

УДК 629.7.005: 551.510.42

© Г. И. Леонович¹, А. Ф. Крутов², Н. П. Козлов², 2014

¹Секция прикладных проблем при Президиуме РАН, Поволжское отделение, Самара

²Самарский государственный университет

leogil@mail.ru

БОРТОВОЙ АЭРОЗОЛЬНЫЙ ЛИДАР ДЛЯ МОРСКИХ БПЛА

Представлены материалы исследований по оценке возможности применения бортовых компактных аэрозольных лидаров для обеспечения планерного режима полета БПЛА над морской акваторией с использованием восходящих потоков воздуха — термиков. Показано, что для увеличения дальности обнаружения термиков целесообразно работать вблизи края линии резонансного поглощения индикаторной компоненты.

Ключевые слова: морской БПЛА, бортовой аэрозольный лидар, термик, планерный режим полета.

В число критических требований к морским БПЛА входят длительность и дальность беспосадочного полета [1, 2]. У отечественных беспилотников это время составляет от 1 до 18 часов в зависимости от массы и класса аппарата. У лучших зарубежных образцов — до 40 ч (Predator, Euro Hawk, Global Hawk Block 20). Вместе с тем вопрос длительных полетов, причем без силовой установки, давно решен в планеризме [3]. Поэтому тематика исследований, направленных на решение задачи поиска и идентификации потоков воздуха для реализации планерного режима полета с применением бортовых средств дистанционного мониторинга атмосферы является новой и актуальной.

Вертикальные конвективные движения воздуха имеют форму либо струи, либо т. н. термика (пузыря) диаметром 500—1000 м, который поднимается из приповерхностного слоя. Расстояние между термиками составляет 1—2 км [4]. Поиск и идентификация термиков с борта БПЛА возможна методами дистанционного зондирования атмосферы с помощью лидарных систем. Основными аргументами в пользу такого выбора являются необходимость обеспечения высокой чувствительности при достаточно жестких ограничениях на габариты, массу и энергопотребление, а так же необходимость обеспечения скрытности мониторинга атмосферы, проводимого с борта БПЛА.

В процессе исследований проведено моделирование планерного режима полета БПЛА над морской акваторией при наличии на борту аэрозольного лидара. В основу АСУ механизацией беспилотника положены линеаризованные соотношения и полученные на их основе законы управления. Модель позволяет с достаточно высокой степенью точности рассчитать поведение планера при различных условиях эксплуатации.

Одними из возможных компонент тропосферы, пригодных для идентификации термиков над морской и океанической поверхностью, являются солевые аэрозоли над прибрежными поверхностями — органические аэрозоли, а также соединения кремния, глиноземы, карбонаты, кальциты, окислы железа; над большими городами — аэрозоли антропогенного характера. Для повышения достоверности обнаружения термиков целесообразно проводить корреляционную процедуру идентификации по нескольким из приведенных компонент, а также по аэрозольным частицам разного размера.

На основании анализа механизмов обратного рассеяния излучения разработана математическая модель принятого сигнала, которая в общем виде записывается как

$$S = \sum_k S_k + N_T + N_0, \quad (1)$$

где S_k — сигнал, формируемый за счет одного из механизмов обратного рассеяния (рлеевское рассеяние, рассеяние на аэрозоле, резонансное рассеяние и т. д.); N_T — шумовой сигнал, вызванный посторонней засветкой и флуктуациями сигнала; N_0 — шумы фотоприемника и электроники.

Каждый из сигналов S_k в (1) можно представить как свертку излучаемого импульса $P(t)$ с функцией соответствующего отклика $A(t)$:

$$S(t) = A(t) * P(t) = \int_0^{\infty} A(\tau) \cdot P(t - \tau) d\tau.$$

В модели однократного рассеяния функция отклика представляется как

$$A(t, \lambda) = \frac{\eta \cdot \sigma}{2\pi \cdot c} \frac{\kappa(\lambda) \cdot \rho\left(\frac{c \cdot t}{2}\right)}{t^2} \exp\left(-c \cdot \kappa(\lambda) \int_0^t \rho\left(\frac{c \cdot \tau}{2}\right) d\tau\right), \quad (2)$$

где η — эффективность переизлучения ($\eta < 1$); c — скорость света; σ — площадь входной апертуры приемника; κ — показатель поглощения (зависит от длины волны излучения λ); $\rho(z)$ — зависимость плотности исследуемого вещества от продольной координаты z .

В случае если $\rho(z)$ задана как концентрация частиц, то σ представляет собой сечение поглощения. Параметр η показывает, какая доля поглощенного излучения снова переизлучается на той же длине волны. Так как сигнал принимаемый приемником сильно уменьшается с увеличением z , то величина η в значительной степени определяет дальность обнаружения неоднородностей распределения плотности исследуемого вещества. Приведенная выше формула справедлива для временных промежутков $t \gg t_d$, где $t_d = z_d/c$, $z_d = \sqrt{\sigma}$ — длина мертвой зоны.

В работе разработан новый алгоритм обработки сигнала, основанный на аналитическом решении лидарного уравнения и позволяющий скомпенсировать уменьшение сигнала с ростом расстояния, вызванное постоянным (средним) уровнем концентрации измеряемой компоненты воздуха.

В соответствии с предложенным алгоритмом разработана программа для компьютерного моделирования функционирования лидара в различных режимах. Проведенные численные эксперименты позволили оценить возможности обнаружения восходящих потоков и провести оптимизацию системы регистрации и обработки сигнала, сформулировать требования к элементной базе лидара. На рис. 1 в качестве примера приведены результаты моделирования сигнала при сканировании в горизонтальной плоскости участка атмосферы с неоднородностями распределения водного аэрозоля.

На рис 2 приведен результат обработки регистрируемого сигнала при различных уровнях шумов, в соответствии с разработанным алгоритмом. Глубина сканирования 5 км, ширина 2 км. В область сканирования введены две неоднородности, соответствующие двум термикам различной интенсивности, находящимся на разном расстоянии от лидара.

Чувствительность методики поиска термик по неоднородностям распределения концентрации компонент атмосферы можно заметно повысить, если использовать резонансное рассеяние зондирующего светового пучка [5—7]. При этом зондирование с оптической частотой, соответствующей непосредственно резонансу поглощения молекул индикатора, не представляется возможным, т. к. в этом случае маломощный луч будет практически полностью затухать на дистанции нескольких сотен метров. Выявлено, что для достижения необходимой дальности измерений целесообразно использовать диапазон частот вблизи края линии резонансного поглощения. Смещая частоту излучения от линии резонансного поглощения, можно существенно, в разы, увеличить дальность распространения луча. Расширяя диапазон длин волн, в пределах которого показатель поглощения меняется на несколько порядков, можно естественным образом реализовать преимущество дифференциальной методики лидарных изме-

рений, заключающееся в возможности компенсации фоновой составляющей рассеянного излучения. При заданном распределении концентрации индикатора регистрируемый сигнал существенным образом зависит от показателя поглощения κ , и для любого расстояния существует оптимальное значение $\kappa(\lambda)$, при котором регистрируемый сигнал будет максимальным. Так, в случае резонансного взаимодействия незначительные изменения длины волны в пределах крыла контура линии позволяют менять показатель поглощения на 2—3 порядка.

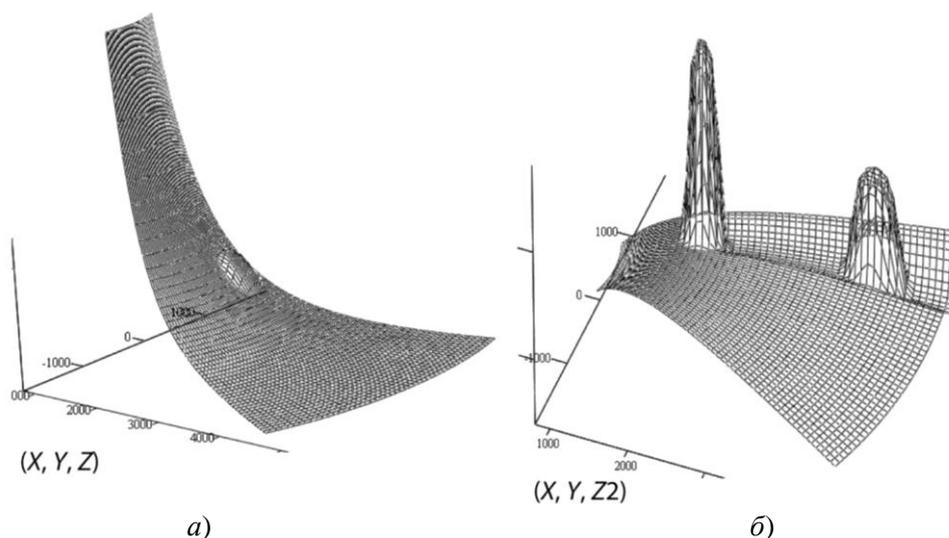


Рис. 1. Результат численного моделирования при рассеянии на водном аэрозоле.
a — регистрируемый сигнал, *б* — результат обработки.
 По горизонтальным осям отложена дальность в метрах.

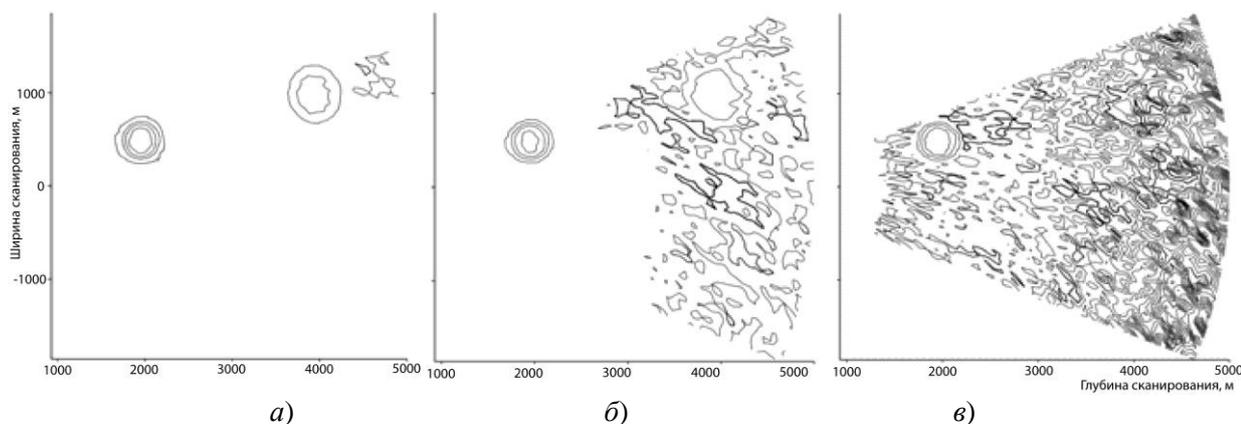


Рис. 2. Результаты моделирования сигнала лидара при различных уровнях шумов
 (средний уровень шумов: *a* — 10 нВт, *б* — 50 нВт, *в* — 200 нВт).

На рис. 3 представлена зависимость дальности обнаружения термика от нормированного на мощность зондирующего сигнала уровня шумов. Расчеты проведены для энергии импульса 10 мкДж и длительности 1 мкс. Площадь приемной апертуры 10 см². При этом задавалось 20 % изменение плотности индикатора над средним уровнем.

При сильнозашумленном сигнале (например, полет в сторону внешнего источника излучения) дальность действия маломощного сверхкомпактного лидара составляет до 1—2 км (т. е. расстояние до ближайшего термика), а при слабозашумленном — до 6 км (в среднем два—три типовых термика). Увеличение энергии зондирующего импульса на один порядок открывает возможность для реализации программного задания этапа полетного маршрута в радиусе до 10 и более километров.

Таким образом, система сканирования воздушного пространства над морской акваторией и прибрежными районами при использовании полупроводниковых и твердотельных лазеров с перестройкой длины волны излучения способна осуществлять поиск и идентификацию восходящих потоков воздуха на расстоянии до 10 км с точностью позиционирования и определения границ от 30 до 150 м, что вполне удовлетворяет требованиям к мало- и среднескоростным морским БПЛА.

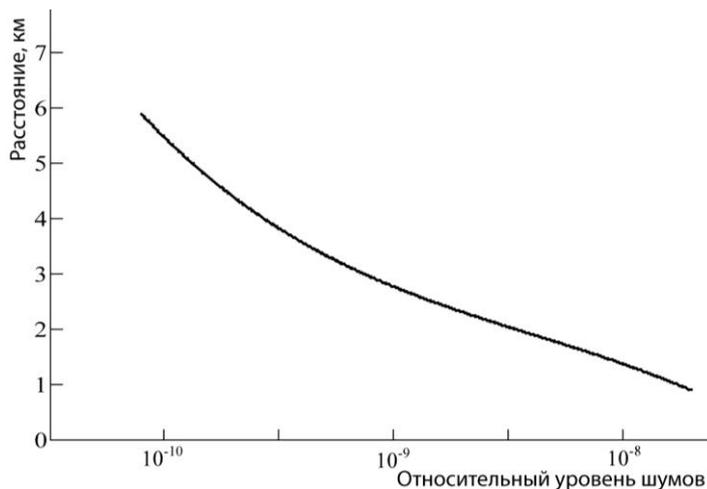


Рис. 3. Зависимость расстояния, на котором регистрируется неоднородность плотности индикатора от нормированного уровня мощности шумов.

Литература

1. Буренок В. М. Современные проблемы планирования развития систем вооружения Российской Федерации и направления их решения // Вооружение и экономика. 2010. № 4 (12). С. 5—11.
2. RQ-7B SADOW. URL: <http://www.marines.com/operating-forces/equipment/aircraft/rq-7-shadow> (дата обращения: 20.09.2013).
3. Cochrane J. McCready theory with uncertain lift and limited altitude. URL: <http://faculty.chicagobooth.edu/john.cochrane/soaring/docs/newmcred.pdf> (дата обращения: 10.10.2013).
4. Хргиан А. Х. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 645 с.
5. Профильный лидар ветровой. URL: <http://www.lsystems.ru/products/9/42> (дата обращения: дата обращения 10.10.2013).
6. Ивлев Л. С., Довгалоук Ю. А. Физика атмосферных аэрозольных систем. СПб.: НИИХ СПбГУ, 1999. 253 с.
7. Матвиенко Г. Г., Банах В. А., Бобровников С. М., Бурлаков В. Д., Веретенников В. В., Кауль Б. В., Креков Г. М., Маричев В. Н. Развитие технологий лазерного зондирования атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 2009. № 10 (22). С. 915—930.

Статья поступила в редакцию 05.05.2014 г.



G. I. Leonovich¹, A. F. Krutov², N. P. Kozlov²

¹Defense Problem Section RAS, Volga department, Samara

²Samara State University

Marine Uav'S Airborne Aerosol Lidar

The article contains materials of scientific studies to assess the possibility of application of airborne compact aerosol lidar to ensure UAV glider flight mode over the sea water area and in coastal strips using ascending air — thermal columns. It is shown that for a considerable increase of the measurement range it's reasonable to work in the wavelengths range near the boundary of the resonance absorption line of indicator components.

Key words: marine UAV, airborne aerosol lidar, thermal columns, glider flight mode.