

компонентов: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М. 2011. 20 с.

11. Яранцев Н.В. Сотовая структура построения экологически безопасного производства в радиоэлектронике // Научные технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: материалы Всероссийской научно-технической конференции. М., 2009. Т. 1. С. 258-259.

12. Коржавый А.П., Капустин В.И., Козьмин Г.В. Методы экспериментальной физики в избранных технологиях защиты природы и человека. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. 352 с.

13. Пономарев В.А., Яранцев Н.В. Порошковые композиционные материалы для изделий электронной техники: Научное издание. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. 304 с.

## Использование телевизионных измерительных систем управляющего типа на микролифтовых БПЛА



**А.Ю. Матвеев**

аспирант МГТУ  
МИРЭА

Как отмечено в работах [1–4], увеличение продолжительности полетов беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) может быть достигнуто за счет использования энергии микролифтов (автоструктур), образующихся на малых высотах в атмосферном пограничном слое (АПС). В этом случае на БПЛА поиск микролифтов должен быть автоматизирован. Данная задача может быть решена с помощью телевизионной измерительной системы (ТИС), используемой в качестве телевизионного датчика (ТВД) – тепловизионный приемник (ТВП), точность измерения температуры которого такова, что позволяет обнаружить микролифтовые потоки [1].

В настоящее время телевизионная техника развивается по двум основным направлениям [5–7]. Одно из них – вещательное телевидение, второе получило название **прикладного телевидения**. В свою очередь системы прикладного телевидения по назначению и принципу делятся на две основные группы. К первой группе относятся **обзорно-поисковые** или **информационные системы**. Они предназначены для наблюдения за общей обстановкой внутри заданного пространства, ограни-

ченного полем зрения объектива, визуального или автоматического поиска, обнаружения и опознавания интересующих оператора объектов. Типичным примером такого рода систем являются ТВ-камеры, работающие в видимом и ИК-диапазонах длин волн, устанавливаемые на БПЛА. Ко **второй группе относятся ТИС, служащие для контроля и измерения отдельных параметров объекта**. При этом в автоматическом режиме решается задача обнаружения и распознавания объекта с целью дальнейшего измерения его параметров.

Основное назначение измерительного телевидения – извлечение количественной информации об объектах, находящихся в поле зрения ТВД, с целью ее использования для решения конкретных задач контроля и управления. В нашем случае решается задача обнаружения микролифтов, расстояния и положения их относительно БПЛА для последующего сближения летательного аппарата (ЛА) с микролифтом и использования его энергии для компенсации потерь высоты. Для этого ТИС на основании информации, полученной о микролифте, выдает соответствующие команды на органы управления БПЛА, т.е., наряду с автопилотом, принимает участие в управлении ЛА, корректируя его траекторию движения.

ТИС делятся на автоматизированные (или полуавтоматические), в которых для работы системы **необходимо присутствие оператора** (например, **пилота в случае микролифтовых планеров**), и **полностью автоматические**, которые функционируют без участия оператора (БПЛА).

Обычно ТИС характеризуется рядом параметров и характеристик.

*Точностные параметры и характеристики* (характеристики измерения, обнаружения, распознавания). В случае измерительных систем



речь идет о предельных погрешностях измерения, о стабильности метрологических параметров и т.п. Если ТИС решает еще задачу **предварительного обнаружения** объекта, указывают **допустимую вероятность его обнаружения** или вероятность пропуска при условии его обнаружения в зоне наблюдения.

**Функциональные параметры.** Число и вид измеряемых величин (или объектов наблюдения), диапазон измеряемых величин, время измерения (обнаружения или распознавания объектов), готовность к работе после включения и др.

ТИС можно разделить на три основных типа: регистрирующие, с адаптацией и управляющие. В дальнейшем для нас будут представлять интерес ТИС управляющего типа, на них мы остановимся более подробно.

ТИС управляющего типа (рис. 1) содержит контур адаптации и контур управления. Контур адаптации состоит из формирователя управляющих сигналов (ФУС) и исполнительного устройства (ИУ), изменяющего параметры ТВД (например, **поворот оптической оси датчика в горизонтальной и вертикальной плоскости, изменение его угла зрения, диафрагмы объектива и т.д.**) с целью оптимизации условия измерения контролируемого объекта (микролифта). Сочетание функций слежения и измерения обеспечивает для ТИС с адаптацией высокую точность и устойчивость результатов измерения.

Структура системы позволяет производить автоматический поиск и обнаружение объекта. Контур управления по структуре аналогичен контуру адаптации и позволяет поддерживать на заданном уровне или изменять по заданной программе контролируемый параметр объекта. В некоторых случаях в качестве устройства индикации и регистрации (УИР) в ТИС используется телевизионный экран (например, в случае микролифтовых планеров), на котором для удобства работы оператора (пилота) воспроизводится ТВ-изображение наблюдаемого объекта и результаты измерения параметров этого объекта в виде буквенно-цифровой

информации, совмещенной с изображением. В автоматических ТИС управляющего типа (например, БПЛА) блок индикации отсутствует.

Оптическая система (объектив) ТВД предназначена для создания оптического изображения на входе фотоэлектрического преобразователя. Это изображение, если пренебречь искажениями, вносимыми объективом и средой распространения света, можно рассматривать как центральную проекцию объекта на плоскость.

Свойства центральной проекции позволяют рассматривать изображение объекта как его масштабированную копию, в которой сохраняется информация об объекте, и, следовательно, его параметры могут быть вычислены путем соответствующего пересчета измеренных параметров оптического изображения.

В состав измерительного блока (ИБ) входят вычислитель, выполняющий основной измерительный алгоритм, устройство регистрации и индикации измеряемого параметра объекта и формирователь сигналов управления (ФСУ). На одном выходе ФСУ формируется сигнал «поиск/слежение» (П/С), на другом – сигнал, совмещающий центр следящего строба с изображением объекта. В исходном состоянии ТИС находится в режиме поиска.

Вычислительный алгоритм в **режиме поиска** реализует операции обнаружения сигнала объекта путем **пороговой обработки входного** сигнала и определение координат обнаруженного объекта. После обнаружения объекта ТИС переводится в **режим слежения** (путем формирования сигнала «слежение» на выходе ФСУ). В этом режиме вычислитель выполняет алгоритм измерения координат объекта относительно центра строба и через формирователь сигналов управления вводит соответствующую поправку в положение строба, вырабатываемого генератором строба в очередном кадре. В результате центр следящего строба совмещается с центром объекта. Далее сигнал с ИБ подается на контур адаптации ТВД и контур управления ЛА.

В дальнейшем при оценках возможностей телевизионных систем при поиске микролифтов будем пользоваться характеристиками портативного ТВП «Сыч-3», высококачественная германиевая оптика которого обеспечивает максимально эффективное использование возможностей микроболометра. Чувствительность его, определяемая минимально разрешаемой разностью температур (МРТ), находится в пределах 70/100 мК спектра 8...14 мкм.

Согласно принятой классификации, «Сыч-3» относится к категории ТИС регистрирующего типа и позволяет определять угловые и линейные размеры объекта. Добавляя к нему контуры адаптации и управления с заложенными в них алгоритмами

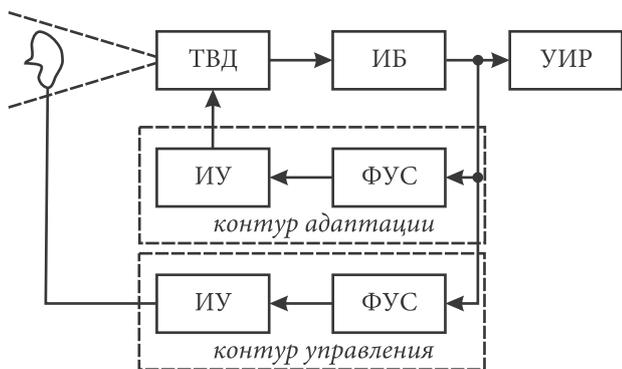


Рис. 1. Схема ТИС управляющего типа [7]

поиска, можно превратить «Сыч-3» в ТИС управляющего типа.

Рассмотрим ряд проблем, связанных с работой ТИС:

- сканирование ТВД и определение предельных углов сканирования;
- вероятность обнаружения микролифтов ТИС при полете ЛА в слое микролифтов и при наборе высоты.

### Проблема сканирования изображений микролифтов

Полет большинства БПЛА происходит в нижней части атмосферного пограничного слоя на высотах от 100 до 300 м. Слой АПС, в котором возникают микролифты, структурирован: микролифты образуют крупномасштабные когерентные структуры (ККС) типа гексагональной решетки.

Обычно ТВП, которые используются в качестве датчиков ТИС, имеют ограниченное поле зрения. Так поле зрения ТВП «Сыч-3» составляет  $11^\circ \times 8,2^\circ$ , которого явно не хватает для поиска микролифтов при полете БПЛА в микролифтовом слое. Так как в качестве элемента гексагональной структуры можно рассматривать равносторонний треугольник, в вершинах которого находятся микролифты, то при движении БПЛА от одной из вершин треугольника к другой, возникает проблема с определением ее угловых координат относительно исходной вершины. Угловая координата следующей вершины треугольника относительно заданного курса полета БПЛА будет случайной величиной, которая может меняться в пределах  $\pm 30^\circ$ , т.е. больше поля зрения ТВП на  $25^\circ$  относительно оптической оси прибора.

После выхода на дистанцию обнаружения цели ТИС БПЛА должен иметь поле зрения  $60^\circ$  в горизонтальном направлении. В случае микроБПЛА, когда оптическая ось ТВП жестко связана с продольной осью ЛА, сканирование при поиске микролифтов происходит путем рысканья ЛА [1]. При использовании ТИС на микролифтовых планерах и БПЛА среднего класса (от 50 до 200 кг) возникают специфические проблемы, связанные с их габаритами и инерционностью. Достаточно большой вес ЛА не позволяет использовать систему сканирования самим ЛА, как в случае с микроБПЛА. Чтобы свести к минимуму маневры ЛА (а тем самым и потери высоты при поиске микролифтов), предполагается проводить сканирование за счет движения отдельных элементов оптической системы прибора – зеркал, призм, клиньев, линз иафрагм или с помощью поворотной платформы (опорно-поворотного устройства), на которой устанавливается ТВП [8].

Существует целая серия ТВП, начиная с первого ТВП ТВ-03 и кончая современными типа «ИРТИС-2000», у которых сканирование осуществляется подвижными элементами оптической системы. Так, принцип работы «ИРТИС-2000» основан на сканировании температурного излучения в поле зрения камеры оптико-механическим сканером с одноэлементным высокочувствительным ИК-приемником и на трансформации этого излучения в электрический сигнал аналого-цифровым преобразователем. Камера содержит зеркально-линзовую оптику с малым количеством отражающих поверхностей, что уменьшает потери оптической системы и упрощает ее настройку.

Применение особых методов сканирования, таких как суммирование кадров и усреднение, позволяет расширить поле зрения прибора более чем в 2 раза по сравнению с ТВП «Сыч-3», доводя его до значения  $25^\circ \times 20^\circ$  (у «Сыча-3» оно составляет  $11^\circ \times 8,2^\circ$ ). Однако даже такое увеличение поля зрения ТВП не решает проблему поиска микролифтов. Задача может быть решена при использовании поворотных платформ, таких как, например, в ТВП «Панорама» (ОАО ЛОМО), обеспечивающих круговое сканирование.

Современные поворотные устройства обладают следующими характеристиками: диапазон поворота по азимуту – непрерывный,  $360^\circ$ ; диапазон наклона по вертикали составляет  $\pm 120^\circ$ ; скорость поворота/наклона:  $30^\circ$  в секунду; погрешность поворота/наклона:  $< 1\%$ . На рис. 2 представлен вид такого устройства. Его опорно-поворотное устройство является двухосевым манипулятором с сервоприводами (рис. 3).



Рис. 2. Вид ТВП с опорно-поворотным устройством



Рис. 3. Внутренний вид опорно-поворотного устройства



В нашем случае нет необходимости обеспечивать круговой обзор, а для поиска микролифтов достаточно расширить поле зрения ТИС с помощью поворотной платформы в горизонтальной плоскости на  $\pm 25^\circ$  и в вертикальной плоскости на  $\pm 8^\circ$ . Т.е. поле зрения ТВД необходимо увеличить более чем в 6 раз в горизонтальном направлении и примерно в 3 раза в вертикальном направлении. В этом случае использование ТВП «Сыч-3» в сочетании с поворотной платформой (рис. 2 и 3) позволяет решить проблему обнаружения очередного микролифта без совершения дополнительных маневров, что в случае тяжелых ЛА позволяет значительно уменьшить потери высоты при переходе от одного микролифта к другому.

### Влияние возмущений атмосферы на процесс сканирования микролифтов в вертикальном направлении

При движении БПЛА или планера от одного микролифта к другому он будет подвергаться воздействию мелкомасштабной турбулентности, которая вызовет колебания ЛА в вертикальном направлении. Так как поле зрения ТВП в вертикальном направлении ограничено, возможна потеря микролифта ТИС на какое-то время.

**Влияние колебаний ЛА в вертикальном направлении на работу ТИС можно скомпенсировать путем изменения угла наклона оптической оси ТВП в вертикальной плоскости.** Для оценки изменения угла наклона оптической оси ТВП необходимо знать амплитуды колебаний ЛА в вертикальном направлении под действием мелкомасштабной турбулентности. При этом во всех дальнейших оценках мелкомасштабной турбулентностью, генерируемой микролифтами, будем пренебрегать, полагая, что основной вклад в генерацию мелкомасштабной турбулентности вносит ветер на высоте полета ЛА.

Рассмотрим систему уравнений, описывающую планирование безмоторного ЛА в вертикальной плоскости XOY, которая имеет следующий вид:

$$m \frac{dV_x}{dt} = F_x \cos \vartheta - F_y \sin \vartheta, \quad (1)$$

$$m \frac{dV_y}{dt} = F_y \cos \vartheta + F_x \sin \vartheta - G, \quad (2)$$

$$V_{gx} = V \cos \vartheta - w_x, \quad V_{gy} = V \sin \vartheta - w_y, \quad (3)$$

где  $w$  – скорость вихревого движения,  $\vartheta$  – угол планирования,  $F_y, F_x$  – подъемная сила и сила сопротивления крыла соответственно,  $F_x = C_x \frac{\rho V^2}{2} S, F_y = C_y \frac{\rho V^2}{2} S$ ,  $C_x$  и  $C_y$  – коэффициенты сопротивления и подъемной силы крыла,  $S$  – площадь крыла,  $G$  – вес ЛА (направление сил относительно ЛА изображено на рис. 4 и 5).

При исследовании динамики ЛА изменением скорости по оси  $X$  обычно пренебрегают [9], принимая  $\frac{dV_x}{dt} = 0$ . Тогда из уравнения (1) следует, что  $\tan \vartheta = F_x / F_y = k^{-1}$ , где  $k = C_y / C_x$  – качество крыла, а уравнение (2) примет следующий вид:

$$m \frac{dV_y}{dt} = F_y / \cos \vartheta - G. \quad (4)$$

Так как  $1 / \cos \vartheta = \sqrt{1 + k^{-2}} \sim 1$ , уравнение (4) окончательно примет следующий вид:

$$m \frac{dV_y}{dt} = F_y - G. \quad (5)$$

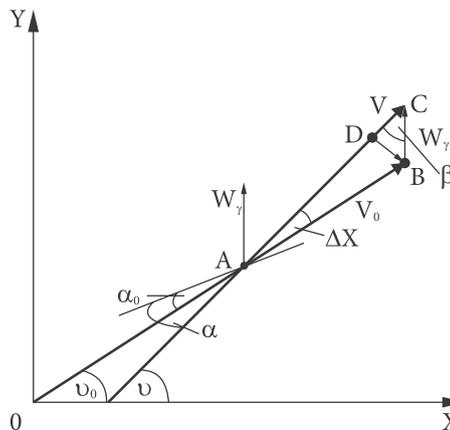


Рис. 4. Влияние скорости вихревого движения  $w$  на скорость движения ЛА

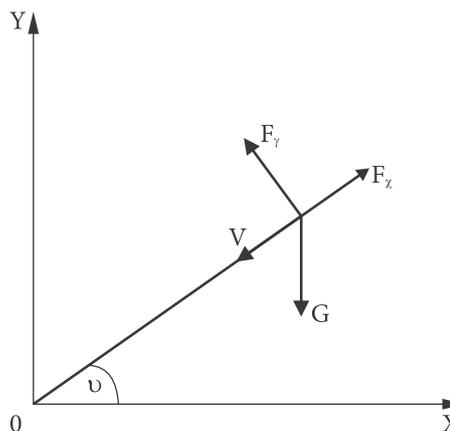


Рис. 5. Силы, действующие на ЛА

Уравнение (5) в записанном виде позволяет учесть воздействие пульсаций скорости  $w$ , обусловленных турбулентностью, на движение ЛА. Но оно не учитывает «зонтичного эффекта», возникающего при этом, который обусловлен кривизной профиля крыла и частично демпфирует воздействие турбулентности на ЛА. Учтем его. Тогда уравнение (5) примет следующий вид:

$$m \frac{dV_y}{dt} = F_y - C_x^+ \frac{\rho V_y^2}{2} S - G \quad (6)$$

при движении ЛА вверх и

$$m \frac{dV_y}{dt} = F_y + C_x^- \frac{\rho V_y^2}{2} S - G \quad (7)$$

при движении ЛА вниз.

При действии турбулентности на ЛА его движение складывается из двух составляющих: обычного (традиционного) планирования (в этом случае  $V_{yp} = \text{const}$  и  $dV_{yp}/dt=0$ ) и колебательного движения с амплитудой  $V_{yo}$ . Таким образом,

$$\frac{dV_y}{dt} = \frac{d(V_{yp} + V_{yo})}{dt} = \frac{dV_{yo}}{dt}.$$

Традиционное планирование будет описываться уравнением:

$$F_{y0} - G = 0,$$

а колебательное движение уравнением:

$$m \frac{dV_{yo}}{dt} = F_y (\alpha - \alpha_o) \mp C_x^\pm \frac{\rho V_{yo}^2}{2} S. \quad (8)$$

Согласно [9],  $F_y (\alpha - \alpha_o) = C_y^\alpha \frac{\rho w_y V}{2} S$ . Тогда уравнение (8) можно записать как

$$m \frac{dV_{yo}}{dt} = \mp C_x^\pm \frac{\rho V_{yo}^2}{2} S + C_y^\alpha \frac{\rho w_y V}{2} S, \quad (9)$$

т.е. возмущенное движение ЛА в турбулентной атмосфере описывается уравнением Риккати относительно амплитуды  $V_{yo}$ . Ниже будет дан анализ этого уравнения для различных случаев.

Оценим амплитуду колебаний ЛА по высоте  $X$  при воздействии мелкомасштабной турбулентности из уравнения (9). Для этого воспользуемся

подходом, предложенным С.П. Тимошенко [10]. Полагая, что ЛА совершает стационарные гармонические колебания и  $V_1 = i\omega X$ , величину  $X$  можно определить из уравнения

$$m\omega^2 X + C_x^+ \frac{\rho\omega^2}{2} S \cdot X^2 = -C_y^\alpha \frac{\rho w_y V}{2} S, \quad (10)$$

или

$$aX^2 + X + X_0 = 0, \quad (11)$$

где  $a = C_x^+ \rho S / (2m)$ ,  $X_0 = C_y^\alpha \frac{\rho w_y V}{2m\omega^2} S$ .

Так как нас интересует воздействие турбулентности на ЛА с расстояния обнаружения микролифта  $L$ , необходимо выполнение условия  $kL = n2\pi$ , где  $k = \omega/V$ ,  $n = 1, 2, \dots$ . Именно эти частоты будут вносить основной вклад в колебания ЛА при сближении с микролифтом. Более низкие частоты будут слабо влиять на смещение ЛА по вертикали. Оценки минимальной частоты воздействия мелкомасштабной турбулентности  $\omega_{min}$  из условия  $kL = 2\pi$  дает  $\omega_{min} = 0,27$  рад/с при  $L = 457$  м и  $V = 20$  м/с или  $f_{min} = 0,044$  Гц. Аналогичные оценки мы получим из решения уравнения (11) при условии  $4aX_0 = 1$ . В этом случае  $\omega_{min} = 0,412$  и  $f_{min} = 0,066$  Гц.

В дальнейшем при оценке амплитуды колебаний по вертикали  $|X|$  будем ориентироваться на условие  $4aX_0 = 1$ . Тогда

$$|X| = (2a)^{-1}. \quad (12)$$

Выполним оценки  $|X|$  для ЛА различных типов, рассмотренных в данной работе. Величина  $C_y^\alpha$  определена из выражения для  $C_y^\alpha$  крыла конечного размаха [11]:

$$C_y^\alpha = \frac{(C_y^\alpha)_\infty}{1 + (C_y^\alpha)_\infty (1 + \tau) / (\pi\lambda)},$$

где  $(C_y^\alpha)_\infty$  соответствует значению  $C_y^\alpha$  для крыла бесконечного размаха,  $(C_y^\alpha)_\infty = 0,9 \cdot 2\pi$ ;  $0,9$  – эмпирический коэффициент;  $2\pi$  – теоретическое значение  $(C_y^\alpha)_\infty$  для тонкого крыла бесконечного размаха;  $\tau$  – характеризует форму крыла в плане;  $\lambda$  – удлинение крыла;  $\lambda = l^2/S$ ,  $l$  – размах крыла;  $S$  – площадь крыла.

Полагая, что у всех рассмотренных ЛА крыло имеет трапецеидальную форму и  $(1 + \tau)/\pi = 0,318$ , для БПЛА получим  $C_y^\alpha = 4,6$  при  $\lambda = 8$ , а для планеров



$C_y^\alpha = 4,8$  при  $\lambda=13$  в случае *Aeriane Swift*. Влияние кривизны профиля на коэффициент сопротивления крыла при движении его вверх можно оценить по данным продувки полусфер-чашек в разных направлениях [12] и он соответственно будет равен  $C_x^+ \sim 0,8$ .

С помощью выражения (12) были вычислены значения  $|X|$  для ряда ЛА (табл. 1).

Как показывают экспериментальные данные [13], максимумы спектральной плотности мелкомасштабной турбулентности находятся в диапазоне частот

Таблица 1.

**Амплитуды колебаний  $|X|$  микро-БПЛА *Puma*, «Истра-10» и микролифтового планера *Aeriane Swift* под действием мелкомасштабной турбулентности**

Тип ЛА	$\lambda$	$C_y^\alpha$	$\bar{G}$ , Н/м <sup>2</sup>	$a$ , м <sup>-1</sup>	$ X $ , м
<i>Puma</i>	6*	4,35	70*	0,074	6,77
Истра-10	8	4,60	50	0,103	4,85
<i>Aeriane Swift</i>	13	4,80	151	0,034	14,70

\* отмечены ориентировочные значения параметров.

от  $2 \cdot 10^{-3}$  до  $6 \cdot 10^{-2}$  Гц. Так как низкочастотные колебания оказывают слабое влияние на смещение ЛА с момента обнаружения микролифта, амплитуда колебаний ЛА будет определяться высокочастотной частью спектра мелкомасштабной турбулентности.

Оценим влияние вертикальных колебаний на процесс обнаружения микролифта. В случае микро-БПЛА «Истра-10» максимальные флуктуации поля зрения на расстоянии четверти длины волны (114 м) будут составлять  $|X|/114=0,0425$  рад =  $2,4^\circ$ , т.е. находятся в поле зрения ТВП «Сыч-3». В случае *Aeriane Swift* максимальные флуктуации поля зрения будут составлять  $7,4^\circ$ , больше половины поля зрения ТВП «Сыч-3» в вертикальном направлении и поэтому требует введения дополнительного сканирования оптической оси ТВП в вертикальной плоскости. Аналогичная ситуация имеет место в случае БПЛА среднего класса.

**Оценка вероятности захвата микролифта ТИС при горизонтальном полете БПЛА в слое микролифтов и при наборе высоты**

При горизонтальном полете дальность обнаружения микролифтов ТВП меньше расстояния между ними (это наиболее общая ситуация). Поэтому процедура перехода от одного микролифта к другому будет состоять из двух участков: «слепого»

полета, когда ТВП не видит цели, и БПЛА движется по заданному курсу до момента обнаружения и захвата цели, и движения БПЛА в направлении цели по данным ТВП. В обоих случаях движение БПЛА в азимутальной плоскости должно сопровождаться колебаниями (рысканьями) относительно заданного курса с определенной амплитудой. В случае ТВП «Сыч-3» поле зрения которого  $11^\circ \times 8,2^\circ$  при фокусном расстоянии 70 мм, амплитуда рысканья будет равна  $25^\circ$ . В результате поле зрения ТВП в горизонтальном направлении расширяется до  $60^\circ$ .

Следует заметить, что между моментом обнаружения цели ТВП и захватом ее системой управления БПЛА существует определенный временной интервал, который влияет на процесс сближения ЛА с микролифтом. Оценим его. Согласно [8], вероятность обнаружения цели  $P$  зависит от ее площади  $\gamma^2$  и контраста  $C$  и может быть вычислена по формуле:

$$P = 1 - \exp(-\alpha T),$$

где  $T$  – время обнаружения;  $\alpha$  – коэффициент, зависящий от угловой площади цели  $\gamma^2$  и контраста  $C$ ,  $\lg \alpha = -4,3 + 5,6C + 1,6 \lg \gamma^2$ .

При дальности обнаружения микролифта  $R_{av}=457$  м,  $C=0,02$ ,  $\gamma^2=65$  квадратных градусов,  $\alpha = 0,05$ , времени полета  $T=1$  с, вероятность обнаружения микролифта  $P=0,05$  при крейсерской скорости полета 60 км/ч. И только при  $T=10$  с,  $P=0,4$ , т.е. обеспечивается надежный захват цели.

При оценке вероятности захвата цели мы ориентировались на вероятность поражения цели ПЗРК с тепловыми головками самонаведения. На самом деле величина  $P$  будет больше, так как при сближении с микролифтом величина  $\gamma^2$  будет расти и соответственно увеличится  $\alpha$ . Таким образом, участок наведения на микролифт сократится на 37%. Реально, чтобы иметь запас по времени для маневров микро-БПЛА в области микролифта, необходимо иметь скорость полета  $\sim 35 \dots 40$  км/ч. А такими скоростями располагают только два из рассмотренных микро-БПЛА – *Pointer* и «Истра-10».

При переходе БПЛА к новому микролифту в момент выхода на расстояние обнаружения ее  $R_{av}$  движение БПЛА в азимутальной плоскости должно сопровождаться колебаниями (рысканьями) относительно заданного курса с определенной амплитудой, величина которой зависит от расстояния между ближайшими соседями микролифта. Система управления ЛА должна быть построена таким образом, чтобы после захвата цели вывести БПЛА в такую область микролифта, откуда обеспечивается надежный набор высоты. Однако любые маневры БПЛА приведут к дополнительной поте-

ре высоты. Поэтому число маневров должно быть оптимизировано.

После захвата цели ТВП реальная задача наведения БПЛА на очередной микролифт осложняется тем, что в процессе движения ЛА подвергается воздействию мелкомасштабной турбулентности со стороны атмосферы. А так как оптическая ось ТВП жестко связана с БПЛА, то будет происходить скакивание изображения цели.

В данном случае мы будем иметь оптико-механическое сканирование [8]. При этом траектория сканирования будет определяться колебательными движениями ЛА в двух взаимно перпендикулярных направлениях. В результате на экране ТВП будет происходить дополнительное расширение поля зрения прибора.

Использование термопар позволяет точно зарегистрировать положение микролифтового слоя по высоте, но поиск микролифтов в пространстве момента старта микро-БПЛА может быть осуществлен только с помощью ТВП. Для этого необходимо предусмотреть поворот оптики и регистрирующей части ТВП на угол  $(\pi/2 - \varphi)$  относительно продольной оси БПЛА, где  $\varphi$  – угол наклона винтовой линии относительно горизонтальной плоскости.

Обычно набор высоты БПЛА происходит по цилиндрической винтовой линии. Кроме того, на ЛА по мере набора высоты будет действовать мелкомасштабная турбулентность. Таким образом, ТВП будет осуществлять оптико-механическое сканирование, траектория которого будет определяться колебательно-вращательным движением ЛА. Задавая радиус винтовой линии  $R$  и зная вертикальную скорость набор высоты БПЛА  $V_z$ , можно подобрать режим набора высоты так, чтобы за 1...2 шага винтовой линии зафиксировать положение микролифта. На примере немецкого метеорологического БПЛА «M<sup>2</sup>AV Carolo» оценим значения величины  $R$  и число шагов винтовой линии  $n$ . Согласно [3],  $V_z = 2,25$  м/с, скорость полета БПЛА  $V = 20$  м/с. При  $R = 200$  м и  $n = 2$  угол наклона винтовой линии  $\varphi = \arcsin(V_z/V) = 7,2^\circ$ , а набранная высота  $H = 2\pi \cdot R \cdot n \cdot \sin\varphi = 285$  м, т.е. уже на втором витке мы пройдем первый ярус микролифтов. Так как высота микролифтового слоя меньше дальности обнаружения микролифта с помощью ТВП, то уже на первом витке набора высоты может быть обнаружен микролифт.

Эффективность поиска микролифтов микро-БПЛА будет определяться правильным выбором радиуса набора высоты  $R$  и местом старта. Однако оценки показывают, что при  $R = 200$  м, среднем расстоянии между микролифтами  $a = 1800$  м, большом диаметре тора-микролифта  $D = 360$  м, дальности обнаружения микролифта ТВП  $R_{av} = 457$  м, вероят-

ность стартовать из такого места (далее будем называть его «слепым»)  $P_b$ , когда при наборе высоты не будет обнаружен микролифт, можно записать как отношение «слепой» площади к площади равностороннего треугольника  $ABC$  (рис. 6), сторона которого равна  $a$ , т. е.

$$P_b = S_b / S_{ABC},$$

где  $S_b = 3(R_t + R_{av})^2 \sin 60^\circ = \pi(R_{ef})^2$ ,  $R_{ef} = \xi(R_t + R_{av})$ ,  $\xi = (3 \sin 60^\circ / \pi) 0,5 = 0,91$ ,  $S_{ABC} = a^2 \sin 60^\circ / 2$ , и  $P_b = 7,25 \cdot (R_{ef}/a)^2 \sin 60^\circ$ .

Реально, если спираль набора высоты попадает в «слепую» область, вероятность промахнуться мимо микролифта будет меньше и ее можно записать как

$$P_b = 7,25((R_{ef} - 2R)/a)^2 \sin 60^\circ = 7,25(R_{ef}/a)^2 \sin 60^\circ (1 - 2R/R_{ef})^2$$

При указанных выше  $a$ ,  $R_t$  и  $R_{av}$ ,  $R_{ef} = 580$  м, а выражение для  $P_b$  примет следующий вид:

$$P_b = 0,752 (1 - 2R/R_{ef})^2 \quad (13)$$

Выполним некоторые оценки  $P_b$ . При  $R = 200$  м  $P_b \sim 0,072$ , т.е. влиянием места старта можно пренебречь. Минимальный радиус винтовой линии будет ограничен допускаемой вероятностью  $P_b$ . Оценки показывают, что при  $R \gg 0$  величина  $P_b \gg 0,752$ , т.е. имеет слишком большое значение. В дальней-

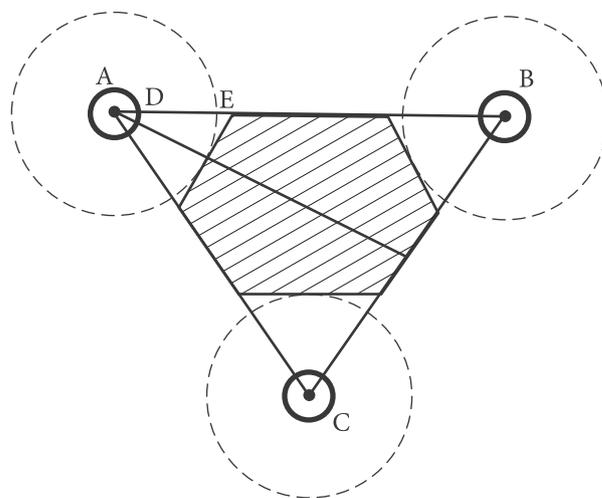


Рис. 6. Проекция на горизонтальную плоскость элемента гексагональной структуры микролифтов (торов, обозначенных маленькими жирными кружками):  $AD = R_t$ ,  $DE = R_{av}$ ,  $AB = BC = AC = a$ ,  $R_t$  – большой радиус тора. Заштрихована область, где отсутствуют микролифты («слепая» область старта)

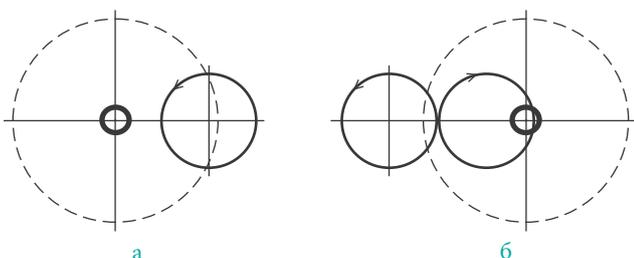


шем при определении минимального радиуса винтовой линии будем ориентироваться на вероятности поражения цели  $P$ , принятые у современных ЗРК, у которых  $P=0,8$  или  $Pb=0,2$  и соответственно  $R_{min}=140$  м.

Таким образом, стартуя с заданной точки по цилиндрической винтовой линии с радиусом  $R_{min}$  и углом наклона  $\varphi$ , который равен углу атаки крыла БПЛА, обеспечивающему его устойчивый взлет, ЛА будет набирать высоту и одновременно сканировать положение микролифта в вертикальном направлении. Здесь возможны два варианта (рис. 7):

- когда при сканировании внутренней области спирали БПЛА обнаруживает микролифт, и набор высоты происходит до тех пор, пока градиент яркости микролифта не поменяет знак (это и будет высота первого яруса микролифтов, рис. 4а);
- при отсутствии микролифта во внутренней области спирали БПЛА меняет угол крена и начинает сканировать внешнюю область спирали (рис. 4б).

В этом случае, как только ТВП ЛА обнаруживает излучение микролифта, БПЛА будет набирать высоту по спирали до той точки, когда яркость изображения начнет убывать, т.е. дальнейшее движение БПЛА по спирали приведет к его удалению от микролифта. В этот момент угол отклонения руля направления относительно оси аппарата необходимо поменять на противоположный, чтобы набор высоты ЛА происходил в области излучения микролифта. Момент выхода на высоту яруса микролифтов будет определяться, как и в первом случае, изменением знака градиента яркости. Далее поиск микролифта происходит в горизонтальной плоскости по процедуре, предложенной в предыдущей главе. Момент соприкосновения с микролифтом может быть зарегистрирован с помощью термопары, как это было предложено выше.



**Рис. 7. Два варианта набора высоты микро-БПЛА:** а – большая часть цилиндрической спирали находится в области обнаружения микролифта, б – цилиндрическая спираль слегка пересекает область излучения микролифта. 1 – область обнаружения микролифта, 2 – микролифты, 3 – проекции спирали набора высоты, стрелки – направления движения ЛА

Правильный выбор радиуса  $R$  и вертикальной скорости набора высоты  $V_z$ , а также расширение области сканирования за счет мелкомасштабной турбулентности и кругового движения ЛА позволят с высокой степенью надежности захватить микролифт и зафиксировать по высоте первый ярус микролифтов.

Обычно поиск микролифтов микро-БПЛА происходит при их запуске с земли. В случае БПЛА среднего класса, полет которых к цели происходит на высотах 10...15 м, поиск микролифта сведется к следующему сценарию: когда в районе цели средний БПЛА набирает высоту 250 м, сбавляет скорость до 40 км/ч и в кабрирующем полете с амплитудой  $\pm 50$  м осуществляет поиск микролифтов по высоте. После того, как высота яруса микролифтов будет установлена, далее поиск микролифтов осуществляется путем сканирования оптической оси ТВД в горизонтальной и вертикальной плоскостях с помощью опорно-поворотного устройства.

### Заключение

Использование БПЛА энергии микролифтов позволяет значительно увеличить продолжительность его полета. Для этого выполним некоторые оценки. Так как данные для оценок энергетических затрат на управление и разведывательную аппаратуру конкретных БПЛА отсутствуют, выполним их косвенным путем, воспользовавшись имеющимися данными для БПЛА *Predator* и *Silver Fox*, приведенными в Интернете. Вычислим удельную мощность двигателя *Predator*  $\bar{W}$  при максимальном взлетном весе. Тогда  $\bar{W}=0,103$  л.с./кг=0,076 кВт/кг. При весе *Silver Fox*, равном 12 кг, мощность его силовой установки должна быть ~0,91 кВт, а мощность, необходимая для управления БПЛА и для аппаратуры, установленной на нем, составляет 0,07 кВт. Таким образом, за время полета на управление и аппаратуру расходуется около 8% мощности (в основном на сервоприводы аэродинамических рулей).

Пусть при поиске и центрировании микролифтовых потоков БПЛА затрачивает в два раза больше энергии и, кроме того, часть энергии затрачивается на активный полет в сторону цели и возвращение назад. Но даже в этом случае длительность пребывания БПЛА в районе цели будет в 6...7 раз больше, чем при активном полете. Если взять БПЛА «Инспектор 402» (мощность которого, затрачиваемая на управление, составляет только 2% от общей мощности, радиус действия 25...40 км и время пребывания в воздухе на электродвигателе составляет 5 ч), при использовании микролифтовых потоков время его пребы-

вания в районе цели, находящейся на расстоянии 25 км, можно увеличить с 4,5 ч до 108 ч. Причем здесь имеются также свои резервы. Совершенствуя систему управления БПЛА, можно добиться снижения доли энергии, затрачиваемой на поиск микролифтов, и, следовательно, увеличить продолжительность полета БПЛА. При переходе с литий-ионных аккумуляторов на атомные батареи можно увеличить продолжительность полета до 1 месяца и более, т.е. сделать эти ЛА по продолжительности полета такими же, как БПЛА, использующие солнечную энергию (например, БПЛА «Zephyr», Великобритания).

Не любые БПЛА могут использовать микролифтовые потоки. Существуют определенные ограничения на геометрические и весовые характеристики БПЛА, связанные с размерами микролифтов и минимальной высотой их появления. Зная геометрические размеры микролифтов и минимальную высоту полета БПЛА, которая определяется границей приземного слоя, можно оценить максимальный размах его крыльев. Так как минимальная высота полета БПЛА составляет 100 м (граница приземного слоя атмосферы), для осуществления маневра на этой высоте размах крыльев БПЛА должен быть хотя бы на порядок меньше высоты полета, т.е. не более 10 м. Если ориентироваться на поперечные размеры микролифтов, которые меняются от 100 до 150 м, размах крыльев БПЛА должен быть не более 15 м. Аналогичный размах крыльев (14,85 м) имеет американский БПЛА *Predator RQ-1K*. Предельный вес БПЛА будет ограничен максимальной нагрузкой на крыло (не более 15 кг/м<sup>2</sup>). По этому критерию *Predator RQ-1K* не может использовать энергию микролифтов, так как целиком сориентирован на активный полет с двигателем.

Выполнение условия по нагрузке на крыло имеет немаловажное значение при размещении на борту БПЛА среднего класса средств РЭБ, создающих помехи для работы GPS/ГЛОНАСС и таким образом нейтрализующие высокоточное оружие и нарушающие

управление войсками. В этом случае такие БПЛА должны иметь большой радиус действия, более тяжелую бортовую нагрузку, для работы которой требуются более мощные источники электроэнергии.

Чтобы БПЛА «Истра-07» мог использовать микролифтовые потоки в районе барражирования,

необходима доработка его крыла. Так как нагрузка на крыло микролифтового планера может быть не более 15 кг/м<sup>2</sup>, при весе 130 кг площадь крыла «Истра-07» должна быть равна 8,7 м<sup>2</sup>. При удлинении крыла 13 (как у *Aeriane Swift*) размах крыла «Истра-07» будет 10,6 м. Вес конструкции БПЛА будет 32,6 кг, если ориентироваться на соотношение веса конструкции и взлетного веса *Aerian Swift*. И так при аэродинамическом качестве полной компоновки 27, размахе – 10,6 м и закрылках БПЛА «Истра-07» в области цели может барражировать в течение длительного времени без затраты топлива на скорости 40 км/ч и высотах 200...300 м, используя энергию микролифтовых потоков. В этом случае длительность полета БПЛА будет определяться емкостью аккумуляторов, обеспечивающих работу средств РЭБ и ТИС.

## Литература

1. Нефедов В.И., Матвеев А.Ю. // Научный вестник МГТУ ГА. 2012. № 186(12). С. 114.
2. Нефедов В.И., Матвеев А.Ю. // Научный вестник МГТУ ГА. 2013. № 189(3). С. 87.
3. Нефедов В.И., Матвеев А.Ю. // Научный вестник МГТУ ГА. 2013. № 189(3). С. 90.
4. Нефедов В.И., Матвеев А.Ю. // Научные технологии. 2013. № 12. С. 19.
5. Горелик С.Л., Кац Б.М., Киврин В.И. Телевизионные измерительные системы. М.: Связь, 1980. – 168 с.
6. Казанцев Г.Д., Курячий М.И., Пустынский И.Н. Измерительное телевидение. М.: Высшая школа, 1994. – 288 с.
7. Кротаев В.В., Краснящих А.В. Телевизионные измерительные системы / Учебное пособие – СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. – 108 с.
8. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов.
9. Доброленский Ю.П. Динамика полета в неспокойной атмосфере. М.: Машиностроение, 1969.
10. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле. М.: КомКнига, 2006.
11. Мартынов А.К. Экспериментальная аэродинамика. М.: Оборонгиз, 1950.
12. Горлин С.М. Экспериментальная аэромеханика. М.: Высшая школа, 1970.
13. Иванов В.Н., Бызова Н.Л. // Метеорология и гидрология, 2001, № 1. С. 5.