

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ РАДИОМЕТРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ПОЛЯРНЫХ ШИРОТАХ

**Савиных В.П., Троицкий В.И., Скальский Г.М.,**

*Московский государственный университет геодезии и картографии  
(МИИГАиК), Москва, Россия*

*vp@miigaik.ru, v.troja@yandex.ru, glebski93@mail.ru*

**Козлов А.И., Затучный Д.А.**

*Московский государственный технический университет гражданской авиации (МГТУ ГА),  
Москва, Россия*

*zatuch@mail.ru, vilandes@yandex.ru*

*Аннотация. В работе решается задача возможности использования беспилотных летательных аппаратов для радиометрического зондирования поверхности в полярных широтах. Предложена схема управления полётом группы аппаратов. Предложен алгоритм выявления погрешности в информации. Построена математическая модель для выявления ошибок при выявлении погрешности.*

*Ключевые слова: радиометрическая аппаратура, «рой» беспилотных летательных аппаратов, схема управления полётом беспилотных летательных аппаратов, множество априорных показателей и полученных радиометрических данных в текущий момент времени.*

## **Введение**

Северные регионы РФ, в том числе и Северный морской путь (СМП), являются проблемными зонами для организации транспортных перевозок. Отсутствие информации об опасных участках может привести к непредвиденным инцидентам или даже катастрофам при эксплуатации крупнотоннажных кораблей, что, в свою очередь, приводит к неоправданной потере временного и материального ресурса. Следовательно, необходим непрерывный динамичный мониторинг всех возможных маршрутов с учётом меняющейся ледовой обстановки. Для осуществления этой процедуры требуется комплексное использование всех имеющихся в наличии средств, в том числе и перспективных. Такие системы должны удовлетворять следующим требованиям:

- Иметь возможность исследовать все возможные маршруты СМП в режиме реального времени круглогодично, круглосуточно и без перерывов;
- Иметь характеристики, дающие право и возможность использовать радиометрическую аппаратуру с диапазонами и поляризацией, являющихся наилучшими в данных условиях.

Учитывая особенности Крайнего Севера РФ, особенно длину маршрутов СМП и слабое обеспечение их средствами обеспечения безопасного маршрута, можно рекомендовать использование систем, основанных на продуктах спутниковых технологий, используя их основные свойства: обширность, независимость от погодных условий, возможность проведения мониторинга в любых отдалённых районах, возможность координации действий из одного пункта.

При этом имеются и недостатки использования данных технологий в северных регионах:

- Точность определения местоположения объекта резко снижается по причине ухудшения геометрического фактора рабочих созвездий, из-за малого угла места спутников над горизонтом;
- Влияние рельефа с учётом того обстоятельства, что сигнал передаётся в дециметровом диапазоне волн;
- Слабая мощность сигнала спутника и, как следствие, уязвимость его для подавления.

На основе вышесказанного возникает необходимость решения задачи комплексного использования спутниковых систем с иными имеющимися в наличии системами для регионов Крайнего Севера или даже переход для работы только на этих системах.

Как вариант решения этой проблемы, может служить предложение по использованию группы беспилотных летательных аппаратов (БЛА). Во-первых, стоимость беспилотного летательного аппарата и даже большого их количества ниже, чем наземных ретрансляторов. Во-вторых, количество подобных воздушных ретрансляторов можно варьировать в зависимости от мощности приёмопередающей аппаратуры на борту. В-третьих, за счёт динамических характеристик беспилотных летательных аппаратов имеется возможность быстро менять конфигурацию их расположения, что позволит избежать влияния негативных метеоусловий. Помимо этого, выход из строя в силу естественных или искусственных причин одного или нескольких беспилотных летательных аппаратов

не несёт серьёзных проблем, так как есть возможность быстрого восполнения отказавшего элемента (элементов).

Кроме того, такая характеристика как разрешение радиометров гораздо меньше, чем у радиолокационных станций (РЛС) с синтезированной апертурой. Таким образом, задействование их на космических аппаратах не даёт требуемого разрешения, а при использовании на БПЛА, работающих на низких высотах, разрешение может стать многократно больше.



Рис. 1. Район Северного морского пути

## 1. Алгоритм классификации беспилотных летательных аппаратов

Первым этапом для решения данной проблемы становится классификация беспилотных летательных аппаратов с точки зрения поставленных перед ними проблем.

При этом используются следующие характеристики:

- Длительность полёта БПЛА;
- Высота полёта БПЛА;
- Максимальная взлётная масса БПЛА;
- Метод управления БПЛА;
- Задача, которую должен решить БПЛА.

Анализируя данные характеристики, можно сделать рекомендацию отдать приоритет максимальной взлётной массе БПЛА, так как согласно [1] – это главный показатель для получения разрешения на полёты. Задача, которую должен решить БПЛА можно считать наименее важным показателем, так как один и тот же летательный аппарат может быть задействован для различных целей. В некоторых случаях при классификации БПЛА вместо задачи, которую он должен решить, может быть указана рекомендация для использования.

На рис.2 приведена блок-схема классификации БЛА.

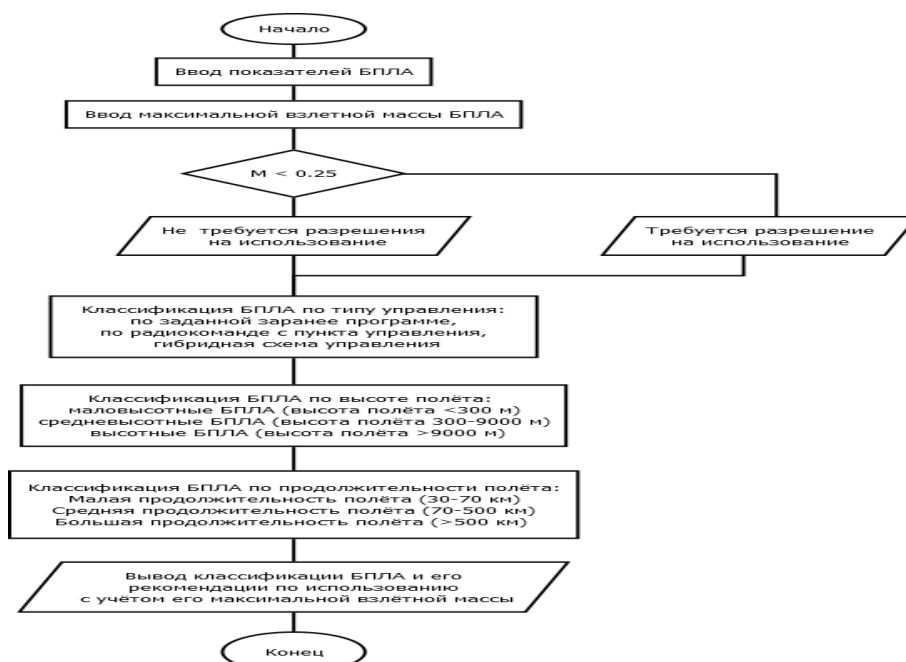


Рис. 2. Алгоритм классификации БЛА

Важный вопрос, на который следует ответить уже на этапе проектирования БПЛА, заключается в том, насколько стоимость, затраченная на создание БПЛА, будет коррелироваться с доходом от его использования.

Введём обозначения:

$C_i$  – ожидаемая цена создания БПЛА в зависимости от его высоты полёта,  $i=1, \dots, 3$ ;

$C_j$  – ожидаемая цена создания БПЛА в зависимости от его длительности полёта,  $i=1, \dots, 3$ ;

$C_l$  – ожидаемая цена создания БПЛА в зависимости от его взлётной массы,  $i=1, \dots, 3$ ;

$C_k$  – ожидаемая цена изготовления БПЛА в зависимости от метода управления,  $i=1, \dots, 3$ .

Можно дать рекомендацию, что стоимость БПЛА можно связать с его классификацией и определить следующим образом:

$$C = c_i + C_j + C_l + C_k \quad (1)$$

Далее имеет смысл сравнить данное значение с неким комплексным показателем, которое обозначим  $\alpha$ . Эта величина варьируется относительно региона, где задействован БПЛА, условий его функционирования и от решаемых БПЛА проблем. В неё может входить ожидаемый ресурс задействования этого вида БПЛА в определённых условиях и другие факторы разного характера, имеющие воздействие на выгоду от применения БПЛА.

Представляется естественным сформулировать следующее правило:

При  $C < \alpha$ , можно дать рекомендацию для использования этого типа БПЛА в рассматриваемом регионе с целью выполнения поставленных задач.

При  $C \geq \alpha$ , можно дать рекомендацию не использовать этот тип БПЛА в рассматриваемом регионе с целью выполнения поставленных задач.

## 2. Повышение качества управления полётом «роя» БПЛА

На рис. 3 приведена общая схема управления полётом нескольких БПЛА.

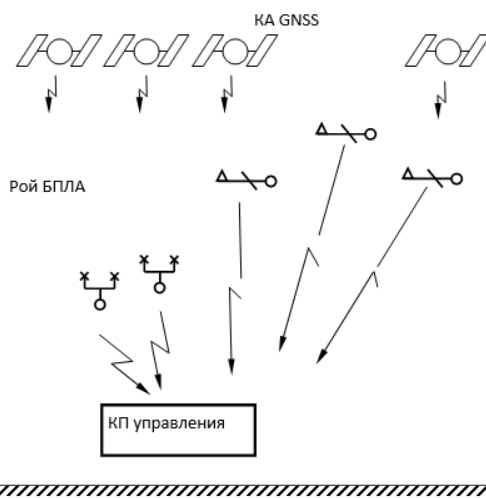


Рис. 3. Общая схема управления полётом нескольких БЛА

Анализируя схему, приходим к следующим выводам:

Для осуществления качественного полёта БПЛА необходима синхронная работа трёх элементов: орбитальная группировка космических аппаратов (КА GNSS), системы БПЛА, наземные системы управления полётом «роя» БПЛА (КП-управления).

Спутниковые технологии способны предоставить точные данные, но являются очень чувствительными к различным искусственным и естественным воздействиям, в силу дециметровой длины волны сигнала, а также его малой мощности. Следует отметить, что на качество данных, полученных с навигационного космического аппарата (НКА), влияет, что сигнал подвержен влиянию ионосферных и тропосферных погрешностей.

Роль наземного пункта управления заключается в мониторинге и контроле полёта БПЛА, и проверке достоверности полученных данных.

В течение использования «роя» БПЛА следует учитывать варианты получения и передачи достоверных данных (наличие ошибки) от каждого БПЛА и всей системы [2].

Далее рассмотрим следующие шаги для выявления достоверности полученных и переданных БПЛА данных:

- Определение показателей информации;
- Сравнение априорных и полученных показателей;
- Определение возможного наличия предельного отклонения;
- Анализ ситуации.

Предложим следующий алгоритм сравнения априорных и полученных показателей:

Введём величину, включающую набор априорных и реальных показателей, имеющихся в данном сообщении.

Введём обозначения:

$\vec{X}_1, \dots, \vec{X}_N$  - совокупность априорных показателей,

$\vec{Y}_1, \dots, \vec{Y}_N$  - набор реальных показателей,

$N$  - количество исследуемых показателей,

$T = \left( \vec{X}_1, \dots, \vec{X}_N; \vec{Y}_1, \dots, \vec{Y}_N \right)$  - множество априорных показателей и полученных радиометрических данных в текущий момент времени.

Сделаем заключение, что в данных есть ошибка, при условии, что хотя бы один показатель последовательность  $\vec{X}_1, \dots, \vec{X}_N$  отличается от набора  $\vec{Y}_1, \dots, \vec{Y}_N$ .

Представляется естественным сделать замечание, что при исследовании радиометрической информации, как правило, недостаточно одной оценки.

Таким образом, следует ввести набор априорных оценок  $\gamma_1, \dots, \gamma_m$ .

Каждому набору  $T = \left( \vec{X}_1, \dots, \vec{X}_N; \vec{Y}_1, \dots, \vec{Y}_N \right)$  ставится в соответствие величина  $\alpha_i$ ,

являющаяся характеристикой полученных данных.

Следующим шагом введём набор ограничивающих величин  $\beta_i$ .

При выполнении неравенства  $(\alpha_i - \gamma_i) < \beta_i$ , положим, что конкретная  $i$ -я оценка не выявила ошибку в радиометрической информации. Иначе, эта оценка выявила ошибку.

Каждая  $i$ -я оценка ставится в соответствие с числом  $\lambda_i$ , принимающим значения 0 или 1.

Положим, что значение 0 принимается в случае, если ошибка в сообщении не выявлена или 1, в случае, если погрешность выявлена.

Необходимо учесть, что исследуемые показатели обладают различным весом, который играет важную роль при оценке данных, переданных с БПЛА, в наземном пункте [3].

Далее необходимо расставить оценки с учётом приоритетности и любой оценке поставить в соответствие некую величину, обозначенную  $m_i$  и определённую в качестве веса оценки по проверяемому параметру информации.

Следующим этапом вычислим величину  $M = \sum_{i=1}^m m_i \lambda_i$ , далее сравним её со значением  $M'$ ,

полученной из опытных данных. Если имеет место соотношение  $M < M'$ , то делается заключение, что информация в сообщении достоверная, иначе, делается заключение, что ошибка выявлена.

Заметим, что при процедуре выявления ошибок при радиометрическом контроле с использованием БПЛА имеется два вида ошибок [4]:

1)  $i$ -я оценка не обнаружила ошибку при её наличии.

Обозначим вероятность этой ошибки как  $\varepsilon_i$ .

Это значение вычисляется по формуле:

$$\varepsilon_i = P(\lambda_i = 0 / \lambda_i = 1); \quad (2)$$

2)  $i$ -я оценка выявила ошибку при её отсутствии.

Обозначим вероятность этой ошибки как  $\delta_i$ .

Эта величина вычисляется по формуле:

$$\delta_i = P(\lambda_i = 1 / \lambda_i = 0). \quad (3)$$

Перечислим факторы, влияющие на возникновение таких ошибок:

- Недостаточный объём переданных данных;
- ошибки оборудования, определяющего ошибки в радиометрических данных, полученных с использованием БПЛА;
- Региональные условия, рельеф местности, влияние искусственного и естественного характера на оборудование, условия погоды и т.д;
- Ошибочная оценка верной информации.

Сделаем предположение, что в ходе  $i$ -й оценки учитываются  $t_i$  таких условий, где  $i = 1, \dots, m$ .

Введём обозначения:

$\eta_{t_i}^i$  - вероятность возникновения любого вышеперечисленного условия;

$p(\Delta)$  - вероятность ошибки по причине «человеческого фактора».

Все описанные условия являются зависимыми друг от друга. Ошибки, связанные с неверной оценкой достоверной информации и с другими факторами физической и технической природы, могут возникать одновременно.

Исходя из изложенного, вероятность ошибки 1 рода вычисляется по формуле [5]:

$$\varepsilon_i = \left[ \left( \sum_{t_i=1}^{k_i} \eta_{t_i}^i P(\lambda_i = 0 / \eta_{t_i}^i) \right) + p(\Delta) \right] - \left[ p(\Delta) \sum_{t_i=1}^{k_i} \eta_{t_i}^i P(\lambda_i = 0 / \eta_{t_i}^i) \right] \quad (4)$$

Вероятность ошибки 2 рода вычисляется по формуле [6]:

$$\delta_i = \left[ \left( \sum_{t_i=1}^{k_i} \eta_{t_i}^i P(\lambda_i = 1 / \eta_{t_i}^i) \right) + p(\Delta) \right] - \left[ p(\Delta) \sum_{t_i=1}^{k_i} \eta_{t_i}^i P(\lambda_i = 1 / \eta_{t_i}^i) \right] \quad (5)$$

Вероятности возникновения условий  $\eta_{t_i}^i$ , а также вероятности ошибок, связанных с неверной оценкой достоверной информации, 1 и 2 рода при оценке достоверности радиометрических данных по любому отдельному фактору получаются из опытных данных.

Следует заметить, что при большом числе исследуемых факторов выражения (4) и (5) могут оказаться слишком большими для вычислений. Таким образом, при выполнении приведённой процедуры предварительно проводится анализ и сортировка по значению всех переданных данных, чтобы минимизировать до требуемого значения количество этих факторов.

### 3. Заключение

В данной работе было предложено решение задачи повышения точности и надёжности радиометрического мониторинга в полярных широтах, в том числе и на трассах Северного морского пути (СМП) на основе задействования БПЛА.

В работе получены следующие результаты:

- Приведён алгоритм классификации БПЛА с учётом задачи радиометрического зондирования в регионах Крайнего Севера.
- Сформулировано правило корреляции стоимости БПЛА и выгоды от его использования.
- Предложен метод управления полётом «роя» БПЛА.
- Предложен алгоритм выявления ошибки в данных, полученных БПЛА (системой БПЛА) в ходе радиометрического мониторинга и контроля в полярных широтах.
- Построена математическая модель для определения ошибок 1 и 2 рода при выявлении ошибки в радиометрических данных, полученных с использованием БПЛА.

## Литература

1. Постановление Правительства РФ от 11.03.2010 N 138 (ред. от 12.07.2016) «Об утверждении Федеральных правил использования воздушного пространства Российской Федерации».
2. *Затучный Д.А.* Метод передачи данных с борта воздушного судна в городских районах в режиме автоматического зависимого наблюдения с целью снижения эффекта отражения волн // Научный Вестник МГТУ ГА №176, 2012, стр. 145-148.
3. *Завалишин О.И.* Локальные функциональные дополнения ГНСС «НППФ Спектр» // Новости навигации, Межгосударственный совет «Радионавигация», № 4, 2009, стр. 25-31.
4. *Козлов А.И., Савиных В.П., Троицкий В.И.* Параметрические модели микроволнового излучения земных покровов в навигации летательных аппаратов // Исследование Земли из космоса, 2021, №3, с. 87-93.
5. *Козлов А.И., Затучный Д.А.* Современные методы построения системы дистанционного зондирования для решения задач гражданской авиации // Труды Международного симпозиума «Надёжность и качество», г. Пенза, 2023, Том 1, стр. 19-22.
6. *Козлов А.И., Затучный Д.А.* Анализ физических свойств льдов и их сезонной изменчивости для строительства ледовых аэродромов // Труды Международного симпозиума «Надёжность и качество», г. Пенза, 2023, Том 1, стр. 122-125.