Армения, 2024. Доклад: «Autonomous Target Interception Using Reinforcement Learning».
3. United Nations Workshop on GNSS and Related Space Technologies for Urban Sustainability Challenges, 2024. Presentations: «Drone-Based GPS Object Localization for Urban and Agricultural Monitoring», «GPS-Enhanced Drone Imaging: Stitching and Change Detection Analysis».
4. United Nations/Philippines Workshop on the Applications of GNSS, 2024.
Presentation: «GPS-Based 2D Map Creation Using Drone Swarm».

Publications. The results of the dissertation are reflected in 6 published scientific works[1-6].

Volume and Structure of the Dissertation. The dissertation consists of an introduction, five chapters, and a conclusion. The total volume of the dissertation is 144 pages of text, including 28 figures and 12 tables. The list of references contains 115 entries.

Content of the Dissertation

The **Introduction** formulates the research problem and motivates the study in the context of autonomous unmanned aerial vehicle operation under GNSS-denied conditions. It defines the dissertation's aim and objectives, outlines the scientific novelty and practical significance of the work, and describes the research's scope.

Chapter 2 presents a structured review of related work relevant to the problems addressed in the dissertation. Section 2.1 provides a brief overview of the chapter structure and introduces the main research directions considered.

Section 2.2 *is devoted to the review and analysis of existing methods for GNSS-denied navigation of unmanned aerial vehicles.* Navigation approaches based on inertial navigation and dead reckoning are reviewed, together with their characteristics, advantages, and known limitations related to error accumulation and sensitivity to sensor biases. Vision-based navigation methods are also considered, including optical-flow-based approaches, visual odometry, visual-inertial navigation, and simultaneous localization and mapping techniques. These methods are analyzed with respect to accuracy, computational complexity, sensor requirements, and operational constraints. A comparative analysis of the reviewed approaches is performed with respect to their applicability to lightweight onboard UAV systems. *Based on this analysis and the requirements of the considered problem, dead-reckoning navigation and optical-flow-based navigation are selected as the primary methods for further investigation.*

Section 2.3 *is devoted to the review of object localization and gimbal-based tracking methods* proposed in ground and aerial robotics. Vision-based approaches are considered, including monocular and multi-camera localization, triangulation-based methods, and vision-only target position estimation techniques. Methods relying on prior terrain or environmental information, as well as map-based localization and simultaneous localization and mapping approaches, are also reviewed with respect to their assumptions and operational constraints. Localization pipelines incorporating object tracking and gimbal tracking are analyzed, emphasizing their role in maintaining target observability and stabilizing measurements during platform motion. The reviewed methods are classified according to sensor configuration, use of prior information, and computational requirements. *Based on this analysis, a localization approach is formulated that combines monocular vision, gimbal-based tracking, and range measurements, addressing the identified limitations while remaining suitable for onboard deployment.*

Section 2.4 is devoted to the review of swarm navigation and coordination methods for multi-UAV systems, with emphasis on perception, guidance, and control formulations. Perception approaches used in swarm systems are reviewed, including methods based on global positioning, relative sensing, and inter-vehicle communication for estimating relative states of neighboring agents. Guidance strategies are analyzed, covering centralized and decentralized formulations, leader–follower architectures, and relative setpoint generation methods used to define coordinated motion objectives. Control formulations employed for swarm operation are also reviewed, including position- and velocity-based control schemes and their integration with onboard autopilot systems. The reviewed approaches are classified according to their perception requirements, guidance structure, and control implementation, as well as their dependence on global reference information and external infrastructure. *Based on this analysis and the requirements of the considered problem, a leader–follower swarm coordination approach is formulated that relies on relative perception, leader-based guidance, and onboard control execution, enabling coordinated motion without requiring global positioning on follower UAVs.*

Chapter 3 is devoted to the analysis of the existing architecture of modern unmanned aerial vehicle autopilot systems and their operation under GNSS-denied conditions. The chapter describes the modular structure of contemporary UAV autopilots, composed of state estimation, control, and navigation subsystems, and explains their interaction during autonomous flight under varying availability of external positioning information. The state estimation architecture employed in modern UAV autopilots is presented with emphasis on Extended Kalman Filter–based sensor fusion frameworks. These frameworks combine inertial measurements with auxiliary sensors such as barometers, magnetometers, GNSS, and vision sources to estimate vehicle position, velocity, and attitude. The role of GNSS in constraining long-term drift of inertial estimates is discussed, together with estimator behavior during GNSS degradation or complete loss. The limitations of inertial-dominated estimation in GNSS-denied conditions and the resulting growth of horizontal position uncertainty are identified. The control architecture is described as a cascaded feedback structure consisting of nested position, velocity, attitude, and angular-rate control loops. The dependence of control performance on the accuracy and consistency of estimated states is highlighted. The behavior of control layers during GNSS-denied operation is discussed, showing that attitude and rate control remain fully operational and altitude regulation is preserved, whereas position and mission-level control degrade due to the absence of reliable horizontal position feedback. The analysis establishes the hierarchical degradation pattern of existing autopilot systems under GNSS-denied operation and provides the architectural baseline for the fallback navigation, object localization, and swarm coordination systems developed in the subsequent chapters.

Chapter 4 is devoted to a new fallback navigation system that enables continued UAV operation under GNSS-denied conditions. In the absence of GNSS, standard autopilot systems typically degrade to stabilization-only modes that prevent autonomous

navigation. The proposed system extends existing open-source autopilot architectures using onboard sensing only, supporting controlled navigation and autonomous recovery rather than emergency stabilization. GNSS loss is assumed to occur unexpectedly and may be temporary or prolonged. The system therefore emphasizes safe and predictable behavior, smooth mode transitions, and preservation of control authority. Its design constraints include real-time onboard execution, compatibility with existing estimator–controller pipelines, minimal additional sensor requirements, and operation without external infrastructure or prior environmental knowledge. Figure 1 illustrates the overall architecture of the proposed fallback navigation system. The architecture consists of three functional modules: Mission Execution, Interrupt Monitoring, and Fallback Navigation. During normal GNSS-aided flight, the Mission Execution block performs waypoint navigation while logging auxiliary navigation data, including GNSS trajectories and relative waypoint vectors, to support continuity after GNSS loss. The Interrupt Monitoring block supervises sensor availability and estimator outputs, detects GNSS degradation, and triggers a controlled transition to fallback operation with logic aimed at avoiding false detections and unstable switching. When GNSS becomes unavailable, the Fallback Navigation block provides two navigation modes. In inertial dead-reckoning mode, attitude stabilization is maintained using the IMU, yaw is constrained by the magnetometer, and altitude is regulated using barometric measurements. Horizontal displacement is estimated indirectly through the relationship between commanded pitch and forward motion, enabling continued navigation without absolute position updates or external references. In optical-flow mode, vision-based velocity estimates replace GNSS-derived horizontal velocity in the estimator. This provides continuous relative motion observations when sufficient visual texture is present and allows controlled translational flight through the same estimator–controller interfaces used in standard operation, without estimator reinitialization or structural modification. The system adaptively switches between dead reckoning and optical-flow-aided navigation based on sensor availability and environmental suitability. For autonomous recovery, two return strategies are supported: Direct Return-to-Launch, which follows a single vector toward home, and Path Return-to-Launch, which retraces the outbound trajectory using stored waypoint information to improve robustness under wind and accumulated drift. The fallback logic is reversible: if GNSS is reacquired, the system transitions back to standard navigation without mission restart or estimator reset. The system was evaluated in simulation using PX4 Software in the Loop(SITL) integrated with Gazebo. Experiments assessed the system’s ability to maintain controlled flight and execute autonomous recovery maneuvers using onboard sensing alone after the loss of GNSS positioning. GNSS fusion was disabled via software configuration, and tests were conducted in a fixed, repeatable environment. Two representative mission scenarios were considered. The first scenario evaluated a direct return-to-launch behavior following GNSS loss, in which the vehicle executed a forward flight segment and then returned toward the

launch point using a single recovery vector.

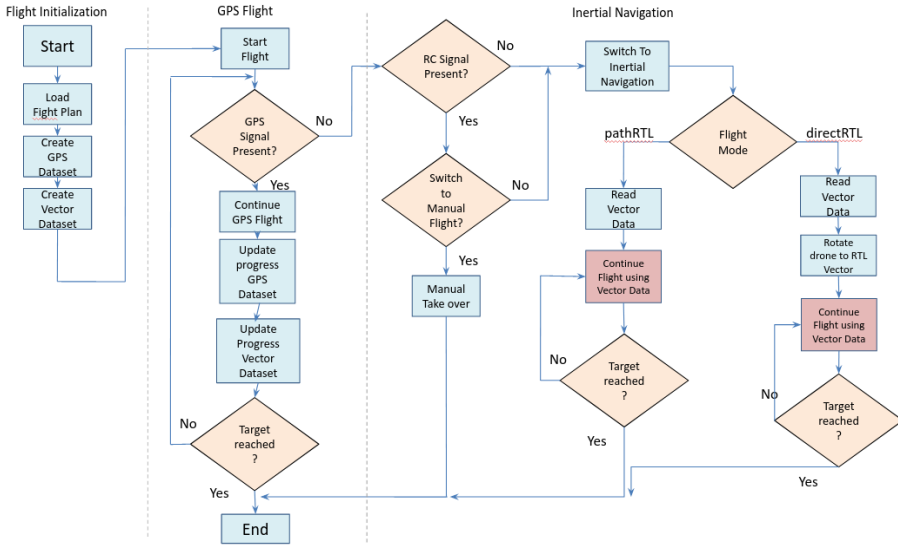


Figure 1: Block diagram of the proposed Fallback Navigation System.

The second scenario evaluated a path-based return-to-launch strategy, in which the vehicle retraced a previously executed multi-waypoint trajectory using stored segment information. Each scenario was tested using both inertial dead-reckoning navigation and optical-flow-aided fallback navigation under identical vehicle parameters and environmental conditions. Table 1 reports the Direct Return-to-Launch (DirectRTL) final position error obtained using inertial dead-reckoning navigation at a pitch angle of 25° , evaluated as a function of wind speed and return distance. Dead-reckoning performance was evaluated in simulation for pitch angles of 5° , 10° , 15° , and 25° ; however, for clarity, only the results corresponding to the best-performing configuration are presented in this table. The 25° pitch angle consistently yielded the smallest final position error across the tested wind conditions and return distances. Lower pitch angles resulted in increased wind-induced drift due to reduced forward airspeed, while pitch angles above 25° led to degraded attitude stability and were therefore not considered suitable for fallback operation. As shown in Table 1, even at this optimal pitch angle, inertial dead-reckoning navigation enables reliable recovery only over short distances. For return distances of 100 m, the final position error remains on the order of tens of meters under calm conditions, but increases markedly with wind. At return distances of 500 m and 1 km, the final error grows to the order of hundreds of meters under moderate wind, and at longer distances, the deviation becomes comparable to the return distance itself. These results indicate that inertial dead-reckoning is

unsuitable for long-range return-to-launch maneuvers. Table 2 presents the DirectRTL and Path Return-to-Launch (PathRTL) final position errors obtained using optical-flow-aided fallback navigation, reported as mean \pm confidence interval over five trials. In contrast to dead-reckoning, optical-flow-aided navigation limits the final position error to a small fraction of the traveled distance across all tested conditions. For DirectRTL missions, the final error remains below 2 % of the return distance under zero wind and below 9 % under wind speeds of up to 5 m/s.

Table 1. DirectRTL error(in meters) as a function of wind speed and distance for 25° pitch angle. Values are reported as the mean \pm confidence interval, computed over 5 trials.

Distance(m)	100m	500m	1000m	3000m
Pitch = 25°, Wind speed (m/s)	Final position error (meters)			
0m/s	17m \pm 4m	25m \pm 5.8m	71m \pm 10m	194m \pm 14.5m
2m/s	22m \pm 3m	33m \pm 4.7m	152m \pm 13.2m	307m \pm 16m
5m/s	38m \pm 6m	106m \pm 8.5m	400m \pm 25m	>1500m

For PathRTL missions, accumulated drift across multiple trajectory segments increases the absolute error; however, the final deviation remains below 5 % of the total path length even for trajectories with radii up to 3 km.

Table 2. DirectRTL and PathRTL errors for Optical Flow Navigation. Values are reported as the mean \pm confidence interval, computed over 5 trials.

Distance	0.1km			0.5km			1km			3km		
	wind speed	0m/s	2m/s	5m/s	0m/s	2m/s	5m/s	0m/s	2m/s	5m/s	0m/s	2m/s
direct RTL error	1m \pm 0.2m	4m \pm 0.3m	19m \pm 2m	6m \pm 0.4m	21m \pm 1.5m	28m \pm 3m	13m \pm 1.5m	43m \pm 3m	82m \pm 3.2m	32m \pm 2m	74m \pm 3.2m	113m \pm 5.5m
path RTL error	1m \pm 0.1m	7m \pm 0.6m	26m \pm 1m	8m \pm 1m	31m \pm 2m	47m \pm 4.1m	27m \pm 2.1m	67m \pm 5.2m	94m \pm 2.8m	66m \pm 3.3m	105m \pm 5.1m	146m \pm 8m

The quantitative comparison between Tables 1 and 2 shows that optical-flow-based velocity correction significantly reduces return-to-launch error relative to inertial dead-reckoning and maintains bounded error growth under wind, whereas inertial dead-reckoning diverges at longer distances.

Chapter 5 presents an onboard object localization system for estimating the three-dimensional position of a selected ground target using a UAV equipped with a monocular camera and a gimbaled laser rangefinder. The system operates under real-time constraints from a moving aerial platform and is fully compatible with the navigation and control framework established in the preceding chapters. The operational scenario assumes that a target is initially selected by an operator in the image stream and subsequently tracked while the UAV and gimbal move. The sensing configuration combines (i) monocular image measurements providing the target direction in the camera frame and (ii) a laser range measurement acquired when the target is centered in the image. This enables metric 3D reconstruction without stereo vision, terrain models, or external infrastructure, while maintaining a compact sensor payload suitable for lightweight UAVs. The localization pipeline consists of four interconnected modules: user selection, object tracking, gimbal tracking, and geometric localization. Image-space observations and range measurements are transformed into target coordinates in the navigation frame and, when required, into geographic coordinates. The pipeline produces a consistent estimate of the target position suitable for downstream navigation and mission functions. Target initialization is performed through user-assisted selection in the live image stream. The selected region is passed to the tracking module, after which localization proceeds autonomously. Continuous target observation is maintained by an onboard object tracking module that estimates the image-space target position in each frame. In the implemented system, tracking is performed using the KCF-MF (Kernelized Correlation Filter–MixFormer) tracker, selected for robustness to scale variation, motion blur, and partial occlusions while remaining suitable for real-time execution on a Jetson Orin Nano companion computer. The tracker provides stable image-space coordinates required for gimbal control and subsequent 3D reconstruction. To ensure reliable range acquisition, an active gimbal tracking module continuously controls camera orientation to keep the tracked target near the image center. Centering improves both image measurement stability and laser ranging accuracy, as valid range measurements require alignment between the camera optical axis and the laser beam. The gimbal controller uses image-space target offsets as feedback, enabling coordinated UAV–gimbal motion during maneuvering. Range measurements are acquired only when the target is sufficiently centered, ensuring geometric alignment and avoiding unreliable readings during large image offsets or rapid gimbal motion. This conditional strategy treats range acquisition as a discrete event and provides the metric scale required for 3D reconstruction. Once a valid range is available, the target position is reconstructed through successive frame transformations (Figure 2). The target direction is first computed in the camera frame from image coordinates and calibration parameters, then transformed to the UAV body

frame using camera–gimbal extrinsic calibration and current gimbal orientation. The body-frame vector is subsequently rotated into the navigation frame using the UAV attitude estimate. This transformation chain ensures consistent handling of camera motion, gimbal actuation, and vehicle attitude during localization.

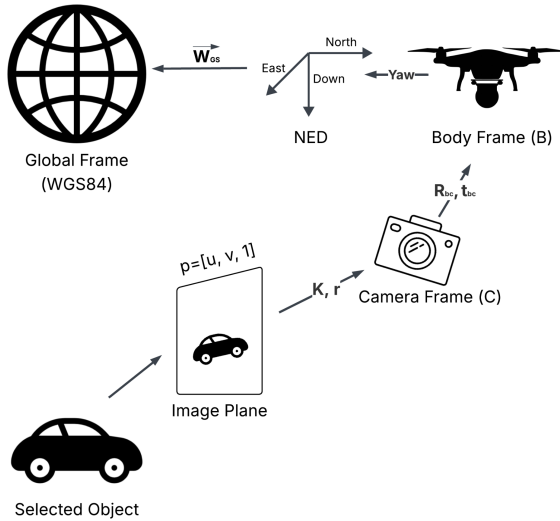


Figure 2. Coordinate frames used for target localization

The resulting target position in the local navigation frame can be converted to geographic coordinates using standard geodetic transformations relative to the UAV’s estimated global position. By separating local-frame reconstruction from global geo-referencing, the pipeline remains modular and independent of continuous global positioning availability. All localization modules operate fully onboard on a Jetson Orin Nano companion computer and interface with the flight controller through standard middleware. Image processing, tracking, gimbal control, and coordinate reconstruction run continuously at approximately 20–25 Hz, enabling real-time target position estimation without interfering with navigation tasks. Robustness is achieved through operational constraints: continuous tracking maintains a stable image reference, gimbal centering ensures valid laser alignment, and range acquisition is performed only under satisfied geometric conditions. The localization process relies solely on estimator outputs (e.g., attitude and position) and does not modify the onboard state estimator, allowing operation under both GNSS-available and GNSS-denied conditions. The system was validated through outdoor flight experiments using a custom quadcopter

equipped with a monocular camera, three-axis gimbal, and laser rangefinder. All modules executed onboard under PX4 (v1.15) position control. Target ground truth was obtained using RTK-GNSS. Experiments covered slant distances from 40 m to 300 m, with ten independent trials performed along circular approach trajectories to introduce variations in yaw, pitch, and illumination. Localization accuracy was evaluated by comparing estimated target coordinates with RTK-GNSS ground truth. The results (Table 3) demonstrate consistent localization performance across all tested distances. Within the 40–100 m range, the mean localization error remained below 2 m, with measured values of 0.8–1.6 m depending on distance. At extended ranges of 140 m and 300 m, the error increased gradually to approximately 2.2 m and 3.3 m, respectively. This degradation follows expected geometric behavior, as small angular misalignments lead to larger positional errors at increased projection distances. A comparative analysis (Table 3) with previously published stereo and terrain-aided localization methods shows that the proposed system achieves competitive accuracy while operating with a single UAV and without prior terrain information, using monocular vision, gimbal orientation, laser ranging, and onboard pose estimation. Unlike stereo approaches that rely on multi-UAV coordination or ray-casting methods that require preloaded elevation data, the proposed method performs localization using only onboard sensing and computation.

Table 3. Comparison of localization error (in meters) across distance ranges for baseline methods: Flexible Baseline Stereo, Flying Co-Stereo, Raycast, and the proposed system.

Distance Range	Our System	Flexible Baseline Stereo	Flying Co-Stereo	Raycast
40-50m	0.8m±0.1m	~5-10m	0.95-2.91m	~4.4m
50-60m	1.1m±0.05m	~5-7m	1.82-1.89m	~5.2m
60-70m	1.1m±0.16m	~5-7m	1.82-1.89m	5.62m
80-90m	1.4m±0.2m	not reported	not reported	16.99m
90-100m	1.6m±0.18m	~5-10m	not reported	not reported
140-150m	2.2m±0.25m	not reported	not reported	not reported
300m	3.3m±0.4m	not reported	not reported	not reported

Experimental results demonstrate three-dimensional target localization with a mean error of 3.3 m at distances up to 300 m while maintaining real-time performance. The

method requires favorable sensing conditions: laser ranging requires a visible, sufficiently reflective target surface, while localization depends on continuous visual tracking and target centering, restricting operation to scenarios with a persistent line of sight and visual features.

Chapter 6 addresses *UAV swarm navigation under GNSS-denied conditions, where a partially localized or manually guided agent supports the navigation of other UAVs through shared relative position information*. To satisfy this constraint, a leader–follower system is developed in which a single UAV performs sensing, relative localization, and formation coordination, while follower UAVs execute position control based solely on relative position setpoints. The system architecture is motivated by scalability and cost efficiency. Perception and coordination are centralized on the leader, allowing followers to operate without GNSS, cameras, or companion computers. Relative state estimation is integrated directly into the flight control pipeline, enabling autonomous behaviors such as sequential takeoff, formation flight with fixed offsets, and coordinated landing under GNSS-denied conditions. All swarm-related computation is performed onboard, ensuring real-time operation without external infrastructure. The leader continuously estimates its own state using the onboard autopilot estimator and detects followers using a downward-looking camera. Visual detections are processed in real time on a Jetson Orin Nano using a YOLO-based detector and Norfair multi-object tracker, providing persistent image-space measurements. The perception frontend is modular and interchangeable, as the swarm coordination framework does not depend on a specific detector implementation. Relative follower positions are computed by back-projecting image measurements into three-dimensional viewing rays using the calibrated camera model. Depth is inferred from vertical separation between leader and follower, obtained from reported altitudes and onboard estimates. The resulting 3D vectors are transformed through the camera, body, and navigation frames using the leader’s attitude estimate, yielding follower positions expressed in the leader-aligned local North-East-Down(NED) frame. Formation geometry is defined by fixed relative offsets assigned to each follower in the camera frame. These offsets are transformed through the camera–body extrinsic calibration and rotated into the local NED frame using the leader’s current attitude. This transformation chain preserves formation structure during leader translation and rotation. The NED frame offsets are converted into position setpoints and transmitted to follower UAVs. Each follower operates in position-control mode and executes the received setpoints using the PX4 internal position controller and local state estimate. Relative position injection serves as a functional replacement for GNSS-based position references, enabling closed-loop formation control without global positioning or modifications to the internal controller architecture. Communication is limited to relative position setpoints, reducing bandwidth requirements and sensitivity to packet loss while maintaining stable formation behavior. Swarm operation is organized as a sequence of leader-governed behaviors defining the lifecycle of coordinated flight: initialization, coordinated takeoff, formation tracking, and coordinated landing. The leader triggers transitions between behaviors based on

perception availability and mission state, while followers remain reactive and execute only the received position setpoints. During initialization, the leader takes off, establishes visual contact with all followers, and assigns fixed formation roles based on detected identities. Coordinated takeoff is initiated only after reliable relative perception is confirmed.

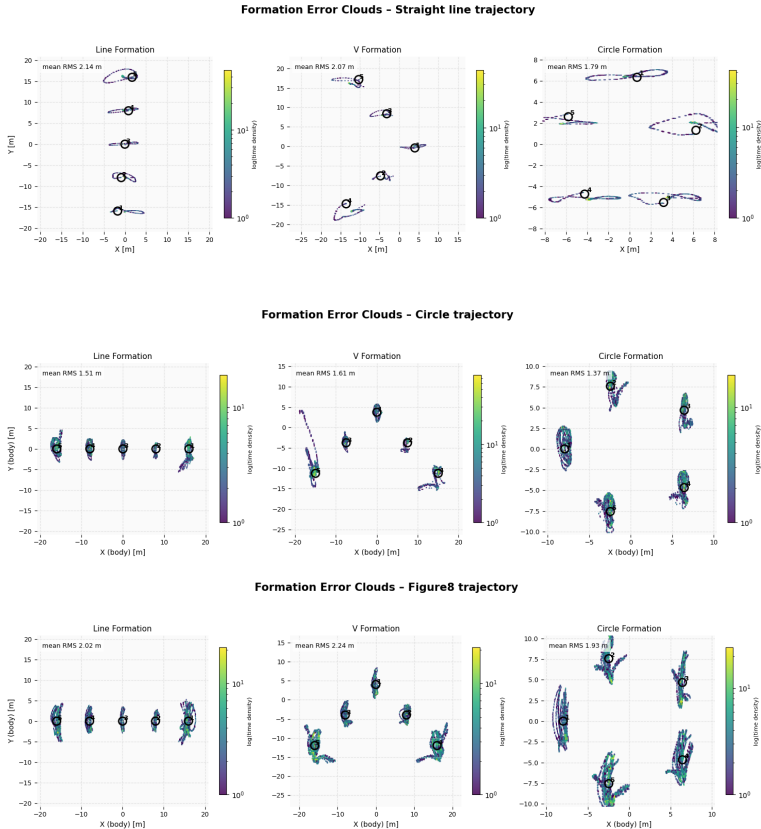


Figure 3. Error-cloud plots for the straight-line, figure-8, and circular missions, shown for line, V, and circle formations. Each subplot depicts the instantaneous follower relative-position error in the leader's body frame, sampled at 30 Hz. The horizontal and vertical axes correspond to the leader body-frame x and y directions.

Followers take off sequentially or simultaneously according to mission configuration and transition directly into position-control mode using leader-provided setpoints. During standard operation, the formation is maintained as the leader performs translational and rotational maneuvers. Relative positions are continuously updated, and

corresponding setpoints regenerated, enabling coherent translation and rotation of the swarm. Coordinated landing is achieved by commanding a controlled descent once formation tracking is complete. If a follower is lost while the leader retains GNSS, the affected UAV transitions to autonomous fallback navigation and executes a return or landing procedure independently. The system is evaluated through simulation and real-world experiments. Simulation studies use one leader and five followers in a multi-UAV PX4 SITL environment with Gazebo, reflecting the intended onboard architecture. All perception, relative localization, and formation guidance logic executes onboard the leader, while followers operate in OFFBOARD position-control mode using the standard PX4 controller. Simulations are executed on a desktop platform with an NVIDIA RTX 3060 GPU and Intel Core i7 processor. Each UAV runs in an independent SITL instance with dedicated communication, while a shared simulation clock ensures synchronized multi-vehicle operation. The leader UAV executes three mission profiles: straight-line, figure-eight, and polygonal waypoint trajectories. In the straight-line mission, the leader flies 50 m at constant heading and altitude. The figure-eight trajectory combines curved segments with straight sections of 20 m, while the waypoint mission consists of eight straight segments of 20 m connected by sharp turns. Followers rely only on relative position estimates provided by the leader and do not use GNSS. Inter-agent spacing was fixed at 8 m, and a vertical separation of 20 m was maintained to ensure reliable visual coverage by the leader's camera while preserving safe spacing. Wind disturbances, communication delays, leader speed, and formation geometry were varied to evaluate navigation robustness. Swarm performance is quantified using standard formation-control metrics. RMS formation error measures follower accuracy relative to assigned offsets, while formation distortion captures changes in inter-agent spacing. For wind experiments, cross-track and along-track RMS errors evaluate lateral and longitudinal deviations. Relative localization error and reconstructed absolute trajectory error are additionally computed for comparison with GNSS-denied SLAM-based swarm systems. Experimental results show stable and bounded formation tracking across all tested conditions. Under nominal missions (Figure 3), the swarm maintains formation geometry without oscillation or instability. As operating conditions become more demanding, formation error and geometric distortion increase with leader speed, wind intensity, and communication delay. However, the system remains stable and controllable across all tested conditions. Velocity-sweep experiments indicate noticeable formation deformation above 5–6 m/s, reflecting controller bandwidth and relative-localization update constraints. Wind-robustness tests (Figure 4) confirm stable operation under lateral winds up to 12 m/s, with proportional increases in cross-track deviation and distortion but no divergence. Delay-injection experiments show negligible impact up to 100 ms; delays of 150–300 ms introduce gradual follower lag, while formation coherence remains preserved even at 500 ms. A qualitative comparison with representative GNSS-denied multi-UAV systems shows that the proposed approach achieves relative localization and formation accuracy comparable to vision- and SLAM-based swarm methods, while requiring only a single

onboard compute unit on the leader and no distributed perception or map construction. Relative localization is directly integrated into the PX4 flight control loop for closed-loop formation control, allowing followers to operate using onboard IMU, barometer, and compass measurements together with relative position estimates. To complement the simulation-based evaluation and verify practical feasibility, real-world flight experiments were conducted using one leader and up to two follower UAVs maintaining approximately 20 m vertical separation, with GNSS fusion disabled on the followers.

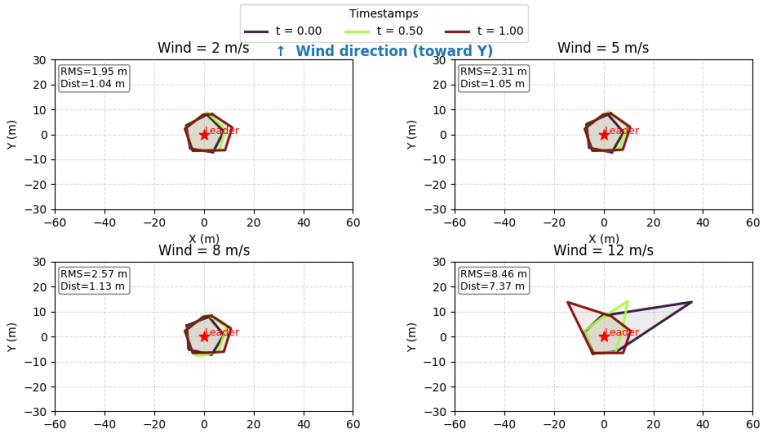


Figure 4. Leader and follower trajectories for wind speeds of 0, 2, 5, 8, and 12 m/s, shown in the leader's camera frame. Each subplot displays follower positions at normalized timestamps $t=\{0.00, 0.50, 1.00\}$ together with the time-averaged RMS drift and formation-distortion values

The followers operated in position-control mode, relying exclusively on externally injected relative position estimates computed onboard the leader. In the stationary-leader single-follower experiment, the RMS localization error was 0.54 m ($\sigma = 0.19$ m), with peak deviations below 1.0 m over flights exceeding 60 s. In the moving-leader two-follower experiment, RMS localization errors of 0.80 m and 0.65 m were obtained for the two followers, with maximum deviations below 1.5 m and no observable drift or estimator divergence. These results demonstrate stable multi-agent relative localization and sustained closed-loop position control under real flight conditions.

The main results of the dissertation are summarized in the **Conclusion**.

- 1. A fallback navigation system was developed and experimentally validated for GNSS outages**, enabling continued UAV state estimation and mission-level operation using onboard inertial and optical-flow sensing, while maintaining controlled performance degradation under partial or complete GNSS loss.
- 2. A real-time 3D object localization system was developed and experimentally**

validated, combining monocular vision with a gimballed laser range measurement to resolve scale ambiguity and recover metric target position through a defined coordinate transformation chain from the camera frame to the global frame.

3. A leader–follower swarm navigation system was developed and experimentally validated, in which relative position estimates computed onboard a leader UAV are injected directly into follower autopilot position controllers, enabling coordinated multi-UAV motion without direct GNSS dependency on follower platforms.

4. The developed fallback navigation, object localization, and swarm navigation subsystems were integrated into a unified onboard UAV autonomy system for operation in GNSS-denied environments.

Publications on the Topic of the Dissertation

The main results of the dissertation have been published in the following works:

1. V. Sahakyan, V. Melkonyan, and S. S. Sargsyan, “Real-time target localization using gimballed laser on UAVs,” Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS, vol. 37, no. 41, pp. 189–198, 2025.
2. A. Sardaryan, V. Sahakyan, V. Melkonyan, and S. Sargsyan, “An accurate real-time object tracking method for resource constrained devices,” Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS, vol. 36, no. 3, pp. 284–294, 2024.
3. V. Sahakyan, “Autonomous UAV navigation without GNSS,” Vestnik of RAU, no. 2, pp. 36–44, 2025,
4. V. R. Sahakyan, V. G. Melkonyan, G. A. Gharagozyan, and A. S. Avetisyan, “Enhancing image recognition with pre-defined convolutional layers based on PDEs,” Programming and Computer Software, vol. 49, no. 3, pp. 192–197, 2023.
5. A. Fahradyan, T. Baghdasaryan, V. Melkonyan, V. Sahakyan, L. Kirakosyan, O. Hovhannisyan, S. Sargsyan, and A. Darbinyan, “Comparing and improving change detection methods,” Vestnik of RAU, no. 1, pp. 37–43, 2024.
6. V. Melkonyan, V. Sahakyan, L. Kirakosyan, and O. Hovhannisyan, “Comparison of single object tracking algorithms on video sequences captured from UAV,” Vestnik of RAU, no. 2, pp. 67–75, 2022

Саакян Вардан

GPS-независимая система позиционирования и навигации

Резюме

Актуальность темы: Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) широко применяются в задачах мониторинга, инспекции, картографирования и поисково-спасательных операций. Автономность современных БПЛА в значительной степени опирается на глобальную навигационную спутниковую систему (GNSS), обеспечивающую оценку положения и управление полётом. Однако сигналы GNSS подвержены деградации и потере в сложных условиях

эксплуатации(плотная городская застройка, лесные массивы и закрытые пространства), а также уязвимы к преднамеренным воздействиям, таким как глушение и подмена. Потеря GNSS приводит к снижению точности навигации, локализации и управления, что делает невозможным продолжение миссии. В связи с этим актуальной является задача разработки интегрированных методов навигации, локализации и координации БПЛА, обеспечивающих устойчивую автономную работу в условиях отсутствия GNSS как для одиночных аппаратов, так и для многоагентных систем.

Цель и задачи исследования: Целью диссертационной работы является разработка, реализация и экспериментальная валидация интегрированной системы автономности БПЛА, сохраняющей работоспособность как при наличии GNSS, так и в условиях её отсутствия. Разрабатываемая система ориентирована на применение как одиночных БПЛА, так и многоагентных формаций и обеспечивает непрерывность полёта, восприятия и координации при потере глобальной навигационной информации. Система поддерживает продолжение миссий, локализацию объектов в реальном времени и кооперативное поведение агентов на основе бортовых измерений и совместима с открытыми автопилотными платформами, что обеспечивает её практическую применимость.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1.Проведение сравнительного анализа существующих методов навигации и локализации, применимых в условиях отсутствия GNSS, с выявлением их технических ограничений и оценкой пригодности для открытых и многоагентных систем.

2.Проектирование и разработка системы резервной навигации, обеспечивающей продолжение полёта БПЛА в условиях отсутствия GNSS, с акцентом на надежность, вычислительную эффективность и интеграцию в существующую архитектуру автопилота.

3.Проектирование и разработка системы трёхмерной локализации объектов в реальном времени на основе монокулярной камеры и гиросtabilизированного лазерного дальномера без использования карт местности и сведений о размерах объектов, пригодной для работы в неструктурированных средах.

4.Проектирование и разработка системы кооперативной навигации для роя БПЛА, где один частично локализованный или управляемый оператором агент поддерживает других за счёт передачи относительных оценок положения в условиях отсутствия GNSS.

5.Интеграция разработанных подсистем в единую систему автономности БПЛА и экспериментальная оценка её работы в симуляторе и реальных испытаниях.

Научная новизна: Научная новизна диссертационной работы заключается в разработке системы автономности БПЛА, обеспечивающей навигацию, локализацию целей и координацию группы БПЛА в условиях отсутствия GNSS на основе бортовых измерений. Предложенная система включает три

функциональные подсистемы, предназначенные для работы без постоянной зависимости от спутниковой навигации. Разработана система резервной навигации, обеспечивающая продолжение полёта БПЛА при отсутствии GNSS. Она объединяет инерциальную навигацию и оценку скорости по оптическому потоку и поддерживает автономное восстановление без использования внешней инфраструктуры. Разработана бортовая система трёхмерной локализации объектов, объединяющая наблюдения с монокулярной камеры и дальномерные измерения, получаемые с помощью гиросtabilизированной платформы. Она обеспечивает локализацию наземных целей в реальном времени без использования карт местности, стереозрения или априорной информации о размерах объектов. Разработана система координации типа «ведущий–ведомый» для группы БПЛА в условиях отсутствия GNSS. Оценки относительного положения, вычисляемые на борту ведущего БПЛА, используются для формирования навигационных команд для ведомых дронов, обеспечивая согласованный полёт без прямой зависимости от GNSS.

Практическая значимость: Разработанные решения реализованы и проверены в ходе обширных экспериментов как в симуляционной среде, так и в реальных условиях на разработанных БПЛА, использующих автопилот PX4. Предложенная система автономности расширяет возможности существующего автопилотного программного обеспечения за счёт реализации резервной навигации, бортовой локализации целей и многоагентной координации, обеспечивая продолжение функционирования БПЛА в условиях отсутствия или деградации спутниковой навигации. Резервная навигация обеспечивает продолжение выполнения миссии при недоступности GNSS. Бортовая локализация целей обеспечивает получение метрических координат объектов без использования внешней инфраструктуры и априорных карт местности, что позволяет работать в ранее неизвестных условиях. Координация группы БПЛА на основе относительных состояний обеспечивает устойчивый групповой полёт без необходимости точного глобального позиционирования. Предложенные решения используют только стандартные бортовые датчики и вычислительные ресурсы и могут быть интегрированы в существующие платформы БПЛА без существенных изменений архитектуры автопилота.

Структура диссертации: Диссертационная работа организована следующим образом. Во второй главе рассматриваются современные исследования в области навигации без GNSS, визуальной локализации и координации роя, формирующие теоретическую основу исследования. В третьей главе изложены основные принципы построения разработанных автопилотных систем БПЛА, включая архитектуру оценки состояния и управления, а также анализируются их возможности в условиях отсутствия GNSS. В главах 4–6 представлены основные результаты работы. Каждая из глав посвящена одному из ключевых компонентов предложенной системы - резервной навигации, трехмерной локализации объектов и координации роя - и включает описание архитектуры, алгоритмов, реализации и

экспериментальной оценки. В заключительной, седьмой главе, обобщаются полученные результаты и формулируются направления дальнейших исследований.

Սահակյան Վարդան **GPS-ից անկախ տեղորոշման և նավիգացիայի համակարգ** **Ամփոփագիր**

Թեմայի արդիականությունը: Անօդաչու թռչող սարքերը (ԱԹՍ) լայնորեն կիրառվում են մոնիթորինգի, տեխնիկական գնման, քարտեզագրման և որոնողատիրկարարական աշխատանքներում: Ժամանակակից ԱԹՍ-ների ինքնավարությունը մեծապես հիմնված է գյոբալ նավիգացիոն արբանյակային համակարգի (GNSS) վրա, որը ապահովում է դիրքի գնահատումը և թռիչքի կառավարումը: Սակայն GNSS ազդանշանները խոցելի են և կարող են խաթարվել կամ ամբողջությամբ կորսվել բարդ շահագործման պայմաններում, այդ թվում՝ խիտ քաղաքային միջավայրում, անտառներում և փակ տարածքներում, ինչպես նաև կանխատեսված ազդեցությունների՝ խլացման և սպուֆինգի արդյունքում: GNSS-ի կորուստը խաթարում է նավիգացիան, տեղորոշումը և կառավարումը՝ անհնար դարձնելով առաքելության շարունակումը: Այս համատեքստում արդիական է ԱԹՍ-ների համար նավիգացիայի, տեղորոշման և կոորդինացիայի ինտեգրված մեթոդների մշակման խնդիրը, որոնք կապահովեն կայուն ինքնավար աշխատանք GNSS-ի բացակայության պայմաններում՝ ինչպես առանձին սարքերի, այնպես էլ երամային համակարգերի համար:

Հետազոտության նպատակը և խնդիրները: Ատենախոսության նպատակը անօդաչու թռչող սարքերի (ԱԹՍ) ինտեգրված ինքնավարության համակարգի մշակումն, իրագործումն ու փորձարարական վավերացումն է, որը կարող է գործել ինչպես GNSS-ի առկայության, այնպես էլ դրա բացակայության պայմաններում: Մշակվող համակարգը նախատեսված է կիրառման համար ինչպես առանձին ԱԹՍ-ների, այնպես էլ ԱԹՍ երամների դեպքում և ապահովում է թռիչքի, գնահատման և կոորդինացիայի անընդհատությունը գյոբալ նավիգացիոն տեղեկատվության կորստի պայմաններում: Համակարգը ապահովում է առաքելության շարունակումը, օբյեկտների իրական ժամանակի տեղորոշումը և երամի կոոպերատիվ վարքագիծը՝ բորտային չափումների հիման վրա:

Այդ նպատակի իրականացման համար հետազոտությունում լուծվում են հետևյալ խնդիրները՝

1. GNSS-ի բացակայության պայմաններում նավիգացիայի և տեղորոշման գոյությունն ունեցող մեթոդների համեմատական վերլուծության իրականացում՝ դրանց տեխնիկական սահմանափակումների բացահայտմամբ, բաց կողով և երամային համակարգերում կիրառելիության գնահատմամբ:

2.Պահեստային նավիգացիայի համակարգի մշակում և իրականացում, որը ապահովում է ԱԹՍ-ի թռիչքի շարունակականությունը GNSS-ի բացակայության պայմաններում՝ շեշտադրելով հուսալիությունը, հաշվարկային արդյունավետությունը և ինտեգրումը գոյություն ունեցող ավտոպիլոտի ճարտարապետության մեջ:

3.Իրական ժամանակում օբյեկտների եռաչափ տեղորոշման համակարգի նախագծում և մշակում՝ հիմնված տեսախցիկի և գիրոստաբիլացված լագերային հեռաչափի վրա՝ առանց տեղանքի քարտեզների և օբյեկտների չափերի մասին տվյալների օգտագործման, որը կիրառելի է չկարգավորված միջավայրերում:

4.ԱԹՍ երամի համար հարաբերական տեղորոշման կոոպերատիվ նավիգացիայի համակարգի նախագծում և մշակում, որի դեպքում մեկ մասնակիորեն տեղորոշված կամ օպերատորի կողմից կառավարվող ԱԹՍ-ն աջակցում է մյուսներին՝ GNSS-ի բացակայության պայմաններում հարաբերական դիրքերի գնահատականների փոխանցման միջոցով:

5.Առաջարկված բոլոր ենթահամակարգերի ինտեգրում մեկ միասնական համակարգում, դրա աշխատանքի փորձարարական գնահատում սիմուլյատորի և իրական աշխարհի փորձարկումներում

Գիտական նորույթը: Ատենախոսության գիտական նորույթը կայանում է անօդաչու թռչող սարքերի (ԱԹՍ) ինքնավարության համակարգի մշակման մեջ, որը ապահովում է նավիգացիա, օբյեկտների տեղորոշում և ԱԹՍ խմբի կոորդինացիա GNSS-ի բացակայության պայմաններում՝ բորտային չափումների հիման վրա: Առաջարկվող համակարգը ներառում է երեք ֆունկցիոնալ ենթահամակարգ, որոնք նախատեսված են աշխատելու առանց արբանյակային նավիգացիայից մշտական կախվածության: Մշակվել է պահեստային նավիգացիայի համակարգ, որը ապահովում է ԱԹՍ-ի թռիչքի շարունակականությունը GNSS-ի բացակայության պայմաններում: Այն միավորում է իներցիալ նավիգացիան և օպտիկական հոսքով արագության գնահատումը և ապահովում է ինքնավար թռիչք՝ առանց արտաքին ենթակառուցվածքի օգտագործման: Մշակվել է եռաչափ տեղորոշման համակարգ, որը միավորում է տեսախցիկի դիտարկումները և գիրոստաբիլացված հարթակի միջոցով ստացվող հեռաչափային չափումները: Այն ապահովում է վերգետնյա օբյեկտների տեղորոշումը իրական ժամանակում՝ առանց տեղանքի քարտեզների, ստերեոտեստողության կամ օբյեկտների չափերի մասին ապրիորի տվյալների օգտագործման: Մշակվել է «առաջնորդ-հետևորդ» տիպի կոորդինացիայի համակարգ ԱԹՍ խմբի համար GNSS-ի բացակայության պայմաններում: Առաջնորդ ԱԹՍ-ի վրա հաշվարկվող հարաբերական դիրքի գնահատումները օգտագործվում են հետևորդ ԱԹՍ-ների համար նավիգացիոն

հրահանգների ձևավորման նպատակով՝ ապահովելով համաձայնեցված թռիչք առանց GNSS-ից ուղիղ կախվածության:

Գործնական նշանակությունը: Մշակված լուծումները իրականացվել և փորձարկվել են ինչպես սիմուլյացիոն միջավայրում, այնպես էլ իրական ԱԹՄ-ների վրա, որոնք օգտագործում են PX4 ավտոպիլոտը: Առաջարկվող ինքնավարության համակարգը ընդլայնում է գոյություն ունեցող ավտոպիլոտային ծրագրային ապահովման հնարավորությունները՝ ապահովելով պահեստային նավիգացիա, օբյեկտների բորտային տեղորոշում և երամի կոորդինացիա, ինչը թույլ է տալիս ԱԹՄ-ներին շարունակել աշխատանքը GNSS-ի բացակայության կամ դեգրադացման պայմաններում: Պահեստային նավիգացիան ապահովում է առաքելության շարունակումը GNSS-ի անհասանելիության դեպքում: Օբյեկտների բորտային տեղորոշումը ապահովում է օբյեկտների մետրիկական կոորդինատների ստացումը առանց արտաքին ենթակառուցվածքի և ապրիորի քարտեզների օգտագործման, ինչը հնարավորություն է տալիս աշխատել նախկինում անհայտ պայմաններում: ԱԹՄ խմբի կոորդինացիան հարաբերական վիճակների հիման վրա ապահովում է կայուն խմբային թռիչք՝ առանց ճշգրիտ գլոբալ տեղորոշման անհրաժեշտության: Առաջարկված լուծումները օգտագործում են միայն ստանդարտ բորտային տվիչներ և հաշվարկային ռեսուրսներ և կարող են ինտեգրվել գոյություն ունեցող ԱԹՄ համակարգերի մեջ՝ առանց ավտոպիլոտի ճարտարապետության էական փոփոխությունների:

Ատենախոսության կառուցվածքը: Ատենախոսությունը կազմված է հետևյալ կերպ: Երկրորդ գլխում ներկայացվում են GNSS-ից անկախ նավիգացիայի, տեսողական տեղորոշման և երամի կոորդինացիայի ոլորտում ժամանակակից հետազոտությունները, որոնք կազմում են ուսումնասիրության տեսական հիմքը: Երրորդ գլխում ներկայացվում են հայտնի ԱԹՄ ավտոպիլոտային համակարգերի կառուցման հիմնական սկզբունքները՝ ներառյալ վիճակի գնահատման և կառավարման ճարտարապետությունը, ինչպես նաև վերլուծվում են դրանց հնարավորությունները GNSS-ի բացակայության պայմաններում: Չորրորդից վեցերորդ գլուխներում ներկայացված են աշխատանքի հիմնական արդյունքները: Յուրաքանչյուր գլուխ նվիրված է առաջարկվող համակարգի հիմնական բաղադրիչներից մեկին՝ պահեստային նավիգացիային, օբյեկտների եռաչափ տեղորոշմանը և երամի կոորդինացիային, և ներառում է համակարգի ճարտարապետության, ալգորիթմների, իրագործման և փորձարարական գնահատման նկարագրությունը: Եզրափակիչ՝ յոթերորդ գլխում, ամփոփվում են ստացված արդյունքները և ձևակերպվում են հետագա հետազոտության հիմնական ուղղությունները:

