

## БОРТОВОЙ ЛИДАР ДЛЯ ПОИСКА И ИДЕНТИФИКАЦИИ ВОСХОДЯЩИХ ПОТОКОВ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА

© 2014 Г.И. Леонович<sup>1</sup>, С.А. Матюнин<sup>2</sup>, В.Д. Паранин<sup>2</sup>, А.М. Шорников<sup>2</sup>, М.В. Савельев<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Секция прикладных проблем при Президиуме РАН

<sup>2</sup> Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

<sup>3</sup> Самарский государственный университет

Обосновано применение бортового аэрозольного лидара для поиска и идентификации вертикально направленных потоков атмосферного воздуха - термик. Описаны принцип работы, основные узлы и параметры приёмопередающего узла лидара. Показан алгоритм применения лидара при планерном режиме полёта беспилотного летательного аппарата (БПЛА).

*Термик, лидарное уравнение, бортовой лидар, электрооптический дефлектор, полёт в термиках.*

### Введение

В число критических требований к БПЛА входит длительность беспосадочного полёта. У отечественных беспилотников это время составляет от 1 до 18 часов в зависимости от массы и класса. У лучших зарубежных образцов – до 40 часов (Predator, Euro Hawk, Global Hawk Block 20). Вместе с тем новые и известные научно-технические решения позволяют существенно увеличить время беспосадочного полёта. Например, британский электрический дрон Zephyr компании Qinetiq, использующий солнечные батареи и аккумуляторы, может находиться в воздухе до двух недель. Ещё одно направление - создание гибридных БПЛА. В частности, беспилотник LEMV (Northrop Grumman) осуществляет взлёт по самолётному типу, а при подъёме на требуемую высоту специальные тканевые объёмы заполняются гелием, превращая аппарат в дирижабль. Время полёта – до 21 дня [1]. Ни одно из приведённых и других известных решений пока не способно кардинально увеличить время полёта типового БПЛА (негибридного, без солнечных батарей, без дозаправки в воздухе) до 100 и более часов. Вместе с тем вопрос длительных полётов без силовой установки давно решен в планеризме. Пилоты по ряду косвенных визуальных признаков определяют нахождение восходящих и других, способствующих развитию подъёмной силы, воздушных потоков и могут осуществлять

теоретически неограниченный во времени полёт [2, 3].

До настоящего времени задача определения направления и скорости воздушных масс (пылевые аэрозоли, вихри и т.п.) без определения границ анклавов решается только наземными установками для посадочных трасс в районе аэродрома и в ветрогенераторных зонах (лидары фирм Windtracer, DLR, DRA Malvern, LMD) [4, 5]. Поэтому создание бортовых аэрозольных лидаров и алгоритмов их применения для обеспечения планерного режима полёта в восходящих потоках воздуха является принципиально новой и актуальной.

### Особенности тропосферного аэрозоля, термики

В тропосфере над морской и океанической поверхностью существенную роль играют солевые (хлориды и сульфаты) аэрозоли, над поверхностью суши - органические аэрозоли, а также соединения кремния, глинозёмы, карбонаты, кальциты, окислы железа; над большими городами - аэрозоли антропогенного характера. В процессе исследований авторами определены наиболее информативные компоненты воздушной среды, позволяющие посредством узконаправленного оптического излучения идентифицировать движение тропосферных аэрозольных

анклавов, их физические и геометрические параметры.

Вертикальные конвективные движения воздуха, способствующие развитию подъемной силы БПЛА, как правило, относятся к термикам. Термик – колонна «плавающего» воздуха диаметром 500...1000 м, которая поднимается из приповерхностного слоя до высоты 2...3 км (рис. 1) [2, 3, 6]. В проме-

жутках между термиками, составляющих 1...2 км, присутствуют относительно сильные на границах и в основном слабые широкие области опускающегося вниз воздуха. Термики, подвергаясь воздействию поверхности и других воздушных потоков, размываются и движутся в определенном направлении. Типичное время «жизни» термика 10...30 минут.

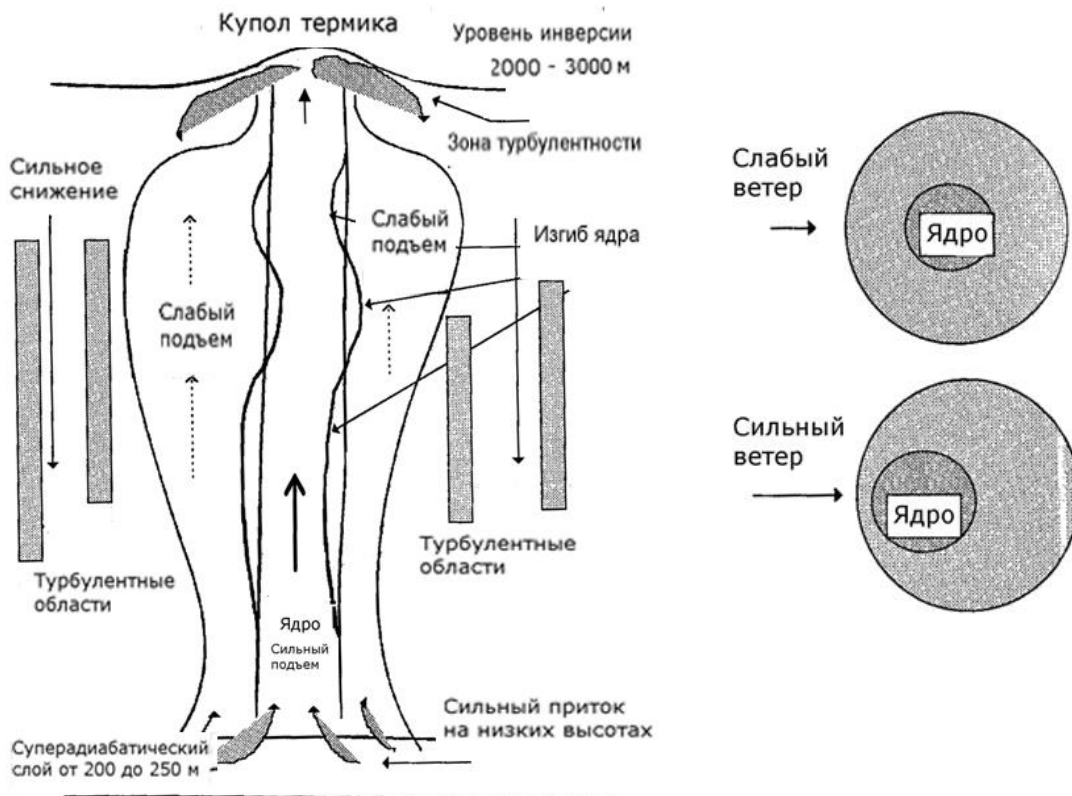


Рис. 1. Структура термика

Выявлено, что для достоверной идентификации восходящих потоков целесообразно проводить корреляционную процедуру идентификации потока одновременно по нескольким информационным компонентам, каждая из которых характеризуется определенной длиной волны взаимодействия со световым лучом. В частности, для достижения необходимой дальности измерений (8...10 км) при малой энергии излучения (до нескольких десятков мкДж) предлагается использовать частоты вблизи края линии резонансного поглощения. Расширяя диапазон длин волн, в пределах которого показатель поглощения меняется на несколько порядков, можно естественным образом реализовать преимущество дифференциальной ме-

тодики лидарных измерений, заключающейся в возможности компенсации фоновой составляющей рассеянного излучения.

### Принцип работы лидара для обнаружения и идентификации термиков

Сигнал, регистрируемый лидаром, можно представить в виде суммы составляющих [7-9]:

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

где  $S_k$  - сигнал, формируемый за счёт одного из механизмов обратного рассеяния (релеевское рассеяние, рассеяние на аэрозоле, резонансное рассеяние и т.д.);  $N_T$  - шумовой сиг-

нал, вызванный посторонней засветкой и флуктуациями сигнала;  $N_0$  - шумы фотоприёмника и электроники.

Каждый из сигналов  $S_k$  в (1) можно представить как свёртку излучаемого импульса с функцией соответствующего отклика

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

В модели однократного рассеяния функция отклика представляется как

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

где  $\eta$  - эффективность переизлучения ( $\eta < 1$ );  $c$  - скорость распространения сигнала ( $c = 3 \cdot 10^5$  км/с);  $\sigma$  - площадь входной апертуры приёмника;  $\kappa(\lambda)$  - показатель поглощения, зависящий от длины волны излучения;  $\rho(z)$  - зависимость плотности исследуемого вещества от продольной координаты  $z$ .

Если  $\rho(z)$  задана как концентрация частиц, то  $\sigma$  представляет собой сечение по-

глощения. Параметр  $\eta$  показывает, какая доля поглощённого излучения снова переизлучается на той же длине волны. Так как сигнал, принимаемый приёмником, сильно уменьшается с увеличением  $z$ , то величина  $\eta$  в значительной степени определяет дальность обнаружения неоднородностей распределения плотности исследуемого вещества. Приведённая выше формула справедлива для  $t \gg t_d$ , где  $t_d = z_d/c$ ,  $z_d = \sqrt{\sigma}$ .

В соответствии с (2) создана математическая модель лидара при различных режимах работы. Проведённые численные эксперименты позволили построить алгоритм работы и сформулировать требования к элементной базе приёмопередающего узла. На рис. 2 приведены результаты одного из вариантов численного моделирования, когда учитывался механизм резонансного рассеяния на парах воды при сканировании в горизонтальной плоскости участка тропосферы перед лидаром. Глубина сканирования - 5 км, ширина - 2 км.

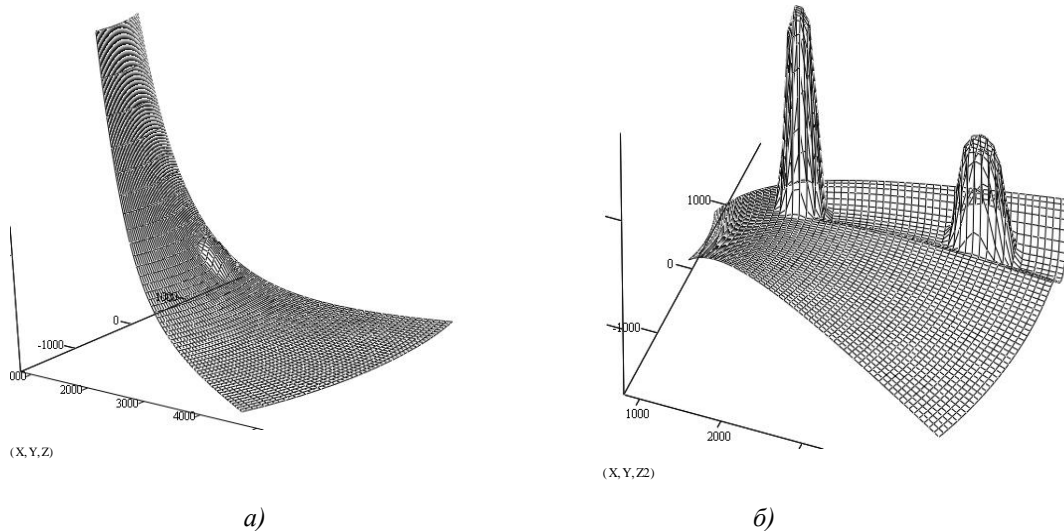


Рис. 2. Результаты численного моделирования лидарного уравнения при резонансном рассеянии на парах воды

В области сканирования введены две неоднородности, соответствующие термикам различной интенсивности и находящиеся на разном удалении от БПЛА. На рис. 2,а видно, что сигнал отклика резко затухает с увеличением расстояния. На основе метода логарифмического преобразования разработан новый алгоритм обработки сигнала, позво-

ляющий скомпенсировать не только уменьшение сигнала с ростом расстояния, но и поглощение, вызванное постоянным (средним) уровнем концентрации измеряемой компоненты воздуха (рис. 2,б).

В реальных условиях эксплуатации имеет место значительный уровень шумов, сопровождающих регистрируемый фотопри-

емником сигнал. Данный фактор существенно влияет на выбор параметров приёмопередающего узла и определяет особенности алгоритма обработки сигнала. В процессе исследований определено, что при заданном распределении индикатора для любого расстояния существует оптимальное значение показателя поглощения, связанного с длиной волны излучения, 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. Например, зондирующий сигнал имеет следующие параметры: мощность в импульсе  $P_u = 10$  Вт, длительностью  $t_u = 1$  мкс, что соответствует энергии 10 мкДж ( типовые полупроводниковые и твердотельные лазеры). Площадь приёмной апертуры 10 см<sup>2</sup>. Задано 20% изменение плотности индикатора над средним уровнем. При сильнозашумлённом сигнале (например, полёт в сторону внешнего источника излучения) дальность действия маломощного сигнала составляет до 1...2 км (т.е. расстояние до ближайшего термика), а при слабозашумлённом – до 6 км (в среднем два-три типовых термика). Увеличение энергии зондирующего импульса на один порядок открывает возможность для реализации программного задания этапа полётного маршрута в радиусе до 10 и более километров.

### Элементная база приёмопередающего узла бортового лидара

Основными требованиями, предъявляемыми к приёмопередающей части лидара, являются: малая длительность импульса лазерного излучения, а также мощность источника излучения и чувствительность фотоприёмника, достаточные для обеспечения планерного режима БПЛА при небольших массогабаритных показателях оборудования. В результате проведённых исследований выявлено, что существующие твердотельные и полупроводниковые лазеры, кремниевые фотоумножители и модули счёта единичных фотонов позволяют реализовать компактные приёмопередающие узлы, обеспечивающие дальность

действия от 1,5...2 до 10...15 км с разрешением 3...50 м. Например, модули счёта единичных фотонов на основе Si и InGaAs/InP неохлаждаемых лавинных диодов обеспечивают вероятность детектирования единичного фотона в 20...50% в диапазоне 400...650 нм с временным разрешением 50...100 пс. Размеры чувствительной области SPAD-детекторов составляют 20...100 мкм [10]. Достоинством таких детекторов является малое время нарастания и спада TTL импульса (не более 2 нс), а также низкое напряжение питания (5...12 В). Существуют модули SPAD с волоконным вводом оптического излучения, а также двумерные матрицы детекторов для определения биграммы направленности отражённого или рассеянного излучения. Такие матрицы содержат до 1024 детекторов, опрашиваемых с частотой 383...98000 Гц с разрешением АЦП 16...8 бит.

Использование твердотельных электрооптических дефлекторов в системах зондирования состояния и состава атмосферы [10, 11] привлекательно за счёт возможности снижения массы и габаритов, улучшения надёжности и существенного повышения быстродействия по сравнению с зеркальными механическими системами. Однако известные электрооптические дефлекторы имеют малые углы отклонения, порядка миллирадиан, что обусловлено их низкой чувствительностью к управляющему напряжению. Это ограничивает практическое внедрение дефлекторов в лидарных комплексах. Выявлена возможность увеличения диаметра зондирующего луча для снижения расходимости зондирующего излучения без увеличения управляющего напряжения при использовании стандартных методов микроэлектроники и тонкоплёночной оптики. Разработанный электрооптический дифракционный дефлектор (ЭОДД) позволяет резко (в сотни раз) увеличить скорость горизонтального и вертикального сканирования термиков, достичь дискретных углов отклонения в десятые доли – единицы градуса в видимом и ближнем ИК диапазонах. На рис. 3 показаны диаграммы направленности, формируемые ЭОДД, который рассчитан для наклонного падения под углом  $\alpha = 7\pi/16$  (78,75°) на z-срез кристалла

$Ba_{0,25}Sr_{0,75}Nb_2O_6$ . У-ось ориентирована перпендикулярно управляющим электродам.

Длина волны излучения  $\lambda=0,633$  мкм, число градаций фазовой функции  $N_{gr}=3$ .

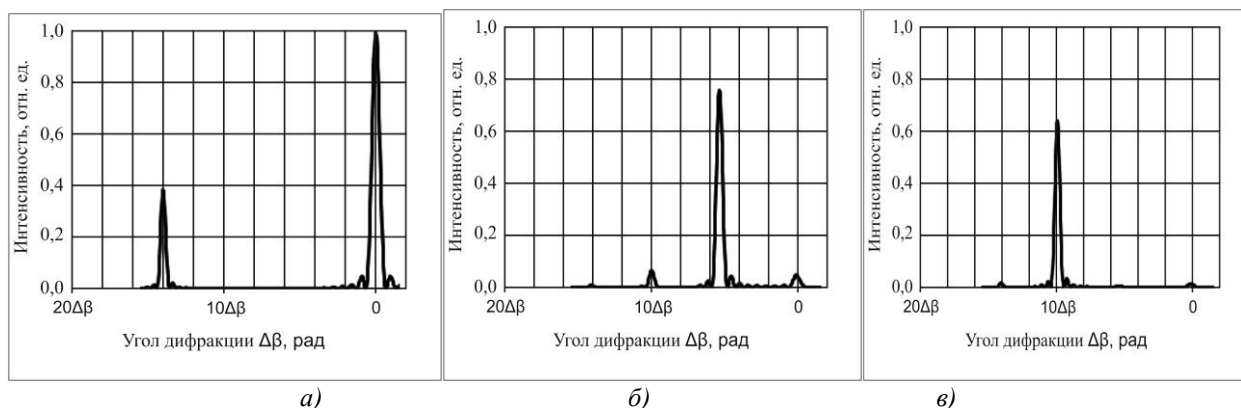


Рис. 3. Диаграммы направленности ЭОДД при напряжениях: а)  $\Delta U_i = 0$  В; б)  $\Delta U_i = 67$  В; в)  $\Delta U_i = 134$  В

Индукцируемые управляющим напряжением максимумы диаграммы направленности равномерно распределены между нулевым и первым максимумами. Количество новых максимумов определяется числом уровней квантования фазовой функции и для конструктивно несложных источников напряжения составляет от 2 до 4. Превышение полуволнового напряжения создаёт максимумы направленности между 1-м и 2-м дифракционными максимумами. Для оперативного выявления и определения структуры термиков возможно создание быстродействующего вибро- и удароустойчивого ЭОДД, рассчитанного на управление оптическим излучением с  $P_u = 100 \dots 1000$  Вт.

### Алгоритм полёта в термиках БПЛА с бортовым лидаром

Наличие бортового лидара для обнаружения и определения параметров термиков предопределяет следующий алгоритм полёта с использованием известных методик [2, 3]. В момент обнаружения термика БПЛА перемещается к нему, а затем, используя механизм центрирования в потоке, набирает высоту, двигаясь по спиралевидной траектории вокруг центра (рис. 4). В процессе подъема аппарат обнаруживает следующий термик, после набора высоты в восходящем потоке переходит в режим планирования и остается в нём, пока высота не станет меньше некоторого заданного порога, перелетая, таким образом, к следующему термику. Цикл повторяется при полёте по некоторому заданному маршруту.

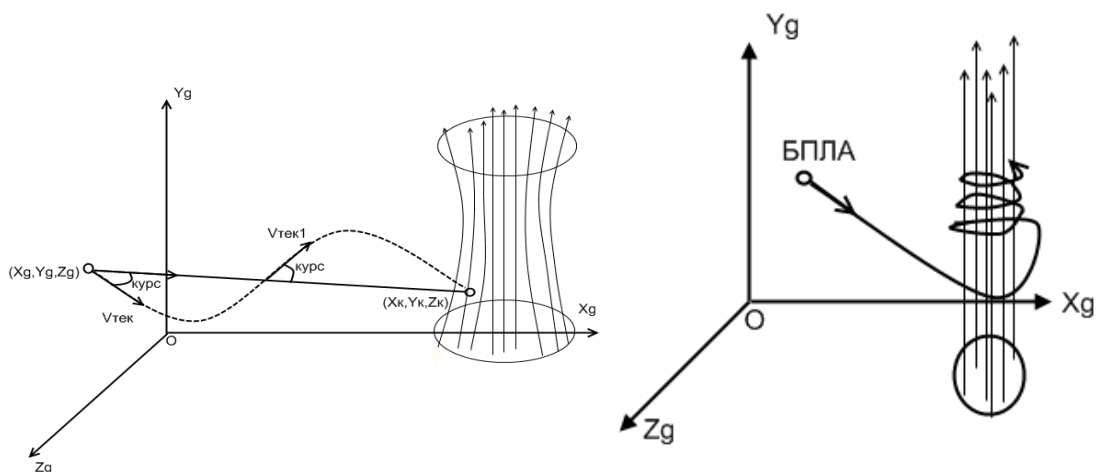


Рис. 4. Планирование БПЛА по программной траектории

Расчёт полёта включает в себя две задачи:

1) до начала полёта, необходимо определить запас высоты, необходимый для полёта на рассчитанное с применением лидара расстояние;

2) с момента начала полёта определить, с какой максимальной скоростью выполнять полёт, чтобы израсходовать весь имеющийся запас высоты, но не более.

Ввиду сложности нелинейной модели полёта возникают трудности при её реализации программными и аппаратными средствами. Поэтому принято линеаризовывать движение с разбивкой на элементарные составляющие [3].

С использованием аэродинамически устойчивой модели планера проведено моделирование процесса поведения БПЛА в неспокойной атмосфере при наличии термиков и других воздушных потоков и течений. Линеаризованные соотношения и полученные на их основе законы управления позволили создать модель автоматической системы управления механизацией БПЛА. Модель

позволяет с достаточно высокой степенью точности рассчитать поведение планера в термиках при различных условиях эксплуатации.

### Выводы

В процессе анализа известных и перспективных лазерных систем и результатов проведённых экспериментов разработаны математическая модель и алгоритм обработки данных, посредством которых выявлено, что система сканирования воздушного пространства над подстилающей поверхностью при использовании полупроводниковых и твердотельных лазеров способна осуществлять поиск и идентификацию восходящих потоков воздуха на расстоянии до 10 км с точностью позиционирования и определения границ от 3 до 50 м. Определён состав и требования к приёмопередающему узлу лидара, приведены параметры разработанного электрооптического дифракционного дефлектора. Представлен алгоритм планерного режима полёта БПЛА с использованием бортового лидара.

### Библиографический список

1. The Drone Wars: 9/11 Inspired Advances in Robotic Combat. <http://www.livescience.com/15908-drone-wars-september-11-anniversary.html>.
2. Райхман Х. Полеты на планерах по маршрутам. Таганрог: ДОСААФ СССР, 1982. 130 с.
3. Cochrane J. McCready theory with uncertain lift and limited altitude. URL: <http://faculty.chicagobooth.edu/john.cochrane/speaking/docs/newmcred.pdf>.
4. Лазеры для прогнозирования направления ветра. URL: [http://www.lockheedmartin.com/content/dam/lockheed/data/space/documents/windtracer/WindTracer\\_Fact\\_Sheet.pdf](http://www.lockheedmartin.com/content/dam/lockheed/data/space/documents/windtracer/WindTracer_Fact_Sheet.pdf).
5. Профильный лидар ветровой. URL: <http://www.lsystems.ru/products/9/42>.
6. Pinnick R.G., Rosen J.M., Hofmann D.J. Stratospheric aerosol measurements. III. Optical model calculations // J. Atmos. Sci., 1976, 33, № 2, pp. 304-314.
7. Ивлев Л.С., Довгало Ю.А. Физика атмосферных аэрозольных систем. СПб.: НИИХ СПбГУ, 1999. 253 с.
8. Зуев В.В., Ельников А.В., Бурлаков В.Д. Лазерное зондирование средней атмосферы / Под общ. Ред В.В. Зуева. Томск: изд-во РАСКО, 2002. 352 с.
9. 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//№10 (22) / 2009. с. 915-930.
10. Матюнин С.А., Леонович Г.И., Паранин В.Д.. Управляемые многокомпонентные интерференционно-дифракционные оптические элементы. Самара: изд-во СНЦ РАН, 2010, 263 с.
11. Qing Y. et al. Experimental investigation of optical beam deflection based on PLZT elec-

tro-optic ceramic // Optics Express, 2007, vol.15, № 25, pp.16933-16944.

### Информация об авторах

**Леонович Георгий Иванович**, доктор технических наук, профессор, начальник Поволжского отделения, Секция прикладных проблем при Президиуме РАН. E-mail: [leogi1@mail.ru](mailto:leogi1@mail.ru). Область научных интересов: системы управления, информационно-измерительные устройства и системы.

**Матюнин Сергей Александрович**, доктор технических наук, профессор кафедры конструирования и технологии электронных систем и устройств, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [kipres@ssau.ru](mailto:kipres@ssau.ru). Область научных интересов: волоконно-оптические датчики, информационно-измерительные устройства и системы.

**Паранин Вячеслав Дмитриевич**, ассистент кафедры конструирования и производства электронных систем и устройств, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика

С.П.Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [vparanin@mail.ru](mailto:vparanin@mail.ru). Область научных интересов: волоконно-оптические датчики, промышленная автоматизация, технология микроэлектроники.

**Шорников Андрей Юрьевич**, магистр, Самарский государственных аэрокосмический университет имени академика С.П.Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [serandru33@mail.ru](mailto:serandru33@mail.ru). Область научных интересов: динамика полёта космических аппаратов, динамика полёта малых летательных аппаратов, беспилотные летательные аппараты.

**Савельев Максим Валерьевич**, аспирант кафедры оптики и спектроскопии, Самарский государственный университет. E-mail: [belchonokenot@mail.ru](mailto:belchonokenot@mail.ru).

Область научных интересов: нелинейная оптика, динамическая голография.

## AIRBORNE LIDAR IN ENSURING GLIDING UAV FLIGHT MODE

© 2014 G.I. Leonovich<sup>1</sup>, S.A. Matyunin<sup>2</sup>, V.D. Parani<sup>2</sup>, A.M. Shornikov<sup>2</sup>, M.V.Savelyev<sup>3</sup>

<sup>1</sup>The Section of applied problems at the Presidium of the RAS, Samara, Russian Federation

<sup>2</sup>Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

<sup>3</sup>Samara state University, Samara, Russian Federation

The application of airborne aerosol lidar to search and identify the vertical direction of air flow - thermals. Describes the working principle, the basic components and parameters of the LIDAR transceiver node. The algorithm application in LIDAR glider mode in summer UAV.

*Thermals, LIDAR equation, airborne LIDAR, electro-optical deflector, flying in thermals.*

### References

1. The Drone Wars: 9/11 Inspired Advances in Robotic Combat. <http://www.livescience.com/15908-drone-wars-september-11-anniversary.html>
2. H. Reichman glider flight routes / Per. German, Tagan-horn: DOSAAF., 1982, 130.
3. Cochrane J. McCready theory with uncertain lift and limited altitude-<http://faculty.chicagobooth.edu/john.cochrane/soaring/docs/newmcred.pdf>.
4. Lasers for predicting the direction of the wind. URL: [http://www.lockheedmartin.com/cotnent/dam/lockheed/data/space/documents/windtracer/WindTracer\\_Fact\\_Sheet.pdf](http://www.lockheedmartin.com/cotnent/dam/lockheed/data/space/documents/windtracer/WindTracer_Fact_Sheet.pdf).
5. Profiled wind lidar. URL: <http://www.lsystems.ru/products/9/42>.



6. Pinnisk R.G., Rosen J.M., Hofmann D.J. Stratospheric aerosol measurements. III. Optical model calculations // J. Atmos. Sci., 1976, 33, № 2, pp. 304-314.
7. Ivlev LS, YA Dovgaluk Physics atmospheric aerosol systems. St. Petersburg.: NIIH State University, 1999. 253 p.
8. Zuev VV, Elnikov AV Boatmen VD Laser sounding of the middle atmosphere / Under total. Rev. V. Zuev. Tomsk: Izd RASCO, 2002. 352 p.
9. Matvienko GG, Banakh VA Bobrov employees SM, Boatmen VD, spindles employees VV, BV Kaul, Krekov GM Marichev In . N. Technology development of laser sensing of the atmosphere / Atmospheric and Ocean Optics // № 10 (22) / 2009. P. 915-930. (In Russ.)
10. Matyunin SA, Leonovich GI, Para-nin VD. Managed multicomponent interference-diffractive optical elements. Samara publ SSC RAS, 2010, 263 p.
11. Qing Y. et al. Experimental investigation of optical beam deflection based on PLZT electro-optic ceramic // Optics Express, 2007, vol.15, № 25, pp.16933-16944.

### About the authors

**Leonovich Georgy Ivanovich**, Doctor of technical sciences, professor, head of department of the Volga, the butt section problems of the Presidium of RAS. E-mail: [leo-gil@mail.ru](mailto:leo-gil@mail.ru). Area of research: management systems, information-measuring devices and systems.

**Matyunin Sergey Aleksandrovich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, E-mail: [kipres@ssau.ru](mailto:kipres@ssau.ru). Area of research: fiber-optic sensors, information-measuring devices and systems

**Paranin Vyacheslav Dmitrievich**, assistant, Department of Design and Manufactur-

ing of Radio-Electronics Systems and Devices. E-mail: [vparanin@mail.ru](mailto:vparanin@mail.ru). Area of research: fiber-optic sensors, industry automation, technology of microelectronics.

**Shornikov Andrei Urievich**, magister, Samara State Aerospace University. E-mail: [serandru33@mail.ru](mailto:serandru33@mail.ru). Area of research: dynamic of flights of space aircraft, dynamic of flights of small inhabitant aircrafts, UAV.

**Savelyev Maxim Valeriyovych**, post-graduate student of Chair of Optics and Spectroscopy of Samara State University. E-mail: [belchonokenot@mail.ru](mailto:belchonokenot@mail.ru). Area of research: nonlinear optics and dynamic holography.