

УДК 629.73.02; 681.5.01

ФОРМИРОВАНИЕ ДИРЕКТОРНОГО ИНДЕКСА НА ПИЛОТАЖНОМ ПРИБОРЕ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ АЭРОГЕОФИЗИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

Евгений Владимирович КАРШАКОВ,

Андрей Михайлович ШЕВЧЕНКО

E-mail: shev-chik@yandex.ru,

Амир Мусаевич ГАРАКОЕВ

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук

(ИПУ РАН)

Аэрогеофизическая съемка территории выполняется путем облета летательным аппаратом (ЛА) по траекториям, покрывающим исследуемый участок поверхности. В случае использования пилотируемого ЛА к качеству ручного пилотирования предъявляются повышенные требования. В работе предлагается информировать пилота об отклонениях от заданной траектории путем формирования директорного индекса управления тягой в поле зрения. Задача пилота состоит в приведении индекса к нулевому значению путем манипулирования рычагом управления двигателем и обнуляя тем самым ошибку пилотирования. Решение поставленных задач достигается использованием оригинального энергетического подхода к управлению полетом ЛА. Приведены результаты облета участков земной поверхности.

Ключевые слова: *энергетический подход, директорный индекс, аэрогеофизические системы.*

FORMING THE DIRECTOR INDEX AND INDICATING IT ON THE FLIGHT DIRECTOR DURING AIRBORNE GEOPHYSICAL SURVEY

Evgeny V. KARSHAKOV,

Andrey M. SHEVCHENKO

E-Mail: shev-chik@yandex.ru,

Amir M. GARAKOEV

V. A. Trapeznikov Institute of control sciences of Russian Academy of Sciences

Abstract Airborne geophysical survey of the territory is performed by flying an aircraft along the trajectories that cover the survey area. When using a manned aircraft, the quality of manual piloting is subject to increased requirements. The paper suggests informing the pilot about deviations from a specified trajectory by forming the director index for thrust control and indicating it in sight. The pilot should bring the index to zero by manipulating the thrust lever and thereby zeroing the piloting error. The solution of the tasks described in the paper is achieved by using an original energy approach to control the aircraft. The results of flights over the survey areas are presented.

Keywords: *energy approach, director index, airborne geophysical systems.*

Введение

В настоящее время имеется ряд разработок аэрогеофизических систем, которые успешно применяются в поисково-оценочных исследованиях в области гидрогеологии, в инженерных и экологических изысканиях, а также при решении задач поиска полезных ископаемых (как рудных, так и углеводородных).

Примером отечественных аэрогеофизических систем могут служить вертолетные электромагнитные комплексы с выносными платформами серии «Импульс-Аэро», («СНИИГГиМС», «Сибгеотех», «Аэрогеофизическая разведка») [1], «Экватор» (ООО «Геотехнологии») [2], аэрогравиметрическая система ГТ-2А (ЗАО «ГНПП «Аэрогеофизика», ЗАО НТП «Гравиметрические технологии») [3].

Анализ проблем траекторного управления пилотируемым атмосферным летательным аппаратом в процессе отработки различных полетных заданий сделан в [4]. Выделяются основные схемы управления при выполнении аэросъемочных работ. Приводится обзор существующих реализаций систем управления проводкой летательного аппарата по программным траекториям. Дается сравнительный анализ современных систем управления. Приводятся результаты разработки программного комплекса и его использования при выполнении аэросъемочных работ.

Аэрогравиразведка, аэромагниторазведка, аэроэлектроразведка и тепловая инфракрасная аэросъемка, выполняемые с воздуха, предъявляют жесткие требования к точности выдерживания заданного маршрута полета. Так, при выполнении аэромагниторазведки допуски на отклонения по данным [5] составляли: по высоте не более 130 ± 30 м; по скорости не более 120 ± 30 км/ч; по боковому отклонению от заданной линии пути не более ± 30 м. Маршруты были составлены в виде параллельных линий различной длины (от 15 до 60 км) с интервалами между ними 500 и 1000 м.

В то же время требования к точности определения навигационных и геодезических параметров аэроэлектромагнитной (ЭМ) съемки с использованием выносной платформы весьма высоки и представлены в табл. 1.

В графе рекомендуемой точности m — знаменатель масштаба аэрогеофизической съемки. Требования к точности указанных величин сформированы как на основе соответствующих инструкций, так и по результатам геофизических экспериментов [1, 6, 7].

Таблица 1.

Рекомендуемая точность определения координат		
Параметры навигации носителя	Навигационные координаты X_n, Y_n	от 0,8 до $1,2 \cdot 10^{-3} \cdot m$ (м)
	Высота полета h_n	не хуже 10 м
	Путевая скорость V_n	от 10 до 20 км/ч
Высота центра приемной антенны (над земной поверхностью) h		от 0,6 до 1 м
Координаты и геодезические высоты вертолета X_1, Y_1, H_1		до 1 м
Координаты и геодезические высоты ЭМ-платформы X_2, Y_2, H_2		до 1 м
Координаты и геодезические высоты магнитометра X_m, Y_m, H_m		не хуже 3–5 м

Исполнение таких рекомендаций непосредственно влияет на качество аэрогеофизической съемки. Для помощи пилоту по управлению траекторией в мире существует много вариантов визуализации ситуации с указанием желаемых координат движения самолета в пространстве в форме, например, объемного коридора, «Way in the sky», «телеграфных столбов», «тангажной лесенки» и т. п.

При полевых работах возникают ситуации, требующие изменения режима работы силовой установки ЛА. Это полет с отслеживанием рельефа местности, это смена эшелона пилотирования, это стационарный и нестационарный ветер сложной структуры. При обтекании рельефа на гравиметрической съемке требуется ограничивать перегрузки значениями $0,1-0,2g$ ($1-2 \text{ м/с}^2$), чтобы избежать увеличения диапазона измеряемой величины и обеспечить необходимую чувствительность на уровне $10^{-7}g$ или выше. В таких ситуациях выдерживание заданной пространственной траектории и режима скорости на каждом из маршрутов облета приводят к большой психологической напряженности пилота. Поэтому точное следование заданному маршруту с облетом рельефа могут обеспечить только опытные высококвалифицированные летчики.

В данной работе ставится цель обеспечить помощь пилоту при управлении скоростью. Помощь будет заключаться в формировании директорного индекса в поле зрения пилота. В работе предлагается выводить на дисплей пилотажного индикатора индекс отклонения уровня полной энергии от требуемого, основываясь на энергетическом описании полета в возмущенной атмосфере.

Этот индекс должен восприниматься как командный сигнал для управления тягой двигателя с целью обнуления ошибки полной энергии. Функционально «энергетический индекс» аналогичен тому, как используются различные формы директорных индексов для помощи пилоту при ручном управлении траекторией.

Наличие такой подсказки поможет приобрести «чувство полной энергии» пилоту самолета, облегчит ручное управление или будет служить индикатором обобщенной ошибки при автоматическом управлении. Ошибку полной энергии пилот должен обнулить, манипулируя рычагом управления двигателем (РУД).

В статье излагаются основы энергетического подхода к управлению полетом и его применение для повышения точности пилотирования и тем самым улучшения качества аэрогеофизической съемки.

Основы энергетического подхода к управлению движением

Методологической базой разработок является энергетический подход к управлению пространственным движением летательных аппаратов (ЛА) [8].

С позиций энергетического подхода движение ЛА рассматривается в терминах его полной энергии и ее составляющих — потенциальной и кинетической.

В самой общей форме динамика систем управления описывается уравнением вида

$$\dot{X} = AX + BU.$$

В традиционных системах управления с обратной связью управление U формируется на базе отклонений ΔX некоторого подмножества вектора переменных состояния X .

$$U = U(X, \Delta X).$$

Функционал качества выбирается в классе

$$Q_x = Q_x(U, X, \Delta X).$$

Структура традиционных систем управления движением летательных аппаратов (ЛА) может быть представлена обобщенной эквивалентной схемой (рис. 1).

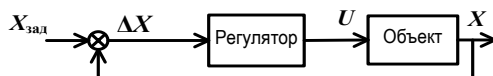


Рис. 1. Структура традиционных схем управления

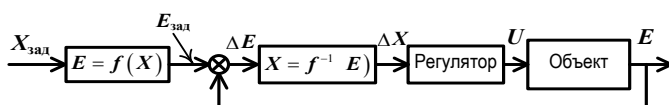


Рис. 2. Структура энергетической системы управления

Предложена концепция управления, в которой управляемой величиной является полная энергия движения $E = mgh + mV^2/2$ (рис. 2). И тогда управление формируется как

$$U = U(E, \Delta E),$$

а функционал качества задается в форме

$$Q_E = Q_E(U, E, \Delta E).$$

Энергетический подход к управлению движением в пространстве основан на описании движения объекта как в пространстве переменных состояния, так и в терминах его полной энергии и ее составляющих. В результате совместного решения динамических уравнений переносного движения в возмущенной атмосфере и уравнения полной энергии объекта было получено **уравнение баланса энергий** в системе объектов: «летательный аппарат — силовая установка — внешняя среда» [8]:

$$\Delta H_E = \Delta H_E^{дв} + \Delta H_E^D + \Delta H_E^W.$$

Уравнение описывает количественные соотношения между источником и всеми потребителями энергии. Уравнение записано в форме приращений удельной энергии движения:

$$H_E(*) = E(*)/mg = h + V^2/2g.$$

Удельная энергия имеет размерность метров, поэтому она называется также энергетической высотой. Для каждого члена уравнения баланса энергий в [5, 6] получены интегральные выражения:

$$\Delta H_E = \int_{t_1}^{t_2} V \left(\theta + \frac{\dot{V}}{g} \right) dt, \quad \Delta H_E = \int_{t_1}^{t_2} V P \cos(\alpha + \varphi) dt,$$

$$\Delta H_E^D = \int_{t_1}^{t_2} V D dt, \quad \Delta H_E^W = \int_{t_1}^{t_2} V f_w dt.$$

Здесь ΔH_E — приращение энергетической высоты ЛА, $\Delta H_E^{дв}$ — удельная работа двигателя, ΔH_E^D — затраты энергии на преодоление вредного лобового сопротивления, ΔH_E^W — работа ветра, θ — угол наклона траектории; V_B — воздушная скорость; P_H — тяга двигателя, нормированная весом самолета; α_B — угол атаки крыла; $\varphi_{дв}$ — угол установки двигателя; $f_w \cong \dot{W}_x/g - W_y/V_B$ — так называемый «фактор ветра», а W_x и W_y — горизонтальная и вертикальная составляющие ветра.

Для режима стационарного полета самолета и отсутствия ветра получен закон управления тягой в нормированных приращениях относительно заданных значений:

$$\Delta P_{\text{н}}^{\text{TEC}} = \Delta\theta + \frac{\Delta\dot{V}_{\text{в}}}{g}$$

Управление рулем высоты производится для минимизации разности между потенциальной и кинетической составляющими:

$$\Delta\delta_{\text{в}}^{\text{TEC}} = \Delta\theta - \frac{\Delta\dot{V}_{\text{в}}}{g}$$

Реализация этих законов предложена в виде ПИ-алгоритмов, содержащих в каждом канале пропорциональную и интегральную составляющую с весовыми коэффициентами $k_{\text{п}}$ и $k_{\text{и}}$:

$$\Delta P_{\text{н}}^{\text{TEC}} = \left(\Delta\theta + \frac{\Delta\dot{V}_{\text{в}}}{g} \right) \left(k_{\text{п}}^P + k_{\text{и}}^P \frac{1}{p} \right), \quad \Delta\delta_{\text{в}}^{\text{TEC}} = \left(\Delta\theta - \frac{\Delta\dot{V}_{\text{в}}}{g} \right) \left(k_{\text{п}}^{\delta} + k_{\text{и}}^{\delta} \frac{1}{p} \right).$$

Эти алгоритмы составляют ядро энергетической системы управления ЭНСУ (рис. 3).

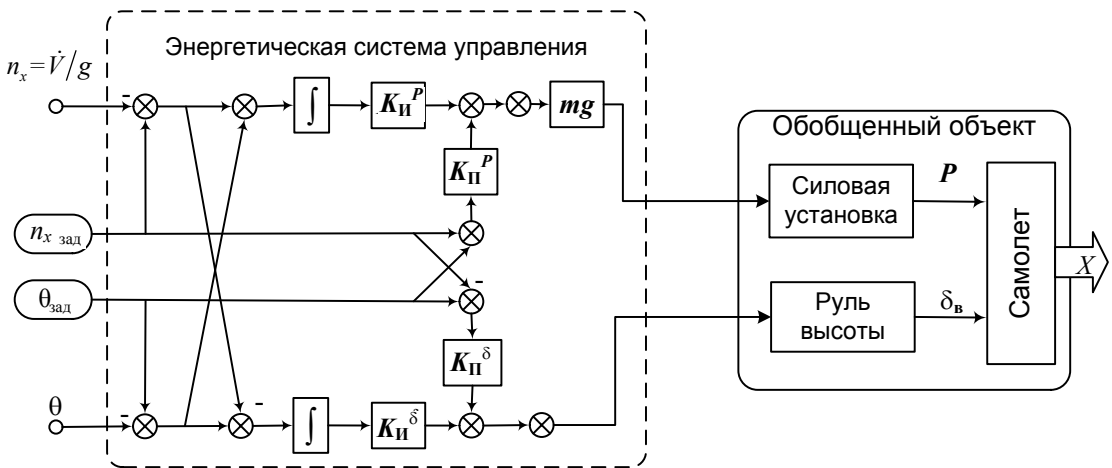


Рис. 3. Схема энергетической системы управления

Маршрут по любой опорной (или заданной) траектории организуется путем назначения последовательности требуемых значений переменных $n_{x \text{ зад}}$ и $\theta_{\text{ зад}}$. По этим переменным может быть вычислена опорная траектория в координатах полной энергии $E_{\text{опор}}$.

Формирование директорного индекса для управления тягой двигателя в ручном режиме

Традиционно в поле зрения пилота как в автоматическом, так и в ручном режимах выводится образная информация только о пространственном положении самолета, а также количественная информация о скорости полета. Атмосферные возмущения влияют не только на скорость, но и, как следует из уравнения баланса энергий, на полную энергию. Результаты зарубежных исследований показали, что классность пилотов напрямую зависит от наличия у пилотов «чувства полной энергии». А при недостаточно развитом чувстве полной энергии интерпретировать такую приборную информацию как меру энергетического состояния самолета весьма затруднительно.

В полетах с ручным пилотированием нами было предложено выводить на экран командного пилотажного индикатора величину отклонения энергетической высоты от требуемой ΔH_E , сформировав на экране пилотажного прибора подвижный индекс рядом со шкалой геометрической высоты [9, 10].

Этот индекс должен восприниматься как командный сигнал для управления тягой двигателя с целью обнуления ошибки полной энергии. Функционально «энергетический индекс» аналогичен тому, как используются различные формы директорных индексов для помощи пилоту при ручном управлении траекторией. Наличие такой подсказки поможет приобрести «чувство полной энергии» пилоту самолета, облегчит ручное управление или будет служить индикатором обобщенной ошибки при автоматическом управлении.

Анализ выполненных полетов по маршрутам покрытия зоны местности

Эффективность разработанного средства помощи пилоту в осложненных условиях облета местности со сложным рельефом была апробирована на реальном пилотажном индикаторе, установленном на двух типах носителей магниторазведывательной аппаратуры: на самолете и на вертолете. Вид экрана индикатора при выполнении одного из маршрутов облета показан на рисунке 4 (стр. 10).

Задача пилота заключается в том, чтобы удерживать маркер (зеленый треугольник) в окрестности отметки «ноль», воздействуя на органы управления летательного аппарата и тем самым минимизируя ошибку энергетической высоты.

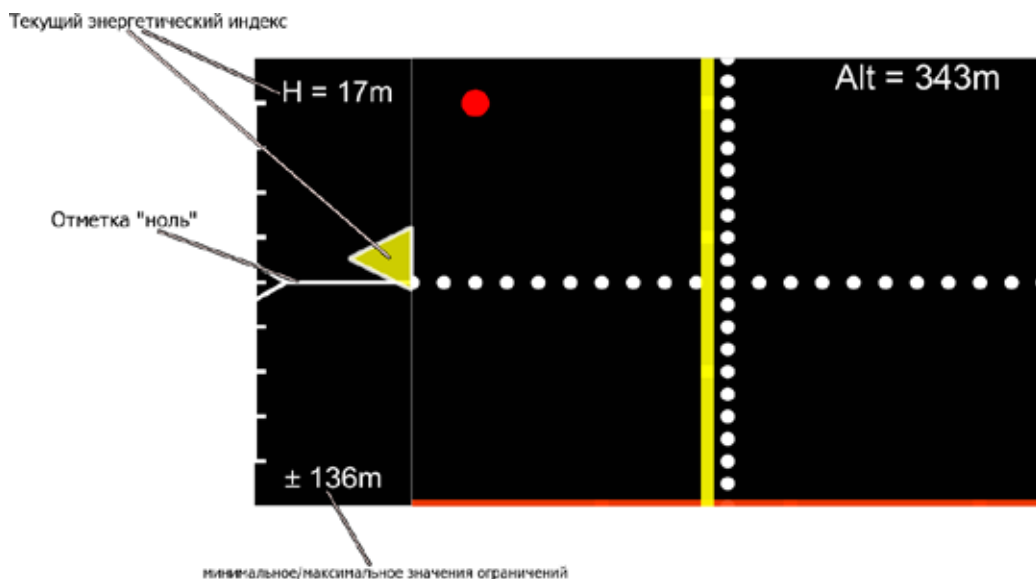


Рис. 4. Индикатор типа «стрелка» с возможностью вывода энергетического индекса

Такой подход в управлении позволяет осуществлять полет ЛА по траектории с огибанием рельефа и минимальными вертикальными ускорениями. Ниже представлены данные полета по реальной траектории.

Рассматривается управление летательными аппаратами двух типов. Это вертолет и самолет. Программная траектория представляет из себя последовательный набор точек вида: <LAT, LON, ALT>.

Здесь LAT — широта, LON — долгота, ALT — высота. При моделировании учитывается канал высоты ALT. Опорная траектория выбирается исходя из минимального значения вертикального ускорения летательного аппарата. Представим уравнение баланса энергии в контексте данных моделирования:

1) Для вертолета:

$$E_{Ind} = \Delta H_E = H_E - H_{E_{REF}};$$

$$E_{Ind} = Alt_{Heli} - PathRef + \frac{V^2 - VRef^2}{2g}.$$

2) Для самолета:

$$E_{Ind} = \Delta H_E = H_E - H_{E_{REF}};$$

$$E_{Ind} = Alt_{Aircr} - PathRef + \frac{V^2 - VRef^2}{2g}.$$

Облеты на самолете выполнялись в Южной Африканской Республике (ЮАР) с целью выполнения гравиметрической съемки. Полеты с использованием вертолета выполнялись в Забайкальском крае (Россия). Для полетов применялся радиовысотомер. Соответственно, на графиках приводится истинная высота.

На рисунке 5 представлены данные полета вертолета с применением энергетического индекса в управлении.

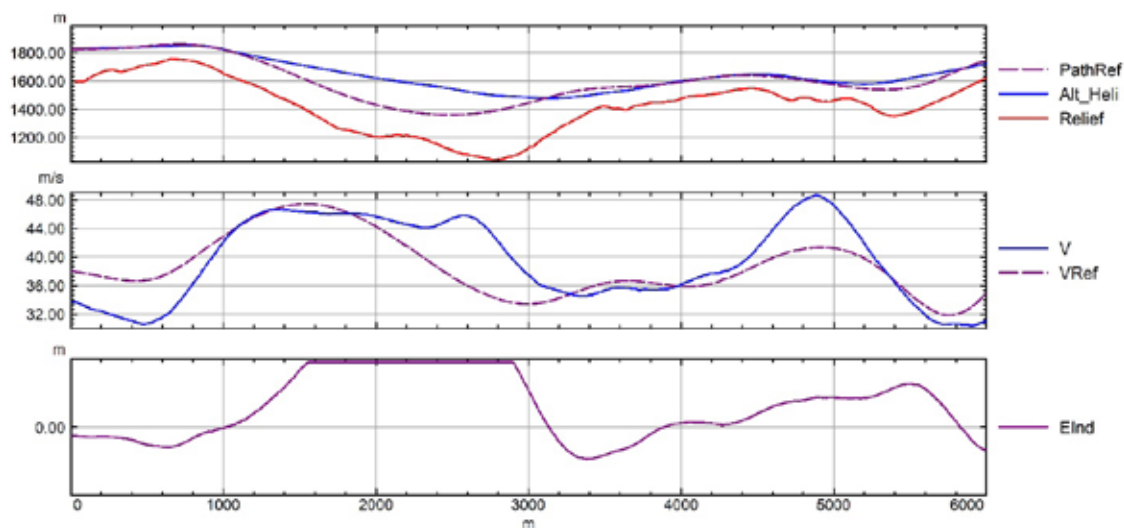


Рис. 5. Результаты полета вертолета по программной траектории

Relief — профиль рельефа поверхности, PathRef — программная траектория полета с огибанием рельефа, Alt_Heli — высота полета вертолета, V — текущая горизонтальная скорость вертолета, VRef — программная скорость вертолета, EInd — значения энергетического индекса.

Аналогично данные полета самолета представлены на рисунке 6, где Alt_Airсг — высота полета самолета.

Из представленных результатов видно, что в случае самолета энергетический индекс равномерно распределен в окрестности нуля, но в случае полета вертолета имеются отскоки и резкие перепады. С одной стороны такое поведение может быть связано с техникой пилотирования и опытом пилота, а с другой сказываются особенности управления летательными аппаратами разного типа.

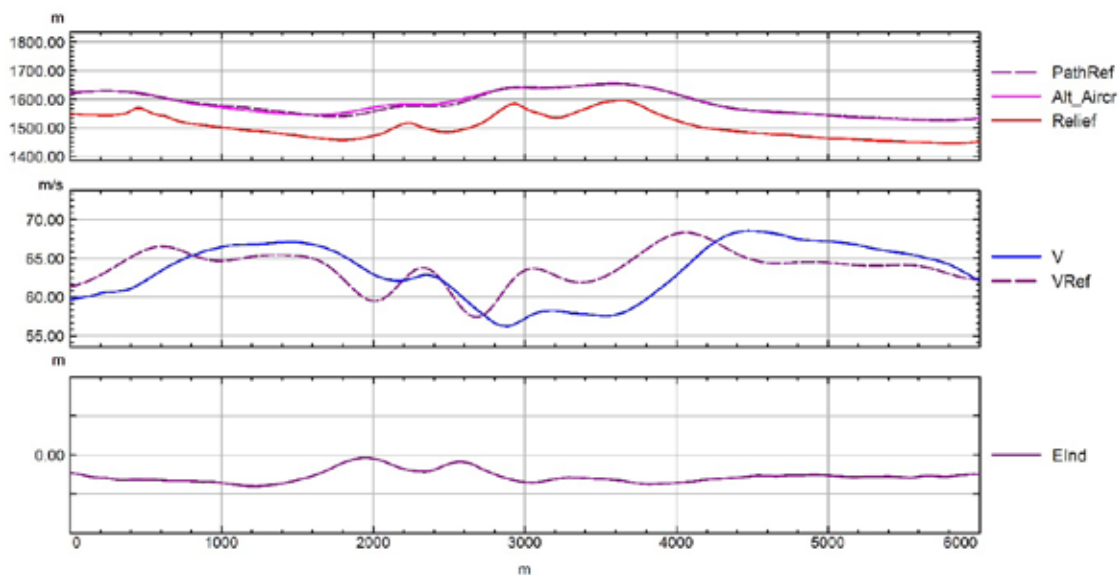


Рис. 6. Результаты полета самолета по программной траектории

Приведем качественные характеристики результатов управления:

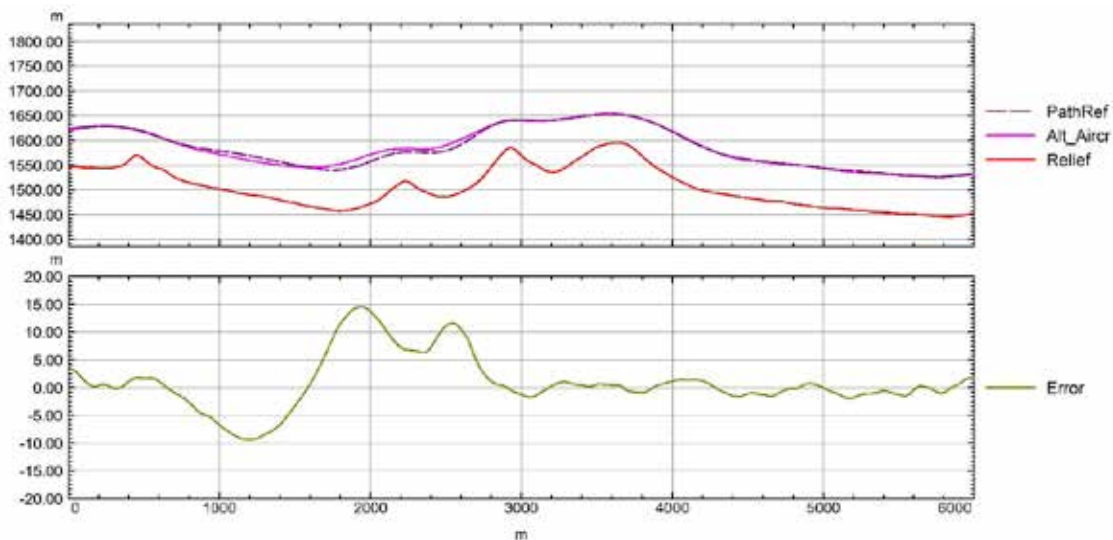


Рис. 7. Ошибка рассогласования программной и реальной траектории самолета

На рисунке 7 переменная Error — описывает ошибку рассогласования программной и реальной траектории самолета, среднее значение этой ошибки 0,97 м.

Результаты для вертолета представлены на рисунке 8.

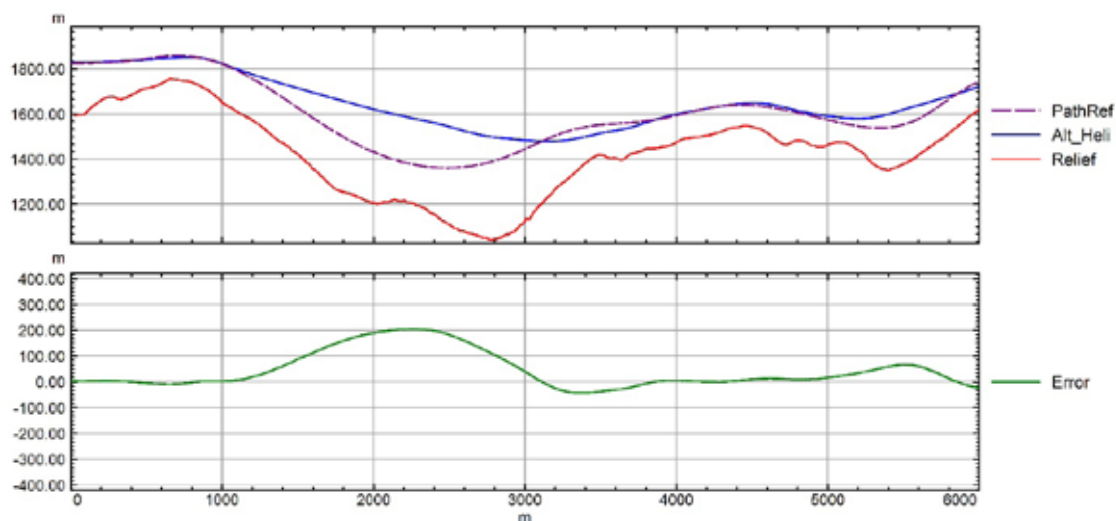


Рис. 8. Ошибка рассогласования программной и реальной траектории вертолета

Среднее значение переменной Error в случае вертолета будет 38,82 м.

Из представленных результатов видно, что управление летательным аппаратом по траектории, огибающей рельеф, с использованием энергетического индекса подходит для двух типов летательных аппаратов. Однако в случае использования носителя приборного оборудования самолетного типа результаты будут на порядок лучше. Такой разброс в качестве полета обусловлен несколькими факторами:

1. Конструктивные особенности летательных аппаратов, а также техника пилотирования.
2. Внешние возмущающие факторы (порывы ветра, сильные перепады рельефа и т. д.).

Заключение

Аэрогеофизическая съемка территории с целью проведения дистанционных исследований магнитной проницаемости, удельной электропроводности, плотности и радиоактивных свойств пород выполняется путем облета летательным аппаратом (ЛА) территории по траекториям, покрывающим исследуемый участок поверхности. Траекториями (маршрутами) являются параллельные линии, которые покрывают территорию съемки. К основным параметрам полета, влияющим на качество съемочных данных, можно отнести боковое отклонение ЛА от траектории, а также отклонение по высоте.

В случае использования пилотируемого ЛА к качеству ручного пилотирования предъявляются повышенные требования. В то же время полет с отслеживанием рельефа местности и при наличии ветровых возмущений представляет для пилота трудноразрешимую задачу.

В работе было предложено формировать в поле зрения пилота директорный индекс управления тягой для минимизации отклонения высоты и, если требуется, скорости от требуемой. Такой «помощник» пилота функционирует на основании приборных измерений координат ЛА и вычисляет количественные оценки рекомендуемых команд пилота, в отличие от его интуитивных, основанных на личном опыте. Решение поставленных задач достигается путем использования оригинального энергетического подхода к управлению полетом ЛА. Математическим оформлением подхода является уравнение баланса энергий в системе «ЛА — двигатель — внешняя среда». Это уравнение устанавливает количественные соотношения между источником энергии и всеми ее потребителями. В отличие от традиционных подходов, в энергетическом подходе управляемой переменной является полная энергия объекта. Для минимизации ошибки управления полной энергией может быть использована только тяга двигателя.

Для режима автоматического полета разработана структура энергетической системы. Для режима ручного пилотирования предлагается индцировать отклонения полной энергии от заданной в виде директорного индекса. Для обнуления отклонения пилот должен воздействием на сектор газа двигателя привести индекс к нулевой отметке.

Разработаны прототипы электронных индикаторов с подвижным индексом на экране командного пилотажного прибора.

Литература

1. *Г. М. Тригубович, С. О. Шевчук, Н. С. Косарев, В. Н. Никитин.* Комплексная технология навигационного и геодезического обеспечения аэроэлектромагнитных исследований. // Гироскопия и навигация. Том 25, № 1 (96), 2017. DOI 10.17285/0869-7035.2017.25.1.093-107.
2. *В. М. Керцман, Е.В. Мойланен, Ю. Г. Подмогов.* Возможности аэрогеофизики при поисках золоторудных месторождений различного типа. // Геофизика, № 4, 2019. – С. 52–59.
3. *В. Г. Пешехонов, О. А. Степанов и др.* Современные методы и средства измерения параметров гравитационного поля Земли. // СПб: изд-во ЦНИИ Электроприбор, 2017. – 390 с.
4. *Е. В. Каршаков.* Особенности алгоритмов управления летательным аппаратом при выполнении аэросъемки. // Проблемы управления, № 3, 2012. – С. 71–76.
5. *П. Ю. Жодзишский, В. А. Пухватов.* Повышение эффективности выполнения аэрогеофизических исследований // Геопрофи. №2, 2010. – С. 23–25.
6. *С. О. Шевчук, С. В. Барсуков.* Применение навигационного комплекса на основе программы routenav для аэрогеофизических работ. // Геопрофи. 2018, №2. – С. 40–43.
7. *Е. В. Мойланен, А. М. Гаракоев, Е. В. Каршаков.* Аэрогеофизическая съемка республики Руанды (26 000 км²) с помощью системы «ЭКВАТОР». // Материалы 10-й международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем». Том 2. Москва, ИПУ РАН, 2017. – С. 154–157.
8. *A. P. Kurdjukov, G. N. Nachinkina and A. M. Shevchenko.* Energy approach to flight control. // AIAA Conf. Navigation, Guidance & Control. AIAA Paper 98-4211. 543–553 (1998). <https://doi.org/10.2514/6.1998-4211>.

9. *Б. В. Павлов, А. М. Шевченко, Г. Н. Начинкина.* Алгоритмы формирования информационных посылок в кабине пилота. // Материалы 4-й Всероссийской мультиконференции по проблемам управления. Том 2, Таганрог, ТТИ ЮФУ, 2011. – С. 108–111.

10. *А. М. Шевченко.* Способ формирования командного индекса для управления тягой двигателя самолета устройство для его реализации. // Патент RU2509037. (10.03.2014 Бюл. №7).