

Использование изображений объектов для анализа параметров воздушной среды в окрестности движущихся объектов

Картуков А.В.*, Меркишин Г.В., Назаров А.Н.***, Егоров В.В.******

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, 125993, Россия

**e-mail: ankartukov@mail.ru*

***e-mail: merkishingv@mail.ru*

****e-mail: prapor068@gmail.com*

*****e-mail: skb-4@bk.ru*

Статья поступила 12.03.2020

Аннотация

Задачи контроля, оценки положения летательного аппарата (ЛА) и взаимодействия с окружающей средой весьма важны в авиационной технике. На больших расстояниях они решаются, в основном, в радиодиапазоне (радиолокация). На малых дальностях в окрестности ЛА весьма эффективны методы оптического диапазона, поскольку длина волны на несколько порядков меньше и позволяет достичь высокой точности измеряемых параметров [1, 2, 3].

Ключевые слова: аэродинамические исследования, ламинарный и турбулентный поток, рефракция оптического сигнала, анализ искажений изображения на неоднородностях воздушной среды.

Движение различных объектов (автомобиль, самолет, вертолет) сопровождается их взаимодействием с воздушной средой. Аэродинамические параметры объекта необходимы для расчета его скоростных характеристик и определения возможностей их улучшения. Обычно измерения аэродинамических характеристик проводят в аэродинамических трубах, используя уменьшенные модели объектов. Аэродинамическая труба имеет довольно большую и сложную конструкцию, требующую высококвалифицированного обслуживания.

Возможна регистрация аэродинамических параметров воздушной среды, возникающих при движении объекта [4, 5, 6]. Похожие методы используются при анализе качества топлива [7, 8]. Особую группу составляют исследования, связанные с лопастями несущего винта вертолета с образованием вихрей и спиральных потоков [9, 10]. Сложность экспериментального исследования аэродинамических параметров вертолета приводит к необходимости использования методов численного моделирования [11, 12].

Использование искажений изображений объекта позволяет относительно простой технической реализацией получить необходимую информацию по параметрам воздушной среды [13], а также по турбулентности «чистого» неба [14]. Маловысотный сдвиг ветра обнаруживается доплеровскими системами [15, 16].

Измерение плотности газа

Основные методы исследования поля плотностей газа можно разделить на 3 группы: основанные на зависимости коэффициента преломления света от плотности газа; на поглощении лучистой энергии газом и основанные на послесвечении

молекул газа при электрическом разряде. Последние 2 группы методов применимы для исследования плотности газа при низких давлениях. Из методов 1-й группы применяются метод Тёплера ("шлирен"- метод) и интерферометрический [17]. В них для измерения плотности пользуются зависимостью между плотностью ρ газа и коэффициентом преломления света n :

$$(1/\rho) (n^2 - 1) / (n \cdot n + 2) = \text{const}$$

При обтекании тела сжимаемой средой в областях, где имеются возмущения газа, вызванные обтекаемым телом, возникают поля с неоднородным распределением плотности (поля градиентов плотности). Отдельные участки поля с разной плотностью по-разному отклоняют проходящий через них луч света. Часть отклоненных лучей не пройдет через фокус приёмника прибора Тёплера, т. к. его срезает непрозрачная пластина, т.н. нож Фуко [1, 8], в результате получается местное изменение освещённости экрана (фотопластинки). Полученные фотографии позволяют качественно анализировать характер обтекания модели, на них хорошо видны области значительных изменений плотности: ударных волн, зон разрежения и т.п.

Количественные данные о плотности газа и величине изменения (градиенте) плотности можно получить, сравнивая при помощи микрофотометра изменение освещённости экрана, вызванное градиентом плотности в исследуемом течении, с изменением освещённости, вызванной эталонной стеклянной линзой, расположенной вне потока аэродинамической трубы: точкам в поле потока и на линзе, имеющим одинаковую освещённость, соответствует равенство коэффициента

преломления. По найденным таким образом значениям коэффициент преломления в поле течения вычисляют плотность газа и величину градиента плотности для всего исследуемого поля. Кроме фотометрического метода, для количественного анализа поля плотностей пользуются и другими методами.

Метод исследования течений газа при помощи интерферометра также основан на зависимости между плотностью газа и коэффициентом преломления. Для этого обычно пользуются интерферометром Маха - Цендера [1, 9]. Одно из важных преимуществ оптических методов — возможность исследования газовых течений без помощи зондов и насадок различных типов, являющихся источниками возмущений в потоке.

Ниже рассматривается новый метод быстрой качественной оценки аэродинамических свойств движущегося объекта по искажениям изображения эталонного предмета под действием турбулентного следа. Набор эталонных предметов, установленных вдоль трассы движения, позволяет определить размеры турбулентного следа, влияние конструктивных элементов объекта и оценить их роль в создании аэродинамического сопротивления.

На рис. 1 показано влияние турбулентного следа после проезда автомобиля на изображение прямолинейной рейки, укрепленной на трассе движения.



Рис. 1. Турбулентность среды после проезда автомобиля приводит к размытому изображению в средней части стержня.

В непосредственной близости от поверхности движущегося в воздушной среде предмета существует градиент давления dP/dx , где x – нормаль к поверхности. Скорость электромагнитной волны C , распространяющейся параллельно поверхности предмета, равна $C = c/n$ [20], где c – скорость света в вакууме, n – показатель преломления среды. Зависимость скорости C и давления P показана на графике рис. 2 [21]. Чем больше давление, тем меньше скорость распространения волны.

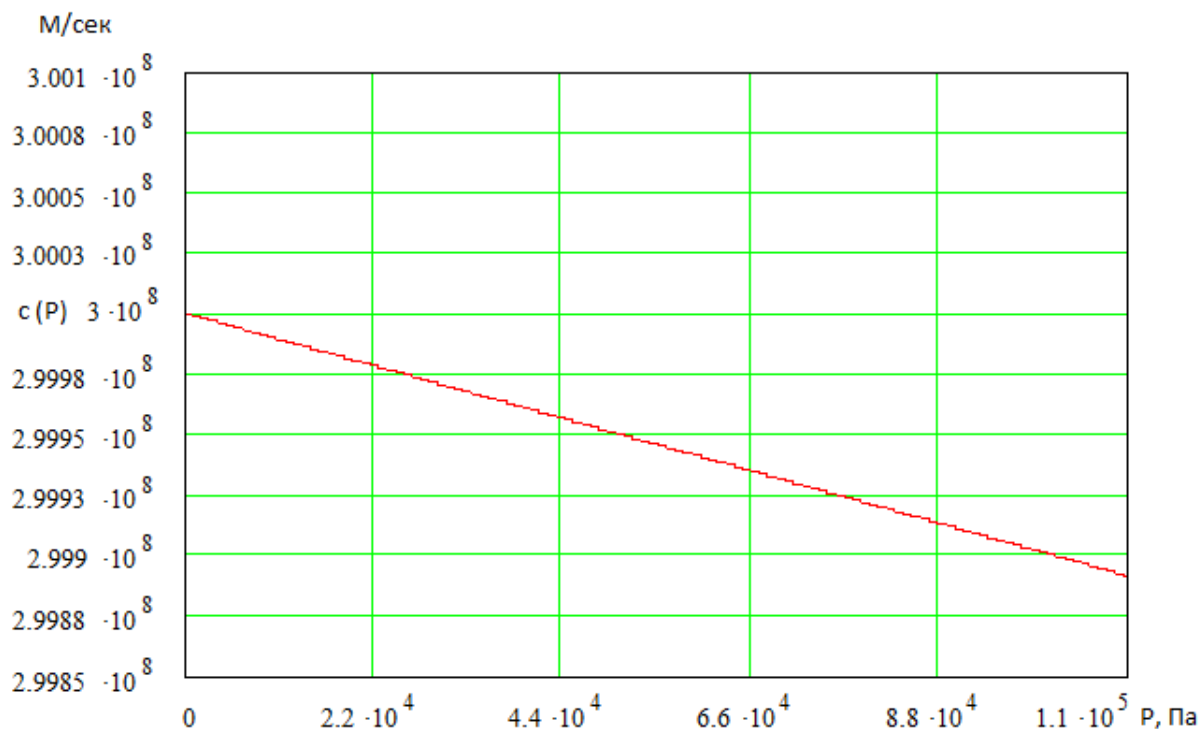


Рис.2. Зависимость скорости C от давления P .

На рис.3 луч 1 распространяется со скоростью C_1 , луч 2 – со скоростью C_2 .

В результате через некоторое время Δt луч 1 проходит расстояние $S_1 = C_1 \Delta t$, а луч 2 - расстояние $S_2 = C_2 \Delta t = S_1 + dS$ (если $C_1 < C_2$). В этом случае фронт волны получает наклон и электромагнитная волна отклоняется на угол α от первоначального направления: $\alpha \approx dS/d$, где $dS = S_2 - S_1$, d - сечение потока электромагнитной энергии.

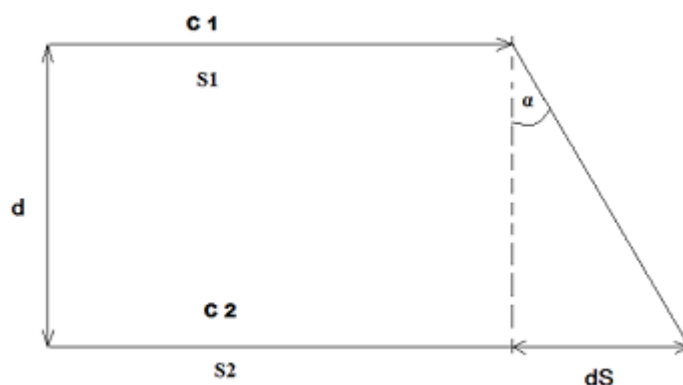


Рис. 3. Возможное отклонение луча от первоначального направления

Роль длительности экспозиции не является существенной для демонстрации эффекта в данном случае: объект наблюдения неподвижен.

Ниже рассматривается возможность использования изображений предметов, находящихся на заднем плане сцены, содержащей движущийся объект.

В первом эксперименте (рис. 1) на обочине автомобильной городской дороги устанавливался вертикально стержень, высотой 2 м и диаметром 2 см.

С другой стороны дороги проводилась видеосъемка. При проезде автомобиля около стержня его изображение искажалось. В области ламинарного течения (в верхней части стержня) изображение трансформируется и приобретает наклонный участок. Нижняя часть стержня не изменяет формы, но изображение ее размывается, становится нерезким, что объясняется действием турбулентности потока. Таким образом, анализируя искажения изображения стержня, можно найти границу ламинарного и турбулентного потоков.

Проведено также исследование изображения вертолета, зависшего над трибуной стадиона. На нём можно выделить ламинарные и турбулентные участки

воздушной среды, что позволит находить опасные и критические положения вертолета при сложном рельефе подстилающей поверхности.

На рис. 4 представлена фотография вертолета на стадионе. Обводы 1, 2, и 3 выделяют области искажений прямолинейных элементов конструкции стадиона на заднем плане (рейки и столбы). В области лопастей вертолета они получают наклон, связанный с рефракцией оптического сигнала на ламинарном слое потока воздуха. Турбулентность воздушной среды проявляется в размытом характере изображения горизонтальных реек справа от двигателей вертолета.



Рис. 4. Искажения изображения элементов конструкции стадиона из-за рефракции на неоднородностях воздушной среды.

По величине углового смещения изображений можно рассчитать толщину ламинарного слоя, а также создаваемого им давления.

На рис. 5 показана фотография движущегося автомобиля. На заднем плане белый стержень также получил наклон вправо из-за рефракции в ламинарном слое: отклонение луча происходит в неоднородной воздушной среде в направлении большей плотности. Изображение движущегося автомобиля размыто вследствие большой экспозиции.

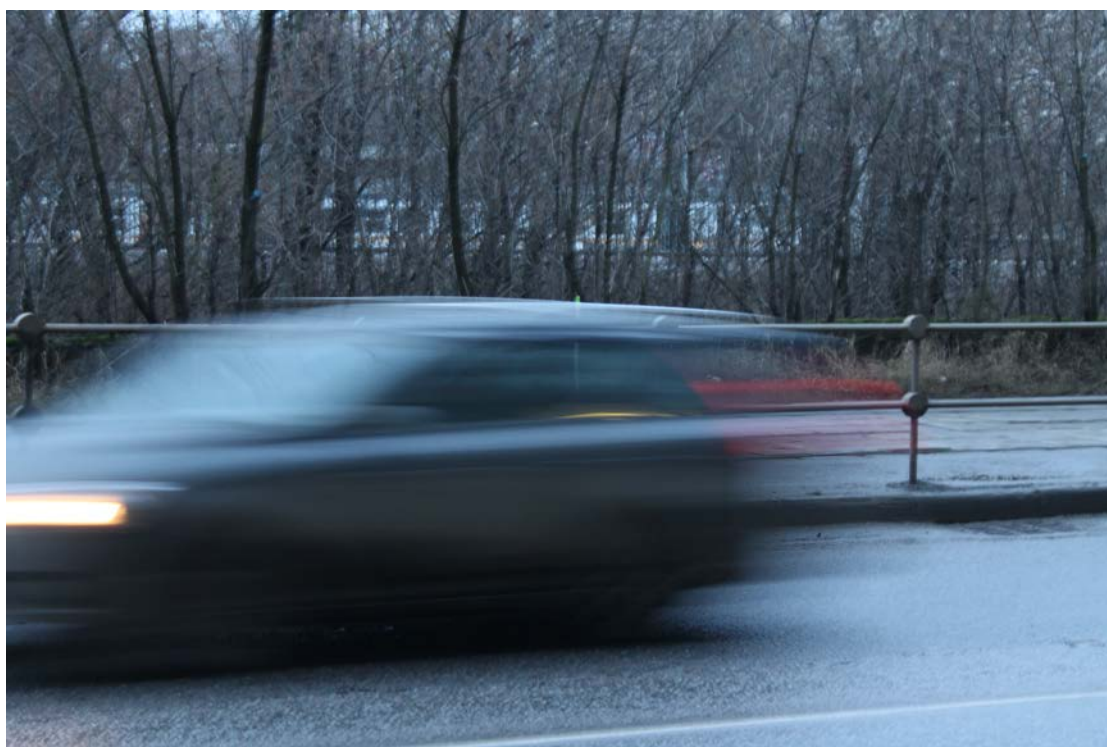


Рис. 5. Искажение изображения стержня на заднем плане.

На рис. 6 движение автомобиля типа «Седан». Белый стержень на заднем плане отклонился в ламинарном слое также вправо. Из-за меньшей скорости (по сравнению с лопастями вертолета) эффект выражен не столь ярко.



Рис. 6. На заднем плане белый стержень отклонился вправо.

Рис. 7 представляет изображение белого стержня, размытое в нижней его части, что обусловлено превращением ламинарного слоя в турбулентный после проезда автомобиля.



Рис. 7. Турбулентность среды после проезда автомобиля приводит к размытому изображению в средней части стержня.

Действие ламинарного слоя наблюдается на рис. 8 (автомобиль типа «Седан»).

Основная часть стержня здесь закрыта корпусом автомобиля.

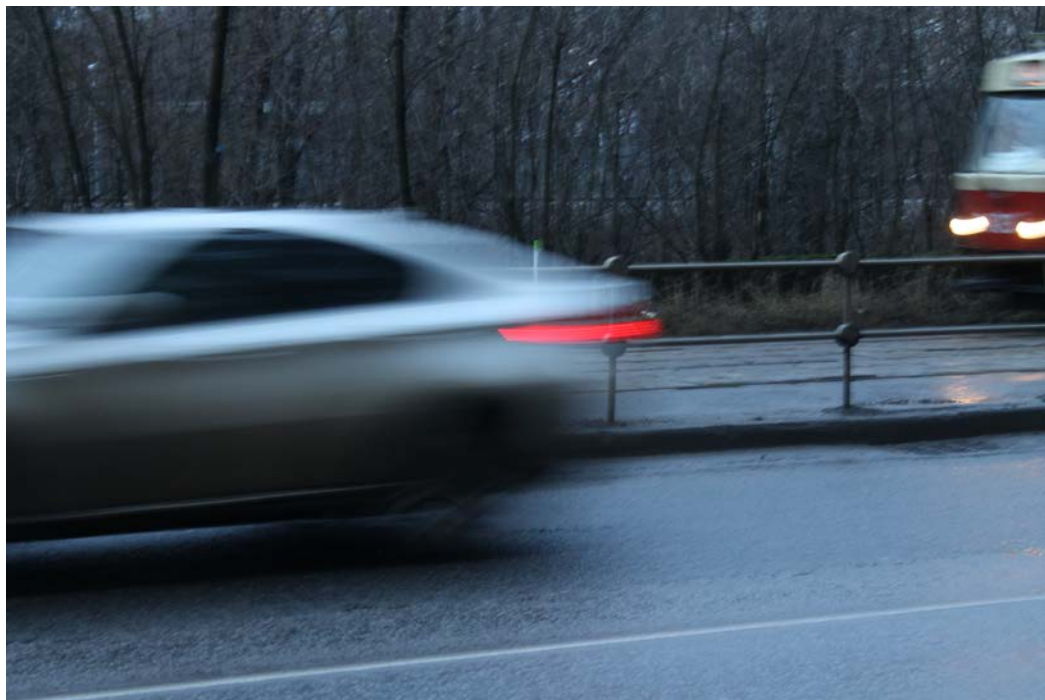


Рис. 8. Изгиб стержня из-за ламинарного слоя.

На рис. 9 (автомобиль типа «Джип») показан изгиб стержня в другую сторону—влево. Изображение стержня попало в область перепада давлений при резком изменении формы автомобиля.



Рис. 9. Изгиб стержня в области резкого изменения формы автомобиля.

Плавное изменение формы автомобиля (рис. 10 — автомобиль типа «Седан») в аналогичном расположении стержня дает обратный эффект — стержень изогнут вправо.



Рис. 10. Изгиб стержня при плавном изменении формы автомобиля.

Рис. 11 демонстрирует «размывание» изображения стержня турбулентностью воздушной среды после проезда автомобиля и небольшой изгиб от действия ламинарной составляющей.



Рис. 11. «Размывание» изображения стержня из-за турбулентности среды и изгиб от действия ламинарной составляющей.

Отметим, что на приведенных выше фотографиях автомобиля эффект искажений изображений проявляется не особенно ярко, т.к. с целью упрощения технической реализации эксперимента скорость движения автомобилей была относительно небольшой (20—40 км/ч—движение сразу после светофора). Для практического использования более целесообразным является регистрация искажений на скоростях автомобиля, соответствующих основному диапазону практического применения автомобиля.

Алгоритм обработки зарегистрированных изображений включает в себя ряд последовательных операций для определения градиента давления:

1. Определяется угол α (рис.3) как отношение величины dS сдвига точки на искаженном изображении к длине пути, пройденного лучом от рассматриваемой точки в возмущенной среде за автомобилем, т.е.

к ширине автомобиля W как показано на Рис. 12.

С другой стороны $dS = C_2 \cdot t - C_1 \cdot t$, где $t = W/c$,

t — время прохождения световой волной расстояния W .

2. Используя зависимость скорости распространения света от давления $C(P)$, приведённой на рис.2 в виде прямой $C = m - k \cdot P$, где m и k — параметры прямой, и предполагая, что луч 2 проходит в области с нормальным давлением (нет искривления в изображении контура рейки), определяем приращение давления (в области луча 1) как соответствующее углу α через сдвиг точки изображения.

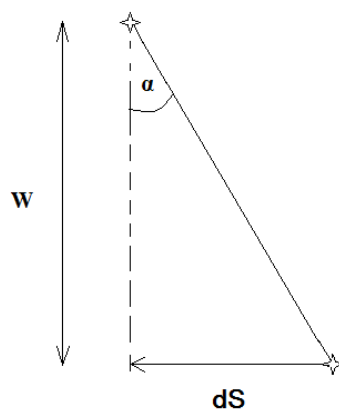


Рис. 12. Сдвиг точки изображения dS на длине пути W .

Заключение

1. Анализируя результаты [22, 23] описанных экспериментов, можно утверждать, что электромагнитные волны оптического диапазона достаточно чувствительны к неоднородностям воздушной среды и могут быть использованы для получения информации по системе «движущийся объект-среда».
2. Данный метод можно использовать для анализа аэродинамических параметров новых конструктивных элементов, устанавливаемых на движущийся объект, без применения сложного и дорогостоящего оборудования.

По сравнению с известным способом использования аэродинамических труб описанный способ имеет следующие преимущества.

- метод не требует изготовления высокоточной модели исследуемого объекта;
- метод не требует высококвалифицированного обслуживания;
- в ряде случаев возможно экспериментальное исследование, не реализуемое в аэродинамической трубе (например, для вертолета);
- не требует наличия в рабочей зоне элементов крепления и съема информации, искажающих поток;
- используя набор эталонных реек (растровое поле), возможно построение трёхмерных моделей структуры «атмосфера-объект».

Библиографический список

1. Abashev V.M., Prudnicov A.G., Son E.E. Modern research areas of solid hypersonic ramjet engines // 29-th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, (St. Petersburg, 7-12 sept. 2014), URL: https://icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2014/data/papers/2014_0904_paper.pdf
2. Тарасенко О.С., Бодрышев В.В., Абашеев В.М. Метод цифровой обработки теневых снимков сверхзвукового обтекания элементов конструкций летательных аппаратов // Труды МАИ. 2015. № 83. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=62032>
3. Berens T.M. et al. Numerical and Experimental investigations on Highly Integrated Subsonic air intakes // 52nd Aerospace Sciences Meeting, January 2014, National Harbor, MD, USA. DOI: [10.2514/6.2014-0722](https://doi.org/10.2514/6.2014-0722)
4. Картуков А.В., Меркишин Г.В., Назаров А.Н., Никитин Д.А. Регистрация аэродинамических параметров возмущений среды при движении объекта // Труды МАИ. 2016. № 90. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=74822>
5. Картуков А.В., Меркишин Г.В., Назаров А.Н., Никитин Д.А., Субботин П.В. Измерение параметров воздушной подушки при посадке самолета // Электросвязь. 2016. № 12. С. 46 – 48.
6. Козинцев В.И., Орлов В.М., Белов И.А. и др. Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 528 с.

7. Дейвис Ш.М., Ландгребе Д.А., Филлипс Т.Л. и др. Дистанционное зондирование: количественный подход. - М.: Недра, 1983. - 415 с.
8. Герман М.А. Космические методы исследования в метеорологии. - Л.: Гидрометеиздат, 1985. - 351 с.
9. Gupta A.K., Lilley D.G., Syred N. Swirl flows. Abacus Press, Tunbridge Wells, England, 1984, 475 p. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0010-2180\(86\)90133-1](http://dx.doi.org/10.1016/0010-2180(86)90133-1)
10. Huang Y., Yang V., Dynamics and stability of lean-premixed swirl-stabilized combustion // Progress in Energy and Combustion Science, 2009, vol. 35, issue 4, pp. 293 - 364. DOI: [10.1016/j.pecs.2009.01.002](http://dx.doi.org/10.1016/j.pecs.2009.01.002)
11. Игнаткин Ю.М., Макеев П.В., Шомов А.И. Численное моделирование интерференции между несущим и рулевым винтами вертолета при вертикальном снижении, включая режим "вихревого кольца" несущего винта // Труды МАИ. 2013. № 69. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=43135>
12. Игнаткин Ю.М., Макеев П.В., Шомов А.И. Исследование аэродинамических характеристик несущего винта вертолета на режиме "вихревое кольцо" на базе нелинейной вихревой теории // Вестник Московского авиационного института. 2009. Т. 16. № 6. С. 11 – 15.
13. Картуков А.В., Меркишин Г.В., Назаров А.Н., Никитин Д.А. Использование изображений объектов для анализа параметров воздушной среды в окрестности движущихся объектов // 15-я Международная конференция "Авиация и космонавтика-2016": тезисы докладов (Москва, 14-18 ноября 2016). - М.: Изд-во МАИ, 2016. С. 58 - 59.

14. Страх полета. Ч.1. // Популярная механика. 2009. URL: <https://www.popmech.ru/adrenalin/9195-strakh-poleta-chast-1-fobiya>
15. Белоцерковский А.С. и др. Патент RU 2324953 С2. Интегрированная система вихревой безопасности летательного аппарата, 20.05.2008.
16. Баранов Н.А., Белоцерковский А.С., Каневский М.И., Пасекунов И.В. Патент RU 2324203 С1. Способ и система предупреждения о возможности попадания самолета в опасную зону вихревого следа генератора вихрей, 10.05.2008.
17. Валис Н.А. Растровые оптические приборы. - М.: Машиностроение, 1966. - 207 с.
18. Скоков И.В. Оптические интерферометры. - М.: Машиностроение, 1979. – 128 с.
19. Sharma K.K. Optics: principles and applications, Academic Press, 2006, 656 p.
20. Horst Kuchling. Physik, Veb Fachbuchverlag Leipzig, 1980, 653 p.
21. Меркишин Г.В., Афонин К.Н. Оценка изменения фазы когерентного сигнала в среде с акустическими колебаниями // 16 Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»: сборник трудов (Севастополь, 11-15 сентября 2006). – Севастополь: Вебер, 2006. С. 499 – 500.
22. Митрофанов А.А. Контроль сборки летательных аппаратов: Оптические и лазерные методы. - М.: Машиностроение, 1989. – 207 с.
23. Меркишин Г.В. Системы наблюдения: новые принципы построения. - М.: Радиотехника, 2010. – 159 с.

Object images employing for air medium parameters analysis near moving objects

Kartukov A.V.*, **Merkishin G.V.****, **Nazarov A.N.*****, **Egorov V.V.******

Moscow Aviation Institut (National Research University),

MAI, 4, Volokolamskoe shosse, Moscow, 125993, Russia

*e-mail: ankartukov@mail.ru

**e-mail: merkishingv@mail.ru

***e-mail: prapor068@gmail.com

****e-mail: skb-4@bk.ru

Abstract

The tasks of monitoring, position assessing of the aircraft and interacting with the environment are of great importance in the aviation technology. At large distances, they are being solved mainly in the radio range (radar). At short ranges, the optical range methods are very effective near aircraft, since the wavelength is several orders of magnitude smaller and allows one to achieve high accuracy of the measured parameters.

Movement of various objects, such as a car, and plane, or a helicopter, is accompanied by their interaction with the air. The aerodynamic parameters of an object are necessary for calculating its speed characteristics and determining the possibilities for their improvement. Typically, the aerodynamic characteristics measurements are performed in wind tunnels employing the reduced models of the objects. The wind tunnel has a rather large and complex structure, requiring highly qualified service.

Registration of the aerodynamic parameters of the air medium occurring while the object moving is possible. Similar methods are used for the fuel quality analysis.

Employing the object images distortions allows obtaining all necessary information on the air medium parameters as well as the “clean” sky turbulence by relatively simple technical realization.

Further, a new technique for the fast and qualitative estimation of the moving object aerodynamic properties by distortions of the reference object image under the action of the turbulent wake. A set of reference objects installed along the path of movement allows determine the size of the turbulent wake, the impact of the structural elements of the object and evaluate their role in creating aerodynamic drag.

The illustrations to the article show the effect of a turbulent wake after a car travels on an image of a straight rail mounted on a track of movement. The white rod image blurred in its lower part, which is stipulated by the laminar layer transformation into the turbulent, is shown as well.

1. Analysis of the results of the described experiments allows asserting that the electromagnetic waves of the optical range are sensitive enough to inhomogeneities of the air medium and can be used to obtain information on the “moving object-medium” system.

2. The presented technique can be applied to analyze the aerodynamic parameters of new structural elements mounted on a moving object, without employing complex and expensive equipment.

Compared to the known technique of wind tunnels application, the described technique:

- 1) does not require manufacturing of a high-precision model of the object being studied;
- 2) does not require highly qualified servicing;

- 3) in some cases, an experimental study is possible, which cannot be implemented in a wind tunnel (for example, for a helicopter);
- 4) does not require presence of the fastening and information retrieval elements in the working area, distorting the flow;
- 5) allows building 3D models of the “atmosphere-object” structure using a set of reference rails.

Keywords: aerodynamic studies, laminar and turbulent flow, optical signal refraction, of image distortions analysis on the air medium heterogeneities.

References

1. Abashev V.M., Prudnicov A.G., Son E.E. Modern research areas of solid hypersonic ramjet engines, *29-th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences*, 2014, URL: https://icas.org/icas_archive/icas2014/data/papers/2014_0904_paper.pdf
2. Tarasenko O.S., Bodryshev V.V., Abashev V.M. *Trudy MAI*, 2015, no. 83, available at: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=62032>
3. Berens T.M. et al. Numerical and Experimental investigations on Highly Integrated Subsonic air intakes, *52nd Aerospace Sciences Meeting*, January 2014, National Harbor, MD, USA. DOI: 10.2514/6.2014-0722
4. Kartukov A.V., Merkishin G.V., Nazarov A.N., Nikitin D.A. *Trudy MAI*, 2016, no. 90, available at: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=74822>
5. Kartukov A.V., Merkishin G.V., Nazarov A.N., Nikitin D.A., Subbotin P.V. *Elektrosvyaz'*, 2016, no. 12, pp. 46 – 48.

6. Kozintsev V.I., Orlov V.M., Belov I.A. et al. *Optiko-elektronnyye sistemy ekologicheskogo monitoringa prirodnoi sredy* (Optoelectronic environmental monitoring systems), Moscow, Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2002, 528 p.
7. Devis Sh.M., Landgrebe D.A., Phillips T.L. et al. *Distantionnoe zondirovanie: kolichestvennyi podkhod* (Remote Sensing: A Quantitative Approach), Moscow, Nedra, 1983, 415 p.
8. German M.A. *Kosmicheskie metody issledovaniya v meteorologii* (Space research methods in meteorology), Leningrad, Gidrometeoizdat, 1985, 351 p.
9. Gupta A.K., Lilley D.G., Syred N. *Swirl flows*, Abacws Press, Tunbridge Wells, England, 1984, 475 p. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0010-2180\(86\)90133-1](http://dx.doi.org/10.1016/0010-2180(86)90133-1)
10. Huang Y., Yang V., Dynamics and stability of lean-premixed swirl-stabilized combustion, *Progress in Energy and Combustion Science*, 2009, vol. 35, issue 4, pp. 293 - 364. DOI: [10.1016/j.pecs.2009.01.002](http://dx.doi.org/10.1016/j.pecs.2009.01.002)
11. Ignatkin Yu.M., Makeev P.V., Shomov A.I. *Trudy MAI*, 2013, no. 69, available at: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=43135>
12. Ignatkin Yu.M., Makeev P.V., Shomov A.I. *Aerospace MAI Journal*, 2009, vol. 16, no. 6, pp. 11 – 15.
13. Kartukov A.V., Merkishin G.V., Nazarov A.N., Nikitin D.A. *15-ya Mezhdunarodnaya konferentsiya "Aviatsiya i kosmonavtika-2016"*, Moscow, Izd-vo MAI, 2016. pp. 58 - 59.
14. *Strakh poleta. Ch.1.*, 2009, available at: <https://www.popmech.ru/adrenalin/9195-strakh-poleta-chast-1-fobiya/>
15. Belotserkovskii A.S. et al. *Patent RU 2324953 C2*, 20.05.2008.

16. Baranov N.A., Belotserkovskii A.S., Kanevskii M.I., Pasekunov I.V. *Patent RU 2324203 C1*, 10.05.2008.
17. Valis N.A. *Rastrovye opticheskie pribory* (Raster optical instruments), Moscow, Mashinostroenie, 1966, 207 p.
18. Skokov I.V. *Opticheskie interferometry* (Optical interferometers), Moscow, Mashinostroenie, 1979, 128 p.
19. Sharma K.K. *Optics: principles and applications*, Academic Press, 2006, 656 p.
20. Horst Kuchling. *Physik*, Veb Fachbuchverlag Leipzig, 1980, 653 p.
21. Merkishin G.V., Afonin K.N. *16- ya Mezhdunarodnaya Krymskaya konferentsiya "SVCh-tekhnika i telekommunikatsionnye tekhnologii"*, Sevastopol', Veber, 2006, pp. 499 – 500.
22. Mitrofanov A.A. *Kontrol' sborki letatel'nykh apparatov: Opticheskie i lazernye metody* (Aircraft Assembly Control: Optical and Laser Methods), Moscow, Mashinostroenie, 1989, 207 p.
23. Merkishin G.V. *Sistemy nablyudeniya: novye printsipy postroeniya* (Surveillance systems: new design principles), Moscow, Radiotekhnika, 2010, 159 p.