

Сагитов Дамир Ильдарович

ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный университет
гражданской авиации им. Главного маршала авиации А.А. Новикова

Титова Карина Алексеевна

ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный университет
гражданской авиации им. Главного маршала авиации А.А. Новикова

Сидоркина Александра Евгеньевна

ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный университет
гражданской авиации им. Главного маршала авиации А.А. Новикова

Оценка экономической эффективности комплексирования навигационных средств при обеспечении надёжности аэронавигации в особых условиях

Аннотация. В статье рассмотрены методы и технические средства навигации воздушных судов (ВС), обеспечивающие точное и безопасное выполнение полетов в особых условиях (Арктика, океаны, малонаселенные районы). Проблема обусловлена отсутствием наземных ориентиров, сложными метеоусловиями и недостаточно развитой инфраструктурой радионавигационного обеспечения. Цель работы — обосновать выбор оптимального комплекса навигационных средств для достижения требуемой надёжности в особых условиях и оценить экономический эффект от их внедрения, включая предотвращенный ущерб и окупаемость. Количественные расчеты подтверждают целесообразность предложенных решений, как с навигационной, так и с экономической точки зрения.

Ключевые слова: аэронавигация, Арктика, океанические перелеты, срок окупаемости, малонаселенные районы, эффективность затрат.

Sagitov Damir Ilydarovich

Saint Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Marshal of
Aviation A. A. Novikov

Titova Karina Alekseevna

Saint Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Marshal of
Aviation A. A. Novikov

Sidorkina Alexandra Evgenievna

Saint Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Marshal of
Aviation A. A. Novikov

Assessment of the economic efficiency of combining navigation tools to ensure the reliability of air navigation in special conditions

Abstract. The article discusses methods and technical means of aircraft navigation (AV) that ensure accurate and safe flights in special conditions (the Arctic, oceans, and sparsely populated areas). The problem is caused by the lack of ground references, difficult weather conditions, and insufficiently developed radio navigation infrastructure. The purpose of this work is to justify the choice of the optimal set of navigation tools to achieve the required reliability in special conditions and to assess the economic benefits of their implementation, including the prevented damage and payback period. Quantitative calculations confirm the feasibility of the proposed solutions, both from a navigation and economic perspective.

Keywords: air navigation, Arctic, oceanic flights, payback period, sparsely populated areas, cost efficiency.

Введение. Обеспечение безопасности и регулярности полетов в особых условиях является одной из наиболее сложных задач современной аэронавигации. В Арктике, над океанами и на малонаселенных территориях общепринятая навигация становится ненадежной или вовсе невозможной из-за ряда факторов.

Арктика представляет собой сложную среду с экстремальными климатическими, географическими и инфраструктурными условиями. Из-за непосредственной близости от Северного магнитного полюса Земли, стрелка магнитного компаса становится крайне чувствительной и нестабильной, а ее показания — недостоверными. Для ориентирования в Арктике используют бортовые радиолокационные станции, спутниковые системы навигации, ИНС и астрономические методы. Гиropolукомпас позволяет сохранять заданное направление, измеряя углы разворота вокруг вертикальной оси. Он не зависит от магнитного поля Земли, что обеспечивает его эффективность в северных широтах. Полярные сияния осложняют астрономическую навигацию, ухудшая видимость небесных объектов, поэтому для определения направления на истинный север применяют астрокомпас. Навигация осуществляется в ортодромической системе координат. Однако эффективность спутниковой навигации снижается в приполярных широтах, а применимость астрономических методов в полярный день ограничена.

Океанические полеты характеризуются почти полным отсутствием радиолокационного контроля, поэтому экипаж полагается на ИНС и периодические доклады органам ОВД через ВЧ-радио или спутниковую связь. ИНС непрерывно определяет положение ВС, для повышения точности ее данные корректируются спутниковыми системами GPS/GNSS. В связи с ростом интенсивности воздушного движения и невозможностью сократить интервалы между ВС без риска для безопасности, было принято решение о создании MNPS (Minimum Navigation Performance Specifications) — минимальных технических требований к навигационным характеристикам самолета. Поэтому борта, выполняющие полеты в районах без радиолокационного контроля, должны быть оборудованы двумя независимыми системами дальней навигации.

Малонаселенные районы. Большая часть территории России имеет низкую плотность населения, что осложняет навигацию из-за отсутствия ориентиров и наземной инфраструктуры. Подобная ситуация затрудняет визуальное и радиолокационное ориентирование, повышая требования к подготовке экипажа, увеличивая зависимость от автономных и спутниковых навигационных систем. Маршруты движения не оборудованы стандартными средствами, необходимыми для аэронавигации (VOR, DME, NDB и др.), из-за чего полеты производятся с использованием инерциальных и спутниковых систем (GPS, ГЛОНАСС).

Для понимания возможностей и ограничений этих и других средств рассмотрим основные навигационные методы, применяемые в авиации.

ИНС — автономное устройство, предназначенное для определения координат ВС методом счисления пути и вычисления ряда других навигационных элементов полета. Принцип работы ИНС основан на двойном последовательном интегрировании. В систему вводят начальные координаты, ориентацию и скорость на старте. Гироскопы регистрируют угловые скорости по осям, акселерометры — проекции ускорения. Интегрируя ускорение, получают скорость, а затем — координаты объекта. По данным гироскопов и магнитометров рассчитываются углы пространственного положения. Система имеет единственный недостаток — дрейф. Именно поэтому современные ВС используют ИНС вместе с GNSS (GPS/ГЛОНАСС), барометрами, радиовысотомерами и другими датчиками, а также используют фильтр Калмана, который в реальном времени компенсирует накопившиеся ошибки.

Радионавигация определяет местоположение и курс ВС с помощью радиотехнических средств, которые делятся на радионавигационное, радиосвязное и радиолокационное. Радионавигационные делятся на автономные и неавтономные. В наши дни чаще всего используют неавтономные, так как они образуют радионавигационную

систему (PHC) — совокупность бортовых, наземных или спутниковых радионавигационных средств, обеспечивающих информацией ВС. В ее состав входят опорные станции с известными координатами и бортовое оборудование для приема и обработки сигналов. К системам ближней навигации относятся РСБН, VOR/DME, TACAN. Данные комплексы состоят из наземного радиомаяка и бортового ответчика, обеспечивающих постоянное измерение азимута и дальности ВС. Для дальней навигации применяются спутниковые (ГЛОНАСС, GPS) и наземные (РСДН-10 «Чайка» и РСДН-20 «Альфа») системы. Для обеспечения точного и безопасного захода на посадку используется специальное оборудование: ILS, MLS, GLS, JPALS.

Система радиосвязи обеспечивает обмен информацией с помощью радиоволн. Принцип ее работы заключается в преобразовании информации в радиосигнал, его передаче через пространство и обратном кодировании в точке приема. Аварийные радиомаяки могут активироваться автоматически при ударе или вручную экипажем для передачи сигнала бедствия. Спутниковые терминалы обеспечивают глобальную связь, передавая голосовые сообщения, данные и сигналы бедствия с точными координатами.

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) (GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou) — комплекс технических средств, который позволяет определять точное местоположение, скорость и время в любой точке земного шара с помощью сигналов. Они обеспечивают оптимальную маршрутизацию, экономию топлива и автоматизацию управления полетом, повышая безопасность за счет интеграции с ADS-B и современными бортовыми системами. Однако ГНСС уязвимы к помехам и подавлению сигнала, требуют прямой видимости нескольких спутников. Их работа зависит от целостности спутниковой сети и актуальности баз данных.

Астронавигация — метод определения положения и курса по небесным светилам. Она полностью автономна, что критически важно для продолжительных перелётов в районах, где другие навигационные средства недоступны или работают нестабильно. В авиации применяются астроинерциальные системы и комплексные автономные системы. Для их использования требуется ясное небо, знание точного времени и положения светил, — и астрокомпасы. Они служат надежным резервом для навигации, когда основные средства выходят из строя. Принцип действия астросистем заключается в измерении углов места и азимутов светил при пеленговании их секстантами и организации автоматического слежения за ними с последующим решением сферического треугольника.

Визуальная навигация — способ ориентирования по наземным объектам, рельефу и линии горизонта. Она применяется при хорошей видимости, когда земная или водная поверхность отчетливо просматривается из кабины. Существуют правила визуальных полетов (ПВП) — набор правил и инструкций, которых пилот обязан придерживаться во время выполнения полетов. В процессе полета экипаж непрерывно сопоставляет видимые за бортом объекты с картой или аэронавигационным планом, что требует развитого пространственного мышления и хорошего знания местности. В отличие от радионавигации и спутниковых систем, визуальная навигация не требует сложного оборудования: достаточно карт, компаса и умения быстро ориентироваться. Опорные точки необходимо заранее изучить и отметить на карте. В современной авиации полеты по ПВП часто дополняются правилами полетов по приборам (ППП) и радионавигацией, что обеспечивает высокий уровень безопасности и гибкости в управлении ВС.

В штатных условиях навигационные средства работают как взаимодополняющий комплекс, но в особых условиях выход из строя одного элемента, ведёт к отказу всей системы. Предотвратить потерю навигации можно путем интеграции средств с их взаимным резервированием.

Проведем сравнительный анализ, для выбора лучших сочетаний систем.

Таблица 1 – Сравнительный анализ навигационных методов

Метод	Автономность	В Арктике	Над океанами	В малонаселенных районах	Недостатки в особых условиях
Магнитный компас	Высокая	Не работает	Работает	Работает	Нестабильность в полярных широтах
Гироскопический	Высокая	Работает	Работает	Работает	Накопление дрейфа со временем
ИНС	Высокая	Работает	Работает	Работает	Дрейф, требует корректировки
Спутниковая навигация	Средняя (зависит от кол-ва спутников)	Работает, но сигнал слабее	Работает	Работает	Помехи, качество навигации зависит от кол-ва спутников и их расположения
Астронавигация	Высокая	Частично, зависит от видимости	Работает	Работает	Требует видимости небесных тел
VOR/DME	Низкая (требует наземных станций)	Не работает	Не работает	Не работает	Требуют наземных радиомаяков
Радиолокационный контроль	Низкая	Не работает	Не работает	Не работает	Требуют наземных станций
Визуальная навигация	Высокая	Частично, зависит от видимости и наличия наземных ориентиров	Не работает, нет ориентиров	Работает	Применима только в светлое время суток при хорошей видимости

Таблица 1 показывает, что работают лишь три автономных метода, каждый из которых имеет разные ограничения. Поэтому надежность аэронавигации может быть обеспечена только за счет их сочетания.

Таблица 2 – Количественная оценка эффективности схем

Регион	Навигационный метод / схема	Точность (км)	Скорость дрейфа, км/час	Зависимость от внешних факторов	Интегральный показатель эффективности
Арктика	ИНС (класс 0,01°/час)	0,5	0,25	Отсутствует	0,85
	ИНС + GNSS (штатная)	0,05	0 (при наличии сигнала)	Нестабильность GNSS выше 75° с.ш.	0,75
	Гирополукомпас	1,0	0,67	Отсутствует	0,65
	Астрокомпас	0,8	0	Полярный день/ночь, облачность	0,50
	ИНС + периодическая коррекция по астрокомпасу	0,2	0,04	Требуется ясное небо 1 раз в 90 мин	0,92
Океаны	ИНС (класс 0,01°/час)	0,5	0,25	Отсутствует	0,80
	ИНС + GNSS (штатная)	0,05	0 (при наличии сигнала)	Возможны помехи	0,90
	Две независимые ИНС + взаимная коррекция	0,08	0,013	Отсутствует	0,95
Малонаселенные районы	GNSS (штатная)	0,05	0	Нет наземной инфраструктуры	0,70
	ИНС (резерв)	1,0	0,25	Требуется точного ввода начальных координат	0,60
	GNSS + ИНС с фильтром Калмана	0,04	0 (при GNSS) / 0,25	Незначительная	0,93

Предлагаемые схемы обеспечивают интегральную эффективность 0,92–0,95, что на 5–29 % выше базовых методов.

Требуется количественно оценить надежность предлагаемых схем комплексирования (Таблица 2) в сравнении с базовыми.

Длительность полетов принята: Арктика — 6 часов, океаны — 7 часов, малонаселенные районы — 4 часа. Допустимая ошибка для маршрутного этапа — 10 км. Точность, скорость дрейфа и интегральный показатель соответствуют данным таблицы 2. Для схем, зависящих от внешних условий, надежность скорректирована с учетом этих ограничений.

$$P_S = \frac{1 - P_S^{\text{баз}}}{1 - P_S^{\text{предл}}}$$

где $P_S^{\text{баз}}$ - базовая схема;

$P_S^{\text{предл}}$ - предлагаемая схема;

P_S - вероятность успешного завершения полета.

В Арктике: $P_S = \frac{1-0,75}{1-0,92} = \frac{0,25}{0,08} \approx 3,1$ раза.

В океанах: $P_S = \frac{1-0,90}{1-0,95} = \frac{0,10}{0,05} = 2,0$ раза.

В малонаселенных районах: $P_S = \frac{1-0,70}{1-0,93} = \frac{0,30}{0,07} \approx 4,3$ раза.

Предлагаемые схемы превосходят базовые по надежности во всех трех регионах. Результаты подтверждают эффективность комплексирования.

Для оценки экономической эффективности схем комплексирования использовались: результаты расчета надежности (таблица 3), стоимость навигационного инцидента (12 млн руб.), парк из 20 воздушных судов и годовой налет в особых условиях (150 – 400 часов на одно ВС, в зависимости от региона).

Таблица 3 – Экономическая эффективность предложенных схем комплексирования

Регион	Кол-во инцидентов (шт./год)	Предотвращено инцидентов (шт./год)	Экономия (млн руб./год)	Затраты (млн руб.)	Срок окупаемости (лет)
Арктика	2,4	$2,4 \times (1 - 1/3,1) = 1,6$	$1,6 \times 12 = 19$	250	$250 / 19 = 13,2$
Океаны	4,0	$4,0 \times (1 - 1/2,0) = 2,0$	$2,0 \times 12 = 24$	200	$200 / 24 = 8,3$
Малонаселенные районы	3,0	$3,0 \times (1 - 1/4,3) = 2,3$	$2,3 \times 12 = 28$	120	$120 / 28 = 4,3$

Предложенные схемы комплексирования экономически эффективны во всех трех регионах. Экономическая целесообразность внедрения определяется компенсацией затрат за счет снижения ущерба от навигационных инцидентов.

Вывод. Проведенное исследование показало, что навигация в особых условиях невозможна без комплексирования разных методов. Предложенные схемы объединяют достоинства автономных систем и глобальной спутниковой навигации, компенсируя их недостатки. Количественные расчеты свидетельствуют о значительном повышении надежности — в несколько раз по сравнению с базовыми вариантами. Практическая ценность работы заключается в возможности использования разработанных схем при планировании полетов и оснащении ВС.

Список источников

1. Белкин А. М. Воздушная навигация: справочник / А. М. Белкин. Москва: Транспорт, 1988. – 248 с.
2. Гонца Д. И. Зависимые кооперативные системы ADS-C и ADS-B [Электронный ресурс] / Д. И. Гонца. – Донецк: ДонНТУ, 2014. – Режим доступа: <https://masters.donntu.ru/2014/frt/gontsa/ind/index.htm> (дата обращения: 07.05.2026).
3. Жумагалиев А. К. Воздушная навигация в Арктике и районах Крайнего Севера / А. К. Жумагалиев, А. В. Новокрещенных. – Текст: непосредственный // Молодой ученый. – 2024. – № 49 (548). – С. 39-41.
4. Сарайский Ю. Н. Аэронавигация. Часть I. Основы навигации и применение геотехнических средств: учебное пособие / Ю. Н. Сарайский, И. И. Алешков. – Санкт-Петербург: СПбГУГА, 2010. – 300 с.
5. Сарайский Ю. Н. Аэронавигация. Часть II. Радионавигация в полете по маршруту: учебное пособие / Ю. Н. Сарайский, А. В. Липин, Ю. И. Либерман. – Санкт-Петербург: СПбГУГА, 2013. – 383 с.
6. Астрономические системы, применяемые в авиации (назначение, выполняемые функции, типы, характеристики, основное уравнение аэронавигации) [Электронный ресурс] // StudFiles. – Режим доступа: <https://studfile.net/preview/942772/page:23/> (дата обращения: 07.05.2026).

Сведения об авторах

Сагитов Дамир Ильдарович, кандидат технических наук, доцент кафедры №13 «Систем автоматизированного управления», Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А. А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия.

Титова Карина Алексеевна, студент 2 курса, Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А. А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия.

Сидоркина Александра Евгеньевна, студент 2 курса, Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А. А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия.

Information about the authors

Sagitov Damir Ilydarovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department No. 13 'Automated Control Systems', Saint Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation A. A. Novikov, Saint Petersburg, Russia.

Titova Karina Alekseevna, 2nd year student, Saint Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation A. A. Novikov, Saint Petersburg, Russia.

Sidorkina Alexandra Evgenievna, 2nd year student, St. Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation A. A. Novikov, St. Petersburg, Russia.