

В. Н. К а з ь м и н, В. П. Н о с к о в

**ОБЪЕМНОЕ ЗРЕНИЕ В СИСТЕМЕ
НАВИГАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА**

Рассмотрена актуальная задача обеспечения автономного полета беспилотного летательного аппарата в неизвестном заранее пространстве в условиях плотной городской застройки или внутри зданий. Проанализирована специфика его использования, сформулированы требования к летательному аппарату, к его системам управления, навигации и сбора разведывательной информации, определены их облик и конструктивные решения. Предложен подход к решению навигационной задачи с использованием данных объемного зрения.

E-mail: noskov_mstu@mail.ru; slvk@list.ru

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, решение навигационной задачи, объемное зрение, система автоматического управления.

В настоящее время быстрое развитие и широкое применение получают различные беспилотные летательные аппараты (БПЛА) военного, специального (МЧС, МВД, ФСБ) и гражданского назначения. Такие аппараты могут иметь системы дистанционного, автономного управления или их комбинацию и оснащаются бортовыми датчиками угловых положений и линейных перемещений, а некоторые средние и тяжелые БПЛА – полными навигационными системами. Наибольшее распространение получили БПЛА для разведки и мониторинга районов будущих боевых действий, охраняемых территорий и объектов. Практически все разведывательные БПЛА поставляют на пульт управления разведданные по радиоканалу или по возвращении в виде фото или видеoinформации, полученной вдоль траектории полета.

В военных конфликтах большая доля боевых действий проходит в городских условиях (в том числе и – зданиях) и по оценкам экспертов [1] наблюдается устойчивая тенденция ее роста. Специальные операции ФСБ, МВД (контртеррористические операции) и МЧС (ликвидация последствий аварий, катастроф и пожаров) также в основном проводятся в городских условиях и зданиях (кинотеатрах, вокзалах и аэропортах, энергоблоках атомных станций, промышленных зонах). При проведении таких операций, в первую очередь, необходима разведка, оперативное проведение которой могут обеспечить БПЛА. Рассмотрим специфику использования БПЛА в данных условиях и сформулируем соответствующие требования к летательному аппарату, к его системам управления, навигации и сбора разведывательной информации и определим их облик и конструктивные решения.

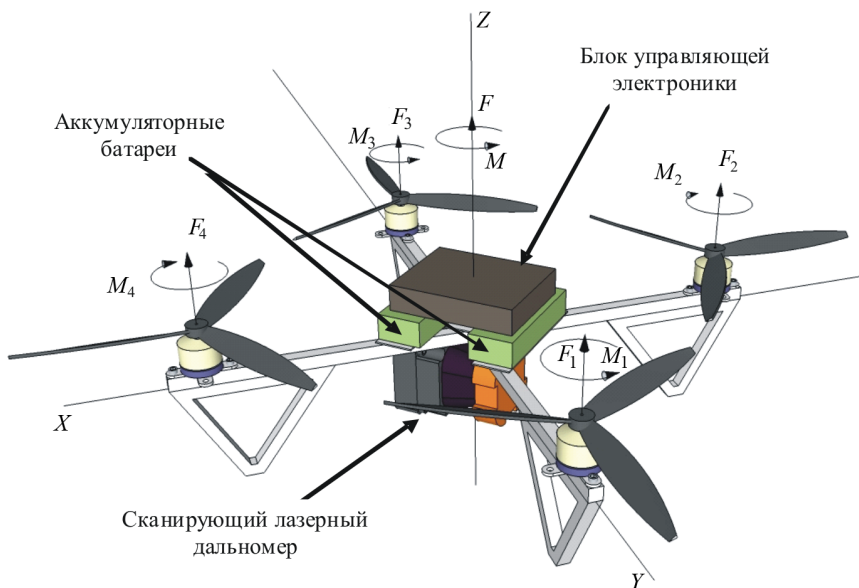


Рис. 1. Конструкция и принцип управления летательного аппарата

В условиях плотной городской застройки, а тем более внутри зданий не требуется высокой скорости полета, но необходимы повышенная маневренность и малые габаритные размеры. Наиболее подходящей в данном случае является конструкция вертолетного типа с четырьмя электродвигателями с воздушными винтами на выходном валу, симметрично расположенными по краям рамы (рис. 1). Такая компоновка совмещает компактность конструкции с высокой управляемостью и маневренностью.

В соответствие с рис. 1, вращающие моменты и силы, создаваемые воздушными винтами, определяются по формулам

$$\begin{aligned}
 M_x &= aL(n_1^2 - n_3^2); \\
 M_y &= aL(n_2^2 - n_4^2); \\
 M_z &= b[(n_1^2 + n_3^2) - (n_2^2 + n_4^2)]; \\
 F &= a(n_1^2 + n_2^2 + n_3^2 + n_4^2),
 \end{aligned}$$

где n_i — частота вращения вала i -го электродвигателя; a, b — коэффициенты, зависящие от характеристик воздушного винта; L — расстояние между осью Z и осью вала электродвигателя; F — подъемная сила; M_x, M_y, M_z — вращающие моменты вокруг трех основных осей.

Как следует из выражений, изменяя частоту вращения воздушных винтов, можно задавать вращающие моменты вокруг трех осей и подъемную силу. Следует также отметить, что уравнения динамики аппарата содержат только четыре независимых уравнения. Физически это

проявляется в том, что изменение положения по координатам X и Y связано с углом наклона относительно местной вертикали — поворот вокруг оси X вызывает смещение вдоль оси Y , а поворот вокруг оси Y — смещение вдоль оси X .

Построению систем управления БПЛА, в том числе вертолетного типа, посвящено большое число работ. В частности, в работе [2] рассмотрены особенности построения бортовых систем беспилотного вертолета в режиме маловысотного полета. В работе [2] предложена математическая модель динамики управляемого движения вертолета и функциональная схема интегрированной бортовой системы, включающая БИНС, GPS-приемник, радиобаровысотомер и корреляционно-экстремальные средства навигации, обрабатывающие данные РЛС или лазерного лоатора. Некоторые результаты, описанные в работе [2], могут быть использованы, например, в части непосредственного управления БПЛА. В части же тактического уровня управления в рассматриваемых условиях полета (не работает спутниковая навигация) из-за массогабаритных ограничений (невозможно использовать полнофункциональную БИНС и другие системы, например РЛС) возникают существенные проблемы с решением навигационной задачи.

В настоящем исследовании данные проблемы предлагается решить с помощью системы объемного технического зрения.

Для обеспечения управления аппарат должен иметь датчики угловых положений по всем трем основным осям. С учетом массогабаритных ограничений целесообразно использовать малогабаритные твердотельные акселерометр и трехосный гироскоп. Акселерометр позволит измерять абсолютные значения углов крена и дифферента, а гироскоп — относительные значения углов крена, дифферента и курса вследствие ухода нуля и ошибки интегрирования угловых скоростей.

Система верхнего уровня управления БПЛА должна иметь возможность работать в дистанционном режиме — в зоне прямой видимости или уверенного радиообмена (например, на участках взлета-посадки) и полностью в автономном режиме — на участках полета при отсутствии радиообмена, что характерно для районов с плотной застройкой, промышленных зон и внутри зданий. Если принципы создания и работы системы дистанционного управления известны и не требуют пояснений, то система автономного управления полетом в рассматриваемых условиях существенно отличается от традиционных и требует более подробного рассмотрения. Традиционные системы автопилотирования в своей основе содержат ряд следящих контуров (курса, скорости, высоты, крена, дифферента, широты и долготы места) с обратной связью от навигационной системы, согласованная работа которых обеспечивает автоматическую отработку маршрутного задания по заранее известной системе управления траектории полета. В нашем же

случае траектория полета известна приблизительно, точно известны точки старта и посадки, а также последовательность промежуточных точек (или их окрестности) обязательного посещения, траектория между которыми должна строиться и корректироваться в процессе полета по данным бортовых устройств с учетом конфигурации окружающего пространства, координат текущего положения и целевой на данный момент промежуточной точки. Таким образом, бортовая система автономного управления должна содержать средства формирования трехмерной объемной модели окружающего пространства, состоящей из подмножества запрещенных для полета положений БПЛА, соответствующих препятствиям, подмножества разрешенных для полета положений, соответствующих свободному от препятствий пространству, и двух положений, принадлежащих подмножеству разрешенных положений и соответствующих текущему и целевому положениям БПЛА. Такая модель позволяет на подмножестве разрешенных положений между текущим и целевым положениями находить безопасную траекторию [3], которая затем может быть отработана традиционным автопилотом. Для формирования трехмерной модели окружающего пространства БПЛА, так же как и для наземных мобильных транспортных роботов, в качестве системы технического зрения (СТЗ) можно использовать 3D лазерный сенсор [4], но со сферической или близкой к сферической форме зоной обзора.

В настоящее время существующие 3D лазерные сенсоры имеют малые углы обзора, неприемлемые для нашего случая массогабаритные характеристики и малодоступны. Трехмерный лазерный сенсор можно также получить из 2D лазерного сенсора, закрепив его на управляемом поворотном устройстве (сканаторе), что также приводит к неприемлемым массогабаритным характеристикам. Приемлемым решением является жесткое закрепление малогабаритного 2D лазерного сенсора на аппарате так, чтобы плоскость сканирования была вертикальна, а получение дополнительной степени сканирования осуществлять за счет управляемого вращения аппарата вокруг вертикальной оси. Например, 2D лазерный сенсор UTM-30LX, имеющий сектор сканирования 270° , можно разместить так, что конструкции аппарата будут находиться в “мертвой” зоне, а зона обзора при вращении аппарата будет соответствовать сфере без верхнего конуса с телесным углом 90° (рис. 2), что вполне достаточно для формирования трехмерной модели полетного пространства.

Для нахождения траектории в разрешенном для полета пространстве необходимо знать текущее положение БПЛА (целевые положения заданы и известны). Как уже отмечалось ранее, угловые положения аппарата определяются блоком инерциальных датчиков, которые позволяют измерить абсолютные крен и дифферент и относительный

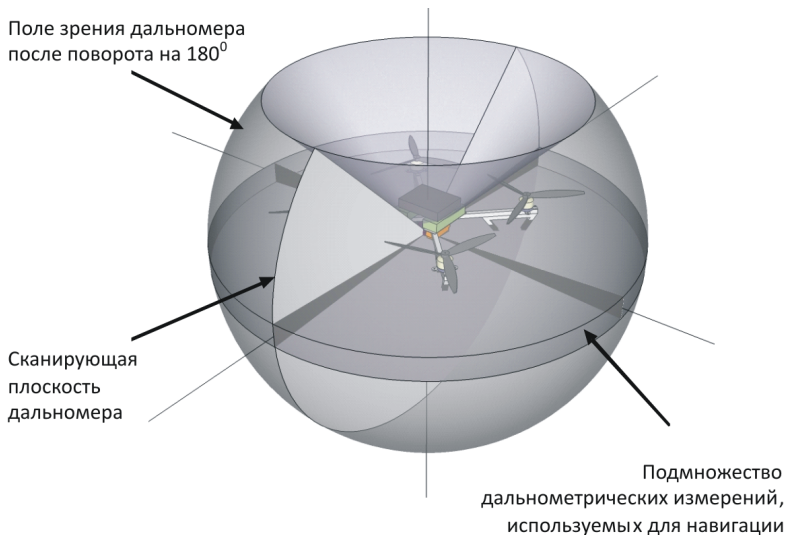


Рис. 2. Формирование объемного дальнометрического изображения за счет вращения аппарата

курс. Наибольшую проблему для сверхлегкого БПЛА представляют бортовые средства определения абсолютного курса и линейных перемещений, так как спутниковые навигационные системы и магнитометры не работают в экранированном пространстве, а малогабаритных полных инерциальных навигационных систем необходимой точности не существует. Перспективным для решения данной проблемы является использование дальнометрической СТЗ. При этом высота полета может быть измерена непосредственно, а две горизонтальные координаты и курс — определены методами экстремальной навигации [5] по последовательности горизонтальных сечений дальнометрических изображений внешней среды, получаемых в процессе полета (см. рис. 2). Поскольку крен и дифферент известны, то подмножество измерений, соответствующее горизонтальному сечению дальнометрического изображения, легко определяется и при отклонении вертикальной оси аппарата от местной вертикали. Для достоверного определения искоемых координат методами экстремальной навигации любые два соседних сечения рассматриваемой последовательности должны иметь:

- непустое пересечение (достигается необходимой частотой формирования дальнометрических изображений);
- достаточную подробность (обеспечивается необходимой скоростью вращения аппарата вокруг вертикальной оси) и точность измерений (обеспечивается характеристиками лазерного дальномера и датчика курса);
- конфигурацию, обеспечивающую надежную работу алгоритмов экстремальной навигации (как правило, конфигурация городской среды и помещений удовлетворяет данному требованию).

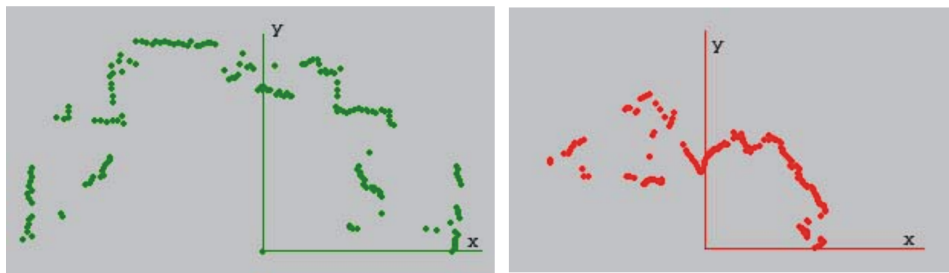


Рис. 3. Последовательность из двух горизонтальных сечений

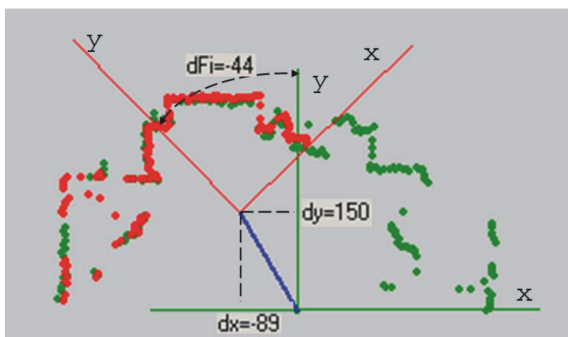


Рис. 4. Результат совмещения двух горизонтальных сечений

На рис. 3 приведены горизонтальные сечения двух дальнометрических изображений реального помещения (цеха), полученных из разных точек пространства. Разность искоемых линейных координат и курса между этими точками определяется совмещением соответствующих двух горизонтальных сечений по области их пересечения (рис. 4) и соответствует глобальному максимуму корреляционной функции или минимуму функции разности дальнометрических изображений [6].

Как следует из рис. 5, функция разности дальнометрических изображений в точке решения имеет выраженный минимум, который может быть найден с высокой точностью, зависящей не только от конфигурации анализируемого сечения, но и от точности измерения дальности и углов сканирования.

Зависимость ошибки вычисления приращения координат описанным методом от ошибки измерения дальности в дальнометрическом изображении приведена на рис. 6 (зависимость от ошибки измерения углов сканирования аналогична).

В соответствии с паспортными данными существующих в настоящее время сканирующих лазерных дальномеров ошибка измерения дальности составляет не более 3... 5 см, поэтому ошибка вычисления приращения координат на одном цикле, как это следует из рис. 6, составит по линейным координатам не более 0,5 см, а по курсу — не более $0,2^\circ$. Максимальная дальность современных сканирующих

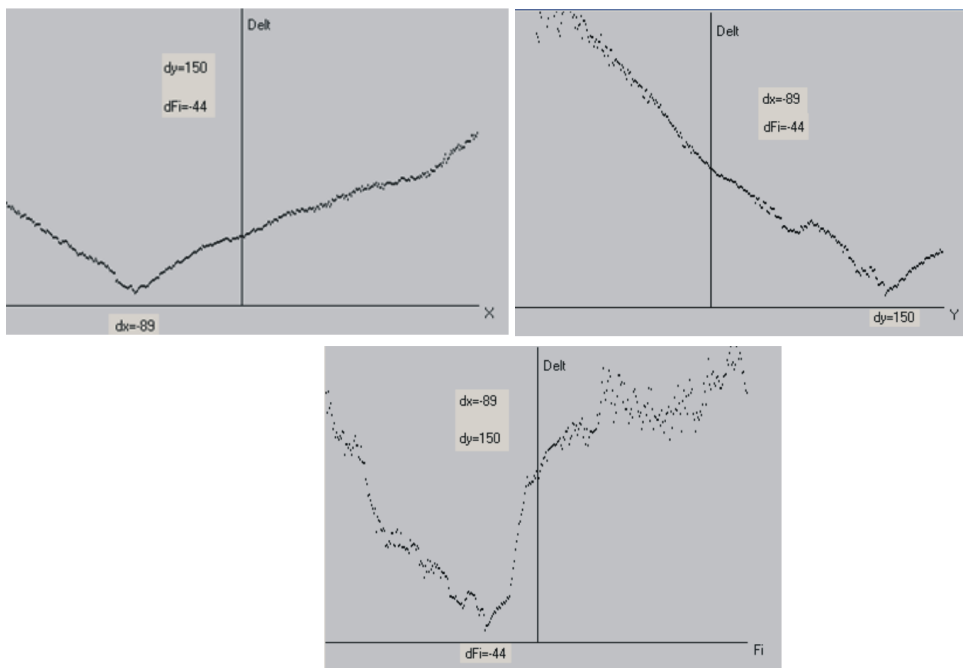


Рис. 5. Ортогональные сечения функции разности дальнометрических изображений в точке решения

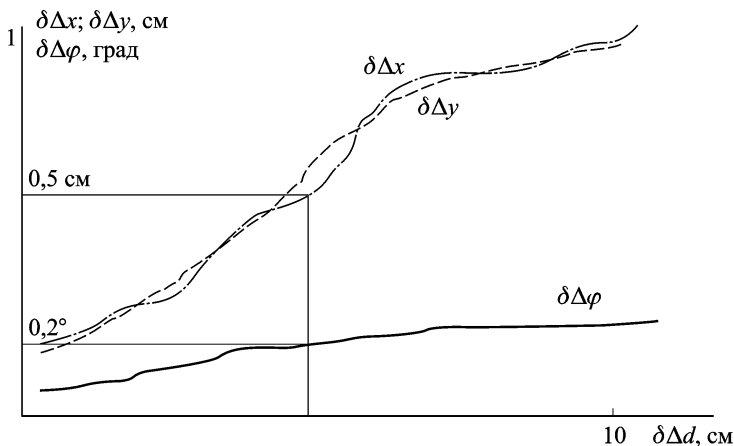


Рис. 6. Зависимость ошибки вычисления приращения координат от ошибки измерения дальности

лазерных дальномеров составляет 100 м, а эффективная (в рассматриваемых условиях их использования) — 10... 20 м, поэтому можно приближенно принять, что на каждые 15 м полета необходимо выполнить цикл определения координат. Тогда на 150 м автономного полета необходимо выполнить 10 циклов и верхняя границы суммарной ошибки определения координат составит 5 см по линейным координатам и 2° по курсу, что позволяет сделать вывод о возможности использования

рассмотренного метода не только для навигационного обеспечения автономного полета, но и для объемного дальнометрического картографирования окружающего пространства [6]. Последнее обстоятельство существенно повышает живучесть БПЛА вследствие возможности построения объединенной объемной модели с размерами, на порядок превышающими размеры зоны одного обзора, что обеспечивает автономный выход (вылет) из тупиков и лабиринтов соответствующего размера.

Рассмотренные принципы построения и работы основных подсистем полностью автономного БПЛА позволяют предложить структурную схему системы управления (рис. 7) и вариант ее реализации в виде функциональной схемы (рис. 8).

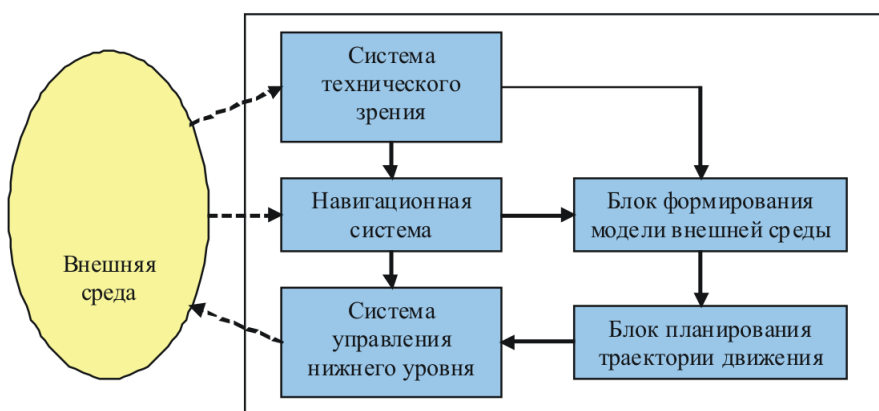


Рис. 7. Структурная схема системы управления БПЛА

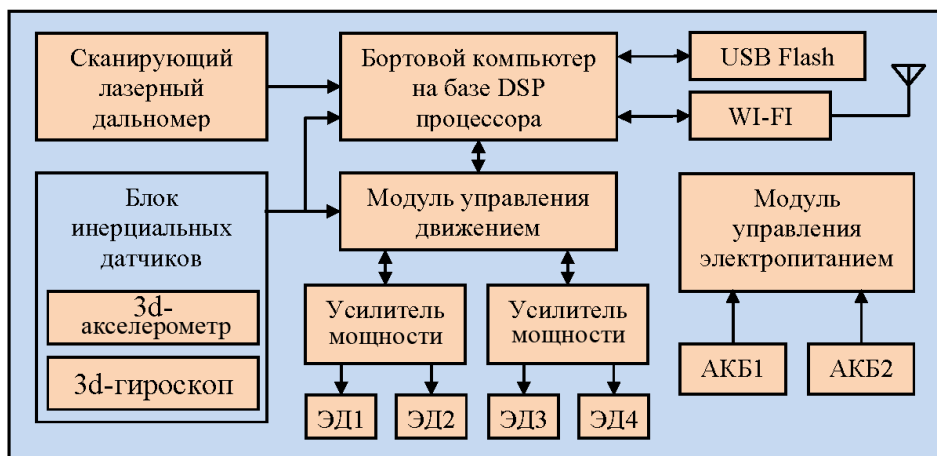


Рис. 8. Функциональная схема системы управления БПЛА

В заключение можно отметить, что предложенный вариант объемного дальнометрического зрения позволяет не только обеспечить полностью автономный полет в неизвестном заранее пространстве, но сформировать его подробную объемную модель. Кроме того, наличие при этом синхронной видеосъемки позволяет после возвращения БПЛА в стационарных условиях с помощью имеющегося уже в настоящее время прикладного программного обеспечения [7] построить объемные визуально подобные модели разведанного пространства и обеспечить тем самым оперативное и эффективное планирование боевых действий или других спецопераций в экстремальных условиях [1].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Б о й в городе. Боевые и обеспечивающие роботы в условиях урбанизированной территории / В.С. Лапшов, В.П. Носков, И.В. Рубцов и др. // Изв. ЮФУ. Технич. науки. – Таганрог: Изд-во ТИ ЮФУ. – 2011. – № 3. – С. 142–146.
2. С о в р е м е н н ы е информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов / К.К. Веремеенко, С.Ю. Желтов, Н.В. Ким и др.; Под ред. М.Н. Красильщикова, Г.Г. Себрякова. – М.: Физматлит, 2009. – 556 с.
3. К а л я е в А. В., Н о с к о в В. П., Ч е р н у х и н Ю. В., К а л я е в И. А. Однородные управляющие структуры адаптивных роботов. – М.: Наука, 1990. – 147 с.
4. К у з и н Ю. Р., Н о с к о в А. В., Н о с к о в В. П. Разработка и исследование СТЗ для обеспечения автономного движения // Науч.-техн. сб. Оборонная техника. – М.: НТЦ “Информтехника”. 2001. – С. 34–39.
5. Н о с к о в В. П., Н о с к о в А. В. Навигация мобильных роботов по дальнометрическим изображениям // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2005. – № 12. – С. 16–21.
6. Н о с к о в В. П., Р у б ц о в И. В., Р о м а н о в А. Ю. Формирование объединенной модели внешней среды на основе информации видеокамеры и дальномера // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2007. – № 8. – С. 2–5.

Статья поступила в редакцию 23.03.2012