

ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАВИГАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ СИТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОСАДОК САМОЛЁТОВ С ПОМОЩЬЮ ЦИФРОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Васильев В.В., Джуган Р.В., Манин А.П., Соколюк В.Л.

Современные цифровые оптические устройства обладают большими потенциальными возможностями измерения расстояний между изображениями различных объектов в плоскости изображения. Показано, как можно использовать это свойство для построения систем инструментальной посадки самолетов на ограниченную площадку в условиях сложного рельефа местности, затрудняющего использование (в следствии помеховых воздействий из-за переотражений радиосигналов) существующих радиотехнических систем инструментальной посадки самолетов.

Введение

Для организации систем инструментальной посадки самолетов на ограниченную площадку в условиях сложного рельефа местности, затрудняющего использование (в следствии помеховых воздействий из-за переотражений радиосигналов) существующих радиотехнических систем взлета-посадки предлагается использование современных цифровых оптических устройств. Для организации автоматизированных, а особенно автоматических систем взлета-посадки самолетов на базе современных цифровых оптических устройств требуется решение задачи повышения точности и надёжности получения информации о взаимной ориентации самолёта и элементов посадочной полосы.

В настоящее время для решения задач захода на посадку и посадки самолетов в аэропортах используется международная радиотехническая система инструментальной посадки самолетов (MLS), один из элементов которой (бортовая аппаратура микроволновой системы посадки), созданный отечественными предприятиями промышленности (MLS-85) предназначен для [1] решения задач захода на посадку, взлета и ухода на второй круг воздушного судна (ВС) при взаимодействии её с другими системами пилотажно-навигационного комплекса ВС в ручном или автоматическом режимах управления.

Бортовая аппаратура MLS-85 сертифицирована установленным порядком, удовлетворяет требованиям Приложения 10 ICAO, (том 1), НЛГС-3Д, ARINC-429, ARINC-727-1.

Сертифицирующей организацией определено, что для решения задач по назначению в ручном или автоматическом режимах управления ВС бортовая аппаратура MLS-85 должна обладать техническими характеристиками, обеспечивающими погрешность измерения (2σ):

азимута $\leq \pm 0,017$ град

угла места $\leq \pm 0,017$ град

Очевидно, что для решения задач по назначению в ручном или автоматическом режимах управления ВС в системах инструментальной посадки самолетов на базе современных цифровых оптических устройств должны достигаться указанные выше характеристики точности измерений.

Одним из путей решения задачи построения указанной системы инструментальной посадки самолетов является использование современных цифровых оптических средств наблюдения видимого и инфракрасного диапазонов. Эти средства обладают важными свойствами: высокой разрешающей способностью и точностью измерений, а также возможностью получать измерительную информацию в реальном темпе времени. Самолёт или элементы посадочной полосы, находящиеся поле зрения объектива, с высокой точностью фиксируются в видимой плоскости изображения относительно фокальной точки (оптической оси) и относительно друг друга. Это обстоятельство можно использовать для определения параметров относительной ориентации самолёта и характерных элементов посадочной полосы.

Возможны два способа применения цифровых оптических устройств в системах посадки. Первый способ предполагает установку светящихся (в видимом и инфракрасном диапазонах) источников некогерентного излучения на посадочной полосе, цифровое оптическое устройство устанавливается на борту самолёта. Во втором способе источник излучения устанавливается на борту самолёта (например, прожектор), а на посадочной полосе устанавливаются не менее двух оптических устройств. В соответствии с этим рассмотрим состав определяемых навигационных параметров и их точностные характеристики.

Установка оптического цифрового устройства на борту самолёта

Оптическое устройство представляет собой цифровой объектив или совокупность объективов, ориентированных по курсу полёта так, чтобы фокальная плоскость одного из объективов была ортогональна курсовому направлению, а направление других объективов расширяло возможности системы.

На посадочной полосе устанавливаются следующие источники излучения: два по бокам осевой линии посадочной полосы на расстоянии, например, 50 м от осевой линии, третий – на осевой линии на расстоянии, например, $D=200$ м от пересечения линии между двумя боковыми и осевой линией, четвёртый, устанавливается на вышке над первым или вторым источниками. Между источниками расстояние измерено с требуемой точностью.

Такое расположение источников позволяет определять угловые отклонения самолёта в горизонтальной и вертикальной плоскостях от номинальной глиссады.

На цифровой матрице фотоприёмного прибора оптического устройства отображаются изображения источников излучения. Цифровая матрица позволяет построить прямоугольную систему координат с сеткой горизонтальных и вертикальных линий. Изображение источника излучения на цифровой матрице оценивается в виде точки p с координатами X по горизонтали и Y по вертикали $p(X, Y)$. Координаты точки отыскиваются как геометрический или энергетический центр фигуры изображения источника на матрице. Снимая координаты изображения левого $p_1(X, Y)$, правого $p_2(X, Y)$ и удалённого $p_3(X, Y)$ источников, можно выразить отклонение курса самолёта в горизонтальной плоскости следующим образом

$$\Delta\alpha = \arctg \left[\frac{[(X_3 - X_1) - (X_2 - X_3)]R}{fD} \right],$$

или при малых углах $\Delta\alpha = \left[\frac{[(X_3 - X_1) - (X_2 - X_3)]R}{fD} \right].$

где f – фокусное расстояние объектива;

R – расстояние до самолёта.

Удерживая самолёт так, чтобы $(X_3 - X_1) = (X_2 - X_3)$, движение будет совершаться по курсу с погрешностью, зависящей от фокусного расстояния объектива f , размеров пикселя ПЗС матрицы p , и расстояния между самолётом и посадочной площадкой R .

Если применить объектив с фокусным расстоянием $f=500$ мм и ПЗС матрицу с размером пикселя $p=0,0055$ мм, то потенциальные погрешности отклонения от курса составят:

при 10000 м – 1 угловых минуты;

при $R=5000$ м – 0,5 угловая минута;

при $R=1000$ м – 6 угловых сек;

при $R=500$ м – 3 угловых секунды.

Потенциальная погрешность угла места составляет $\sigma_\beta = 1,41\sigma_\alpha$.

Реальная точность зависит от множества других факторов и хуже примерно в два раза.

Установка оптических цифровых оптических устройств на посадочной площадке

На посадочной площадке устанавливаются два теодолита по бокам осевой линии на расстоянии, например, 50 м от неё с погрешностью, не превышающей 1 см. На борту самолёта устанавливается источник света (малогабаритный прожектор).

Оптические каналы теодолитов выставляются по опорным направлениям так, чтобы пересечение оптических осей находилось на гласседе в некоторой характерной точке. Событие посадки самолёта полностью отображается на светочувствительной матрице (ПЗС матрице). Измеряются отклонения изображения источника излучения от опорного направления (от фокальной точки на матрице)

Измерения привязываются к сетке единого времени не хуже 10^{-5} . Результаты измерения поступают в реальном темпе времени в устройство обработки данных. По результатам измерений вычисляются координаты самолёта в местной системе координат и значения азимута и угла места самолёта относительно условной точки на осевой линии, к которой привязана система координат. С выхода устройства данные в реальном времени поступают на диспетчерскую службу.

Решение задачи оценки координат основывается на методике, изложенной в [2]. Алгоритм преобразования лёг в основу разработки ПМО цифровой оптической системы обеспечения безопасности и оценки качества проведения артиллерийских стрельб «Конгломерат» [3].

Здесь для наглядности приведём окончательный вид алгоритма преобразования данных ПЗС матриц в оценку приращения вектора параметров движения БЛА. Это типовой алгоритм обработки методом наименьших квадратов.

$$\begin{bmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{bmatrix} = [\Phi^T N^{-1} \Phi]^{-1} \Phi^T N^{-1} [\Phi_1 G + M \lambda],$$

где λ – матрица-столбец, элементами которого являются измерения координат изображения БЛА на ПЗС матрицах двух теодолитов;

G – матрица-столбец координат установки теодолитов на площадке;

$$\lambda = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ x_2 \\ y_2 \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 50 \\ 0 \\ 0 \\ -50 \end{bmatrix},$$

M – матрица масштабных коэффициентов $k_j = R_j/F_j$,

$$M = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_2 \end{bmatrix},$$

F^j – фокусное расстояние j –того теодолита;

R^j – расстояние между j –тым теодолитом и БЛА; (расстояние находится на первом цикле решения задачи оценки координат);

N – корреляционная матрица погрешностей измерений;

Φ и Φ_1 – составные матрицы пространственных преобразований, элементами которой являются матрицы поворота по азимуту

$$A^j = \begin{bmatrix} \cos \alpha^j & 0 & \sin \alpha^j \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha^j & 0 & \cos \alpha^j \end{bmatrix}$$

и углу места

$$B^j = \begin{bmatrix} \cos \beta^j & \sin \beta^j & 0 \\ -\sin \beta^j & \cos \beta^j & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Системное представление алгоритма преобразования данных ПЗС матриц теодолитов в оценки приращения координат приведено на рис.1.

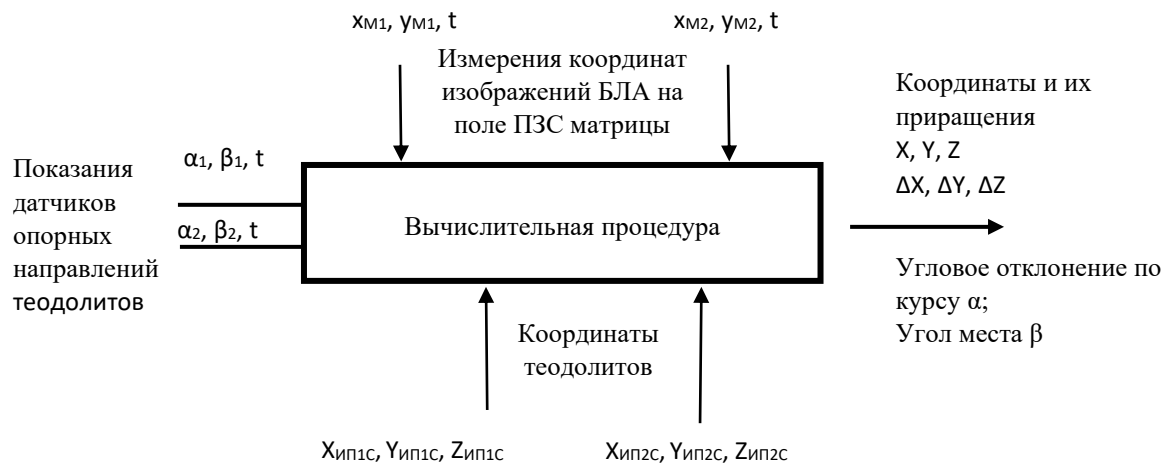


Рис.1. Системное представление алгоритма вычисления приращения координат

Особенность алгоритма состоит в том, что он непосредственно преобразует отклонения x и y от центра ПЗС матрицы в приращения координат центральной системы координат. Точность преобразования высока, так как определяется только свойствами матриц высокого разрешения, в отличие от определения абсолютных значений координат, на точность которого влияет большое количество неблагоприятных факторов. Приращение координат используется для вычисления отклонения самолёта по курсу и вычисления угла места. Задача решается в реальном темпе времени.

Если применить объектив и ПЗС матрицу с указанными выше параметрами, то потенциальные погрешности отклонения составят:

- при 10000 м – по курсу 4 угловых секунды, по углу места – 42 угловых секунд;
- при $R=5000$ м – по курсу 4 угловых секунды, по углу места – 30 угловых секунд;
- при $R=1000$ м – по курсу 4 угловых секунды, по углу места – 22 угловых секунд;
- при $R=500$ м – по курсу 4 угловых секунды, по углу места – 8 угловых секунд.

Такое построение системы обеспечивает наибольшую точность, но возникает проблема передачи данных на борт самолёта.

Отметим, что здесь приведены потенциальные возможности определения угловых координат. Реальные точности будут хуже. Но практика показала, что применение относительных измерений существенно снижает общие систематические погрешности измерительных каналов и в результате обеспечивается требуемая точность [3].

Используя методику определения векторов скорости и ускорения путём обработки измерений на частных «скользящих» интервалах по методу наименьших квадратов [2], можно получать в реальном масштабе времени составляющие векторов скорости и ускорений.

Заключение

Современные оптические цифровые устройства обладают большими потенциальными возможностями в высокоточном измерении пространственного

положения объекта наблюдения, высокой частоты видеорегистрации, съёма передачи и обработки информации в реальном времени. Особенно высокая точность измерения навигационных параметров обеспечивается в режиме измерения разностных величин, связанных с отклонением от опорных направлений, в частности, от номинального курса. Это обуславливает возможность их применение для обеспечения надёжности посадки самолёта на ограниченные посадочные полосы в двух вариантах: прямом использовании оптического устройства на борту самолёта и построении оптического комплекса на посадочной площадке с системой передачи данных на борт самолёта.

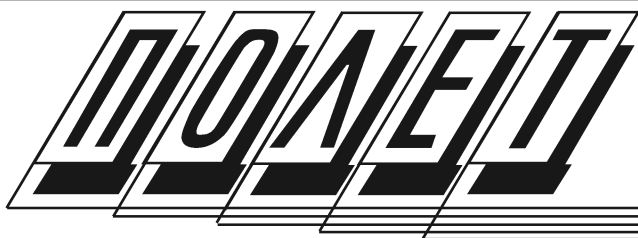
Первый вариант обладает меньшей точностью, но удобнее в применении. Второй вариант обладает наибольшей точностью и надёжностью получения информации, но требует организации канала передачи данных на борт. Важным аспектом применения цифровых оптических средств для повышения надёжности посадки самолётов на ограниченные площадки является соответствующее математическое и программное обеспечение, которое учитывает свойства цифровых матриц и использует операторы пространственных преобразований для получения высокоточных оценок навигационных параметров.

Литература

1. АО «ВНИИРА-Навигатор». Описание выпускаемой продукции. Технические характеристики. Сайт - navigat.ru, 2017 г.

2. Булычев Ю.Г., Васильев В.В., Джуган Р.В., Манин А.П. и др. Информационно-измерительное обеспечение натуральных испытаний сложных технических комплексов (под ред. Манина А.П. и Васильева В.В.). М. «Машиностроение-Полёт», 2016 г., 440 с.

3. Васильев В.В., Манин А.П., Челахов Д.М. Построение оптических систем обеспечения безопасности полётов, контроля параметров движения и ориентации летательных аппаратов в пространстве. Общероссийский научно-технический журнал «Полёт», 2013 г., № 9, с. 3-10.



АВИАЦИЯ ♦ РАКЕТНАЯ ТЕХНИКА ♦ КОСМОНАВТИКА

Орган Российской академии космонавтики имени К.Э. Циолковского
и Академии наук авиации и воздухоплавания

Журнал выходит ежемесячно
Выпускается с августа 1998 г.

Г.В. НОВОЖИЛОВ – Главный редактор,
академик РАН

Члены
редакционной
коллегии

А.А. АЛЕКСАНДРОВ,
д.т.н., проф.

А.П. АЛЕКСАНДРОВ,
к.т.н., летчик-космонавт

Б.С. АЛЕШИН,
академик РАН

Б.В. БАЛЬМОНТ,
академик РАКЦ

В.Г. ДМИТРИЕВ,
чл.-кор. РАН

Б.И. КАТОРГИН,
академик РАН, проф.

А.А. ЛЕОНОВ,
к.т.н., летчик-космонавт

А.М. МАТВЕЕНКО,
академик РАН, проф.

С.В. МИХЕЕВ,
академик РАН

Н.Ф. МОИСЕЕВ, к.т.н.

М.А. ПОГОСЯН,
академик РАН, проф.

И.Б. ФЕДОРОВ,
академик РАН

Е.А. ФЕДОСОВ,
академик РАН, проф.

В.В. ХАРТОВ,
д.т.н., проф.

С.Л. ЧЕРНЫШЕВ,
академик РАН, проф.

Редактор-организатор
О.С. РОДЗЕВИЧ

Ответственный секретарь
О.Г. КРАСИЛЬНИКОВА

Редакционный совет

А.М. МАТВЕЕНКО,
председатель редсовета,
академик РАН, проф.

О.М. АЛИФАНОВ,
чл.-кор. РАН, проф.

И.В. БАРМИН,
чл.-кор. РАН, проф.

В.Е. БАРСУК, д.т.н.

В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ,
д.т.н., проф.

О.Ф. ДЕМЧЕНКО, к.э.н.

Н.Н. ДОЛЖЕНКОВ, д.т.н.

С.Ю. ЖЕЛТОВ,
академик РАН

Л.М. ЗЕЛЕНЬИЙ,
академик РАН, проф.

А.Н. КИРИЛИН, д.т.н.

В.А. КОМАРОВ, д.т.н.

А.А. КОРОТЕЕВ,
академик РАН

В.П. ЛОСИЦКИЙ, инж.

Л.Н. ЛЫСЕНКО,
д.т.н., проф.

А.П. МАНИН, д.т.н.

К.М. ПИЧХАДЗЕ,
д.т.н., проф.

С.С. ПОЗДНЯКОВ, инж.

В.Г. СВЕТЛОВ, д.т.н.

А.Н. СЕРЬЕЗНОВ, д.т.н.

В.П. СОКОЛОВ,
д.т.н., проф.

В.А. СОЛОВЬЕВ,
чл.-кор. РАН, проф.,
летчик-космонавт

В.В. ШАЛАЙ,
д.т.н., проф.

В.А. ШАТАЛОВ,
летчик-космонавт

СОДЕРЖАНИЕ

Новожилов Г.В., Богомолов А.С., Иващенко В.А., Кушников В.А., Неймарк М.С., Резчиков А.Ф., Салина Е.А., Филимонюк Л.Ю., Цесарский Л.Г., Шоломов И.И., Шоломов К.И. Моделирование аварий в авиационных транспортных системах с учетом человеческого фактора в целях их предотвращения 3

Калери А.Ю., Марков А.В., Нечаев И.С., Соловьев В.А., Сорокин И.В. Роль экипажа в повышении эффективности научных исследований на российском сегменте МКС 11

Балык О.А. Безопасность полета самолета на режимах сверхманевренности 20

Васильев В.В., Джуган Р.В., Манин А.П., Соколюк В.Л. Возможности повышения точности определения навигационных параметров систем обеспечения посадок самолетов с помощью цифровых оптических средств 26

Дивеев А.И., Конырбаев Н.Б. Численный метод вариационного аналитического программирования для структурно-параметрического синтеза системы управления 31

Бирюков А.С., Деменко О.Г., Михаленков Н.А. Физическое моделирование ударного нагружения элементов космических аппаратов 38

Ерохина А.А., Ерохин П.В., Артамонова Л.Г. Исследование влияния дополнительного органа управления (щитка) на аэродинамические характеристики профиля крыла с закрылком 48

Матвеев А.М., Зотов А.А., Пашков О.А., Кузнецов А.В. Математическое моделирование спускаемого аппарата самолетного типа 54

Левин Д.Н. Интегральная эргономическая оценка кабины экипажа перспективного самолета 60

Гальперин Д.М. Вклад ОКБ-16 П.Ф. Зубца в надежность ракеты П.Д. Грушина для зенитных ракетных систем С-300П и С-300Ф 66

Журнал входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней.

Мнение редакции не всегда совпадает с точкой зрения авторов статей. За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель. Плата с аспирантов за публикацию статей не взимается. Аннотации статей журнала и требования к оформлению предоставляемых авторами рукописей приведены на сайте <http://ros-polet.ru>

Учредитель и издатель
ООО «Машиностроение–Полет»

© ООО «Машиностроение–Полет», 2017

Адрес редакции: 107076, РФ, г. Москва, Стромынский пер., 4

Телефон: 8 (499) 269-54-97; +7-926-916-03-58

Адрес электронной почты: rosपोlet@mail.ru

Адрес в интернете: <http://ros-polet.ru>