

Հայ-Ռուսական համալսարան

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

Գիտական ղեկավար՝ Դ.Գ. Ասատրյան

Երևան 2026

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 architectures 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 estimating its motion locally, interact with the environment through onboard perception, and, when operating in a group, sustain relative awareness of neighboring agents.

The objective of this research is to design, develop, and validate an integrated aerial autonomy system that remains fully operational in both GNSS-available and GNSS-denied environments. The system is intended for use with both single UAVs and multi-agent formations, ensuring that flight, perception, and coordination continue seamlessly when global positioning data is lost. It supports mission continuation, real-time object localization, and cooperative multi-agent behavior using onboard sensing, while remaining compatible with open-source autopilot platforms to ensure practical deployability.

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

- 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 lightweight fallback navigation framework** that enables continued UAV operation under GNSS-denied conditions, with emphasis on robustness, computational efficiency, and integration into an open-source autopilot architecture
- 3. Design and develop a real-time 3D object localization module** 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 relative localization method** for multi-agent systems, where one partially localized or manually guided agent supports others through shared position estimates in GNSS-denied environments.
- 5. Design, develop, and evaluate a framework that integrates all proposed components** into a unified system, ensuring consistency, interoperability, and practical feasibility within an open-source software and hardware environment.

Scientific Novelty: A novel framework was designed and developed, integrating advanced methods for the navigation and localization of single- and multi-agent UAV systems operating in GNSS-denied environments. The proposed system combines fallback navigation, 3D object localization, and cooperative swarm coordination within a unified architecture that operates onboard. Unlike existing approaches that address these problems separately, the developed framework enables all three functionalities to operate jointly and in real-time on lightweight UAV hardware. Developed algorithms allow GNSS-free navigation, real-time target localization using a monocular camera and a gimbaled laser rangefinder, and relative localization between UAVs without external infrastructure.

Practical Significance: The developed methods have been implemented and evaluated through extensive simulation studies and real-world experiments in selected scenarios, and can be directly applied on open-source UAV platform (PX4) for research and field operations. The system expands the capabilities of existing autopilot software by adding autonomous fallback navigation, onboard target localization, and multi-agent coordination modes, allowing continued operation in GNSS-denied or degraded environments. In practical operation, autonomous fallback navigation allows continued navigation and mission execution when GNSS signals are unavailable. Onboard target localization provides metric target coordinates without reliance on external infrastructure or prior maps, enabling operation in unknown environments. Multi-agent coordination based on relative state information supports stable swarm flight without accurate global positioning, requiring only minimal additional onboard sensing and computing hardware and allowing operation without constraints on flight altitude.

Main Results of the Dissertation

The main scientific results of the dissertation are as follows:

1. **A unified onboard UAV autonomy framework** for GNSS-denied environments has been developed, integrating estimation, control, perception, and coordination modules within a single open-source autopilot architecture capable of sustained operation without reliance on satellite navigation.
2. **A structured fallback navigation framework** has been designed, implemented, and experimentally validated for GNSS outages, enabling continued state estimation and mission-level behavior using onboard inertial and optical-flow sensing, and providing controlled performance degradation under partial or complete GNSS loss.
3. **A real-time 3D object localization method** 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 global frame.
4. **A leader–follower swarm coordination architecture** 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.

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. United Nations/Philippines Workshop on the Applications of GNSS, 2024.
Presentation: GPS-Based 2D Map Creation Using a Drone Swarm.
3. XVIII Годи́чная ме́ждународная нау́чная ко́нференция Росси́йско-Армя́нского уни́верситета, Ереван, Арме́ния, 2024.
Доклад: «Autonomous Target Interception Using Reinforcement Learning».

Publications. The results of the dissertation are reflected in 7 published scientific works[1-7]

Volume and Structure of the Dissertation. The dissertation consists of an introduction, five chapters, and a conclusion. The total volume of the dissertation is 132 pages of text, including 29 figures and 12 tables. The list of references contains 117 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 examines the modular structure of contemporary UAV autopilots, composed of state estimation, control, and navigation subsystems, and analyzes their interaction during autonomous flight under varying availability of external positioning information.

The state estimation architecture employed in modern UAV autopilots is analyzed 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 examined, 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 analyzed 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 examined. The behavior of control layers under GNSS-denied conditions is considered, 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 methods developed in the subsequent chapters.

Chapter 4 is devoted to a new fallback navigation framework 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 framework 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 framework 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. As shown in Figure 1, the architecture consists of three functional blocks: Mission Execution, Interrupt Monitoring, and Fallback Navigation. During nominal 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 navigation inputs using sensors already available in the autopilot. 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 via the relationship between commanded pitch and forward motion, enabling continued navigation without absolute position updates or external references. As an alternative, the framework incorporates an optical-flow-based mode in which 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 nominal operation, without estimator reinitialization or structural modification. The framework adaptively switches between dead reckoning and optical-flow-aided navigation based on sensor availability and environmental suitability.

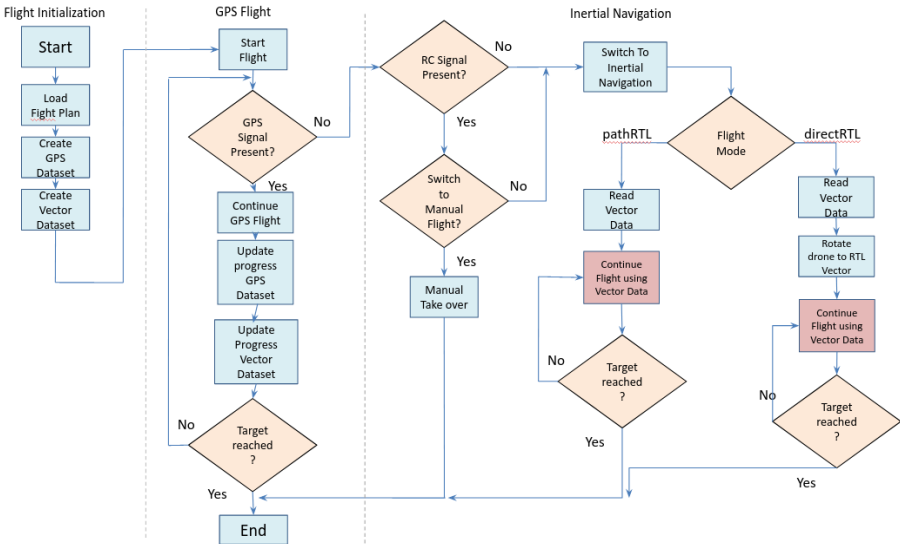


Figure 1: Block diagram of the proposed Fallback Navigation System.

For autonomous recovery, two return strategies are supported: Direct Return-to-Launch, which follows a single vector toward home with minimal overhead, 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 framework was evaluated in simulation using PX4 SITL integrated with Gazebo. Experiments assessed GNSS-loss detection, automatic transitions to fallback modes, and the ability to maintain controlled flight while executing autonomous recovery maneuvers using onboard sensing only. 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. 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 7 % 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 ± 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±4m	25m±5.8m	71m±10m	194m±14.5m
2m/s	22m±3m	33m±4.7m	152m±13.2m	307m±16m
5m/s	38m±6m	106m±8.5m	400m±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 ± 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	5m/s
direct RTL error	1m ±0.2m	4m ±0.3m	19m ±2m	6m ±0.4m	21m ±1.5m	28m ±3m	13m ±1.5m	43m ±3m	82m ±3.2m	32m ±2m	74m ±3.2m	113m ±5.5m
path RTL error	1m ±0.1m	7m ±0.6m	26m ±1m	8m ±1m	31m ±2m	47m ±4.1m	27m ±2.1m	67m ±5.2m	94m ±2.8m	66m ±3.3m	105m±5.1m	146m ±8m

The quantitative comparison between Tables 1 and 2 demonstrates that optical-flow-based velocity correction extends the viable return-to-launch distance by more than an order of magnitude relative to inertial dead-reckoning, while maintaining bounded error growth under wind.

Chapter 5 presents an onboard object localization method 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 method 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 (Figure 2) 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. 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.

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 multiple 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.

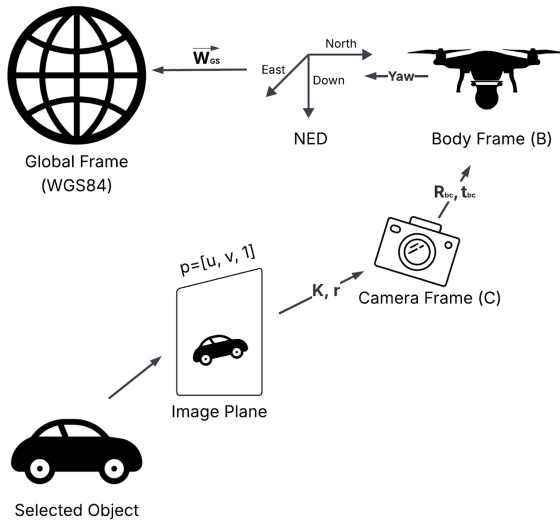


Figure 2. Coordinate frames used for target localization

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-based and terrain-aided localization methods shows that the proposed system achieves competitive accuracy while requiring only a single UAV and no prior terrain information, object models, or stereo configuration. Unlike stereo approaches that rely on multi-UAV coordination or map-based raycasting methods that require preloaded elevation data, the proposed method operates using monocular vision, gimbal orientation, laser ranging, and onboard pose estimation. Overall, the experimental results confirm that accurate three-dimensional target localization can be achieved using a lightweight, fully onboard sensing configuration. The system maintains meter-level accuracy over operationally relevant distances and remains suitable for real-time deployment without external computation or environmental maps, provided that favorable sensing conditions are met. In particular, laser-based ranging requires a visible and sufficiently reflective target surface, while successful localization depends on continuous visual tracking and target centering, restricting operation to scenarios with a persistent line of sight and adequate visual features.

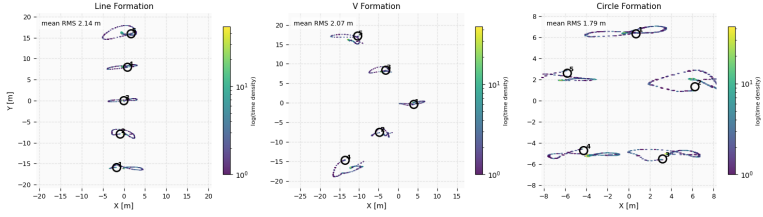
Table 3. Comparison of localization error (in meters) across distance ranges for baseline methods: Flexible Baseline Stereo, Flying Co-Stereo, Raycast, and the proposed system.

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

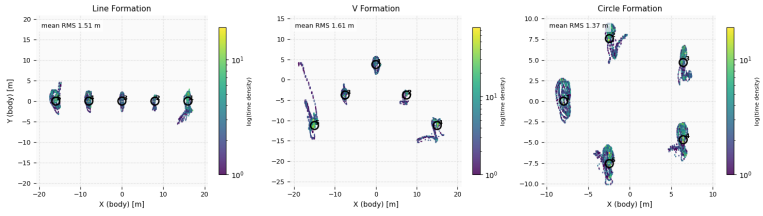
Chapter 6 addresses coordinated multi-UAV operation under GNSS-denied conditions, where formation maintenance and synchronized motion must be achieved without a shared global reference. To satisfy this constraint, a leader–follower architecture is developed in which a single UAV performs sensing, relative localization, and formation coordination, while follower UAVs execute lightweight position control based solely on relative position setpoints. The 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 lightweight 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 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 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, ensuring

immediate formation enforcement. Followers take off sequentially or simultaneously according to mission configuration and transition directly into position-control mode using leader-provided setpoints. During nominal 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 controlled descent once formation tracking is complete.

Formation Error Clouds - Straight line trajectory



Formation Error Clouds - Circle trajectory



Formation Error Clouds - Figure8 trajectory

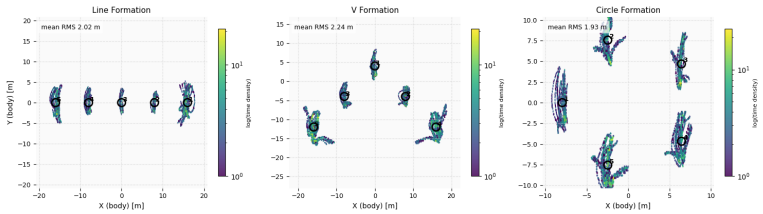


Figure 3. Error-cloud plots for the straight-line, figure-8, and circular missions, shown for line, V, and circle formations. Each subplot depicts the instantaneous follower relative-position error in the leader's body frame, sampled at 30 Hz. The horizontal and vertical axes correspond to the leader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

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 framework 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, circular, and figure-eight trajectories. Followers rely exclusively on relative position estimates provided by the leader and do not use GNSS. Wind disturbances, communication delays, leader speed, and formation geometry are varied to evaluate 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, performance degrades gradually rather than abruptly, with increasing formation error and distortion observed as leader speed, wind, or communication delay increases, indicating predictable system limits without loss of controllability. 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, enabling lightweight follower operation with minimal sensing. 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.

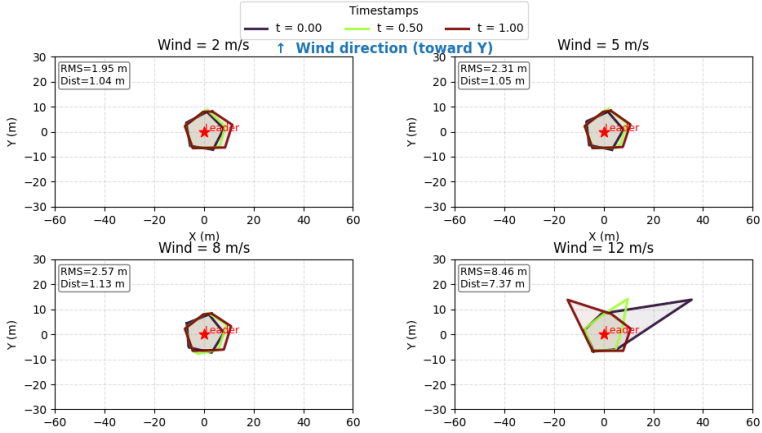


Figure 4. Leader and follower trajectories for wind speeds of 0, 2, 5, 8, and 12 m/s, shown in the leader's camera frame. Each subplot displays follower positions at normalized timestamps $t=\{0.00, 0.50, 1.00\}$ together with the time-averaged RMS drift and formation-distortion values

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. **Existing navigation, localization, and swarm-coordination methods for GNSS-denied operation were analyzed**, identifying key trade-offs between accuracy, robustness, computational cost, and applicability to open-source and multi-agent systems.
2. **A lightweight fallback navigation framework was designed and implemented within an open-source PX4 autopilot architecture**, enabling continued UAV operation under GNSS loss using inertial and optical-flow-aided navigation with minimal computational overhead.
3. **A real-time 3D object localization module based on monocular vision and a gimbaled laser rangefinder was developed**, achieving meter-level accuracy without relying on terrain maps or known object dimensions and remaining suitable for onboard deployment in unstructured environments.

4. A cooperative relative localization method for GNSS-denied multi-UAV operation was developed, in which a leader UAV provides relative position estimates and formation guidance to lightweight follower UAVs operating without global positioning.

5. All proposed components were integrated into a unified open-source system and evaluated at the system level, demonstrating stable operation, graceful performance degradation under disturbances, and practical feasibility for autonomous single-UAV and multi-UAV missions in GNSS-challenged 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 gimbaled 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, "Visual relative localization for GNSS-free control of UAV swarm," Vestnik of RAU, 2026,
4. V. Sahakyan, "Autonomous UAV navigation without GNSS," Vestnik of RAU, no. 2, pp. 36–44, 2025,
5. V. R. Sahakyan, V. G. Melkonyan, G. A. Gharagyozyan, 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.
6. 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.
7. 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,

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, включая плотную городскую застройку, лесные массивы и закрытые пространства, а также уязвимы к преднамеренным воздействиям, таким как глушение и подмена. Потеря GNSS приводит к деградации 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. **разработка и реализация фреймворка резервной навигации**, обеспечивающего продолжение полёта БПЛА в условиях отсутствия GNSS, с акцентом на устойчивость, вычислительную эффективность и интеграцию в архитектуру открытого автопилота;
3. **разработка метода трехмерной локализации объектов в реальном времени** на основе монокулярной камеры и гиросtabilизированного лазерного дальномера без использования карт местности и априорных сведений о размерах объектов, пригодного для работы в неструктурированных средах;
4. **разработка кооперативного метода относительной локализации для многоагентных систем**, при котором один частично локализованный или управляемый оператором агент поддерживает других за счёт передачи относительных оценок положения в условиях отсутствия GNSS;
5. **разработка, интеграция и экспериментальная оценка единого программно-аппаратного комплекса**, объединяющего все предложенные компоненты и обеспечивающего согласованность, совместимость и практическую реализуемость в открытой программной и аппаратной среде.

Научная новизна: В диссертационной работе разработана новая архитектура, интегрирующая современные методы навигации и локализации одиночных и многоагентных БПЛА, функционирующих в условиях отсутствия GNSS. В рамках

единой бортовой системы объединены резервная навигация, трехмерная локализация объектов и кооперативная координация роя. В отличие от существующих подходов, рассматривающих указанные задачи отдельно, предложенная система обеспечивает их совместную работу в реальном времени на бортовой вычислительной платформе. Разработанные алгоритмы обеспечивают навигацию без использования GNSS, локализацию целей в реальном времени на основе монокулярной камеры и гиростабилизированного лазерного дальномера, а также относительную локализацию между БПЛА без применения внешней инфраструктуры.

Практическая значимость: Разработанные методы реализованы и проверены в ходе обширных экспериментов как в симуляционной среде, так и в реальных условиях, в ряде прикладных сценариев, и могут быть непосредственно использованы на открытой платформе управления БПЛА PX4 в научных и практических приложениях. Предлагаемая система расширяет функциональные возможности существующих автопилотных решений за счёт внедрения режимов автономной резервной навигации, бортовой локализации целей и многоагентной координации, обеспечивая продолжение функционирования БПЛА в условиях отсутствия или деградации спутниковой навигации.

В практической эксплуатации резервная навигация позволяет продолжать полет и выполнение миссий при недоступности GNSS. Бортовая локализация целей обеспечивает получение метрических координат объектов без использования внешней инфраструктуры и априорных карт, что делает возможной работу в неизвестных и неструктурированных средах. Кооперативная многоагентная координация на основе относительных состояний обеспечивает устойчивый полёт роя без глобальной локализации, требуя лишь минимального дополнительного бортового сенсорного и вычислительного оснащения и не накладывая ограничений на высоту полета.

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 որոնողավորկարարական աշխատանքներում: Ժամանակակից ԱԹՍ-ների ինքնավարությունը մեծապես հիմնված է գլոբալ 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՝ իլյացման և սպուֆինգի արդյունքում: GNSS-ի կորուստը հանգեցնում է նավիգացիայի, տեղորոշման և կառավարման խաթարման՝ դարձնելով անհնար ԱԹՍ-ի առաջադրանքի հետագա կատարումը:

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 գլոբալ նավիգացիոն տեղեկատվության կորստի պայմաններում: Համակարգը հնարավորություն է տալիս շարունակել առաքելությունների կատարումը, իրական ժամանակում իրականացնել օբյեկտների տեղորոշում և ապահովել երամի անդամների կոոպերատիվ վարքագիծը բորտային չափումների հիման վրա, ինչպես նաև համատեղելի է բաց կոդով ավտոպիլոտային հարթակների հետ, ինչը ապահովում է դրա գործնական կիրառելիությունը:

Նպատակի իրականացման համար հետազոտությունում լուծվում են հետևյալ խնդիրները՝

1. GNSS-ի բացակայության պայմաններում նավիգացիայի և տեղորոշման գոյություն ունեցող մեթոդների համեմատական վերլուծության իրականացում` դրանց տեխնիկական

սահմանափակումների բացահայտմամբ և բաց կոդով և երամայային համակարգերում կիրառելիության գնահատմամբ,

2. պահուստային նավիգացիայի ֆրեյմվորքի մշակում և իրականացում, որը ապահովում է ԱԹՄ-ի թռիչքի

շարունակականությունը GNSS-ի բացակայության պայմաններում` շեշտադրելով կայունությունը, հաշվարկային արդյունավետությունը և բաց կոդով ավտոմատի ճարտարապետության հետ ինտեգրումը,

3. իրական ժամանակում օբյեկտների եռաչափ տեղորոշման մեթոդի մշակում` հիմնված տեսախցիկի և գիրոստաբիլացված լազերային հեռաչափի վրա` առանց տեղանքի քարտեզների և օբյեկտների չափերի մասին ապրիորի տվյալների օգտագործման, որը կիրառելի է չկարգավորված միջավայրերում,

4. երամային համակարգերի համար հարաբերական տեղորոշման կոոպերատիվ մեթոդի մշակում, որի դեպքում մեկ մասնակիորեն տեղորոշված կամ օպերատորի կողմից կառավարվող ԱԹՄ-ն աջակցում է մյուսներին` GNSS-ի բացակայության պայմաններում հարաբերական դիրքերի գնահատումների փոխանցման միջոցով,

5. առաջարկված բոլոր բաղադրիչները միավորող միասնական ծրագրային-ապարատային համալիրի մշակում, ինտեգրում և փորձարարական գնահատում` ապահովելով համակարգի համաձայնեցվածությունը, համատեղելիությունը և գործնական կիրառելիությունը բաց ծրագրային և ապարատային միջավայրում:

Գիտական նորույթը: Դիսերտացիոն աշխատանքում մշակվել է նոր ճարտարապետություն, որը ինտեգրում է GNSS-ի բացակայության պայմաններում գործող մեկ և մի քանի անօդաչու թռչող սարքերի (ԱԹՄ) նավիգացիայի և տեղորոշման ժամանակակից մեթոդները: Միասնական բորտային համակարգի շրջանակում համատեղված են պահուստային նավիգացիան, օբյեկտների եռաչափ տեղորոշման և երամի կոոպերատիվ կոորդինացիան: Ի տարբերություն գոյություն ունեցող մոտեցումների, որոնք նշված խնդիրները դիտարկում են առանձին, առաջարկվող համակարգը ապահովում է դրանց համատեղ և իրական ժամանակում իրականացումը բորտային համակարգչի վրա: Մշակված ալգորիթմները հնարավորություն են տալիս իրականացնել GNSS-ից անկախ նավիգացիա, իրական ժամանակում նպատակների տեղորոշում տեսախցիկի և գիրոստաբիլացված լազերային հեռաչափի հիման վրա, ինչպես նաև հարաբերական տեղորոշում ԱԹՄ-ների միջև` առանց արտաքին ենթակառուցվածքի օգտագործման:

Գործնական նշանակությունը: Մշակված մեթոդները իրագործվել և փորձարկվել են ինչպես ԱԹՄ սիմուլյատորորում, այնպես էլ իրական

պայմաններում, մի շարք կիրառական սցենարներում, և կարող են անմիջապես կիրառվել բաց կողով P×4 ավտոպիլոտի վրա՝ գիտական և գործնական խնդիրների լուծման համար: Առաջարկվող համակարգը ընդլայնում է առկա ավտոպիլոտային լուծումների հնարավորությունները՝ ներմուծելով ինքնավար պահուստային նավիգացիայի, օբյեկտների բորտային տեղորոշման և երամի կոորդինացիայի ռեժիմներ, ինչը ապահովում է ԱԹՄ-ների աշխատանքի շարունակականությունը GNSS-ի բացակայության պայմաններում: Գործնական կիրառման ընթացքում պահուստային նավիգացիան հնարավորություն է տալիս շարունակել թռիչքն ու առաքելությունների կատարումը GNSS-ի անհասանելիության դեպքում: Օբյեկտների բորտային տեղորոշումը ապահովում է մետրիկական կոորդինատների ստացումը՝ առանց արտաքին ենթակառուցվածքի և ապրիորի քարտեզների օգտագործման, ինչը թույլ է տալիս աշխատանք իրականացնել անհայտ և չկարգավորված միջավայրերում: Հարաբերական վիճակների վրա հիմնված կոոպերատիվ երամային կոորդինացիան ապահովում է երամի կայուն թռիչքը՝ առանց գլոբալ տեղորոշման անհրաժեշտության, պահանջելով միայն նվազագույն լրացուցիչ բորտային տվիչներ և հաշվարկային միջոցներ և չսահմանափակելով թռիչքի բարձրությունը:

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՝ պահուստային 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: