

Л и т е р а т у р а

1. Глазов А. И. и др. Обеспечение единства измерений средней мощности оптического излучения в волоконно-оптических системах передачи // Метрология и измерительная техника в связи. 1999. № 4. С. 20—24.

2. Tihomirov C. V. e. a. Comparison of reference standards for measurements of optical-fibre power // Metrology. 2000. 37. P. 347—348.

3. ГОСТ 8.575—2005. Государственная поверочная схема для средств измерений длины и скорости распространения сигнала в световоде, средней мощности, ослабления и длины волны оптического излучения для волоконно-оптических систем связи и передачи информации.

4. ГОСТ 8.275—78. ГСИ. Государственный первичный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений средней мощности лазерного излучения.

5. Кауфман С. А. и др. Метрологическое обеспечение измерений средней мощности и энергии лазерного излучения // Измерительная техника. 1979. № 11. С. 26—27; Kaufman S. A. e. a. Metrological provisions for measuring the laser-radiation mean power and energy // Measurement Techniques. 1979. V. 22. N. 11. P. 1319—1322.

6. Загорский Я. Т. и др. Воспроизведение единицы средней мощности лазерного излучения // Измерительная техника. 1979. № 11. С. 28—30; Zagorskii Ya. T. e. a. Reproduction of the laser-radiation mean-power unit // Measurement Techniques. 1979. V. 22. N. 11. P. 1322—1325.

7. Ильин А. С. и др. Эталонный первичный измерительный преобразователь средней мощности лазерного излучения // Измерительная техника. 1979. № 11. С. 38—39; Il'in A. S. e. a. Primary reference measuring transducer // Measurement Techniques. 1979. V. 22. N. 11. P. 1337—1339.

Дата принятия 18.02.2014 г.

535.31:004.932

Восстановление 3D-профиля деформированной металлической пластины методом корреляции фоновых изображений

А. Ю. ПОРОЙКОВ

Национальный исследовательский университет МЭИ Москва, Россия,
e-mail: poroykovAY@gmail.com

Приведены результаты экспериментальных исследований по применению метода корреляции фоновых изображений для восстановления 3D-профиля деформированной поверхности на примере изгиба металлической пластины. Разработан и реализован алгоритм цифровой обработки экспериментальных изображений. Дано сравнение результатов измерений предложенным методом с результатами прямых измерений.

Ключевые слова: метод корреляции фоновых изображений, восстановление 3D-профиля поверхности, кросскорреляционная обработка.

The paper presents the results of experimental studies of application of the image pattern correlation technique (IPCT) for 3D reconstruction of surface profile of deformed metal plate. An algorithm of digital processing of experimental images was developed and implemented. The comparison of IPCT measurement results with the results of direct measurements is presented.

Key words: image pattern correlation technique, reconstruction of 3D surface profile, cross-correlation processing.

В современной науке и технике измерения деформаций уделяется особое внимание. Любой механизм и конструкция при эксплуатации подвергаются различным видам нагрузок, что вызывает деформации узлов и элементов. Измерения деформаций проводятся различными методами, в том числе и оптическими [1, 2]. Современное развитие микроэлектроники и вычислительной техники привело к появлению новых методов измерений деформации, позволяющих проводить их в большем объеме и в более сложных условиях (натурных экспериментах), чем классическими методами, со сравнимой или меньшей погрешностью [3].

Метод корреляции фоновых изображений (МКФИ). Этот оптический метод диагностики деформации (положения, перемещения, изгиба, скручивания и др.) основан на применении цифровых фото- и видеокамер и компьютерной обра-

ботки оптических изображений поверхности по кросскорреляционным алгоритмам [4]. Основные достоинства метода — минимальное количество необходимого для измерения оборудования и использование современной цифровой обработки изображений, что позволяет выполнять измерения в натурных экспериментах [5].

Принципиальная схема установки МКФИ приведена на рис. 1. Алгоритм метода включает следующие этапы последовательных действий.

1. Нанесение фонового экрана на исследуемую поверхность. Фоновый экран — это специальный рисунок, изображение которого регистрируется цифровыми видеокамерами. На практике чаще всего он состоит из черных точек (эллипсов), расположенных случайным образом на белом фоне. Процедура нанесения может проходить путем накле-

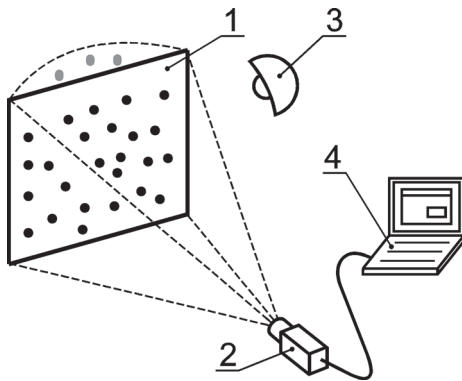


Рис. 1. Принципиальная схема установки МКФИ:

1 — исследуемая поверхность с нанесенным фоновым экраном;
2 — цифровая камера с объективом; 3 — источник освещения;
4 — компьютер

ивания распечатанного экрана на поверхность или нанесения на нее краски в зависимости от вида случайного распределения, его параметров, размеров эллипсов и их цвета [6]. От этого зависит погрешность определения деформации, получаемая при кросскорреляционной обработке картин МКФИ. Иногда фоновым экраном служит сама текстура поверхности объекта [5].

2. Регистрация изображений фонового экрана в исходном состоянии исследуемой поверхности и при ее деформации. Первое из них принимается за опорное, а второе содержит информацию об изгибе и является измерительным.

3. Кросскорреляционная обработка полученных изображений. Опорное и измерительное изображения, соответствующие определенному моменту деформации поверхности, разбиваются на прямоугольные участки, так называемые окна опроса. Размер окна и шаг разбиения задаются параметрами обработки. Для полученных участков корреляционная функция рассчитывается по формуле [7]:

$$f(x, y) \circ g(x, y) = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N f^*(m, n) g(x+m, y+n), \quad (1)$$

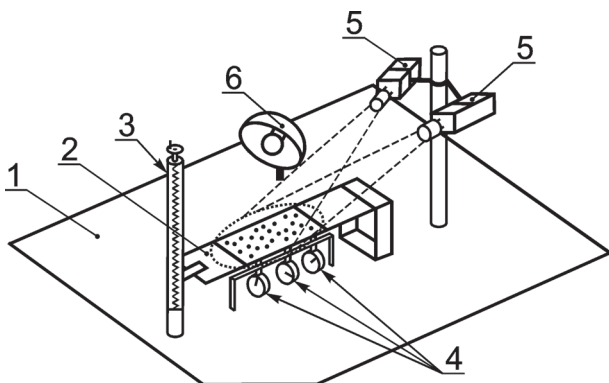


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для анализа 3D-смещений поверхности:

1 — оптический стол; 2 — гибкая металлическая пластина с фоновым экраном; 3 — координатное устройство; 4 — микрометры;
5 — цифровые видеокамеры; 6 — источник света

где $f(x, y)$, $g(x, y)$ — двумерные функции распределения яркости на выбранных участках опорного и измерительного изображений; знак $\circ$ — оператор корреляции; M, N — размеры участков изображений по вертикали и горизонтали; $*$ — оператор комплексного сопряжения.

4. Поиск максимума корреляционной функции. Его координаты определяют смещение изображения на выбранном участке. Рассчитанные смещения всех участков одного измерительного изображения при дальнейшей обработке, согласно выработанной математической модели, позволяют измерить деформацию всей поверхности. При восстановлении 3D-профиля поверхности необходимо использовать две и более видеокамеры. Следовательно, обработка полученных экспериментальных данных требует совмещения двух изображений одного и того же объекта. Для этого проводится предварительная процедура калибровки, позволяющая в дальнейшем сопоставить изображения от разных камер [8].

Методика экспериментальных исследований. Для осуществления экспериментальных исследований по восстановлению 3D-профиля деформируемой поверхности была создана установка, схема которой представлена на рис. 2. Установка состоит из оптического стола 1, обеспечивающего крепление всех элементов; исследуемого объекта 2 — гибкой металлической пластины с нанесенным фоновым экраном; координатного устройства 3, служащего для деформации пластины; микрометров 4 для прямого измерения смещений пластины в контрольных точках; цифровых видеокамер 5 для регистрации изображений; источника освещения 6. В установке применены видеокамеры JAI RM-2040 GE с объективами Avenir VTCH5018.

Используемый в исследованиях фоновый экран создан с помощью специальной программы и представляет набор из расположенных на белом фоне черных точек, радиус и положение которых задаются статистическими функциями распределения.

Методика исследований заключается в получении изображений фонового экрана, нанесенного на поверхность металлической пластины. Один конец пластины жестко закреплён, а второй соединён с подвижной частью координатного устройства. Изменение положения свободного конца вызывает смещение и деформацию всей пластины. Изображения фонового экрана с разных ракурсов до и после смещения позволяют восстановить 3D-профиль поверхности исследуемой пластины. Взаимное положение видеокамер и пластины определяется по калибровочной мишени — объекту с известными геометрическими размерами.

Для обработки полученных экспериментальных изображений разработан следующий алгоритм (рис. 3):

по данным, полученным при предварительной калибровке видеокамер, рассчитываются взаимные координаты окон опроса на изображениях для обеих камер в плоскости исследуемой поверхности;

проверяется присутствие полученных окон опроса на изображениях;

опорные 1, 2 и измерительные 3, 4 (см. рис. 3) изображения для каждой камеры в отдельности делятся на рассчитанные и проверенные окна опроса;

для каждой соответствующей пары окон опроса 5, 6 рассчитывается функция корреляции по алгоритму быстрого фурье-преобразования;

для полученной функции корреляции по алгоритмам интерполяции осуществляются поиск максимума и определение его координат с субпиксельной точностью;

по данным калибровки рассчитываются 3D-векторы 9 смещений с помощью двух 2D-векторов 7, 8 с каждой камеры, что позволяет восстановить вид профиля исследуемой поверхности.

Методика проведения калибровки видеокамер. Как отмечалось выше, использование в эксперименте более одной камеры требует обязательного проведения процедуры калибровки, позволяющей в дальнейшем сопоставить изображения, полученные от разных камер. Данная процедура сводится к определению зависимости, по которой трехмерные мировые координаты исследуемого объекта преобразуются в двухмерные координаты на изображениях. Зависимость принято представлять в виде калибровочной матрицы, содержащей как внутренние параметры (самой камеры), так и внешние (параметры расположения камеры в координатах мирового пространства) в неявном виде [9].

Модели, используемые для связи мировых координат с координатами на изображении, можно свести к двум видам. Первый — полиномиальные модели; они не рассматривают физические параметры камеры и приемной системы, а формально задают связь между координатами на изображении и в пространстве предметов с помощью полинома заданной степени точности. У этих моделей одно преимущество — они учитывают aberrации, возникающие в оптической системе, причем количество видов учтенных aberrаций зависит от степени используемого при калибровке полинома. Второй вид — модели, задаваемые физическими параметрами камеры и оптической системы. Данный вид удобнее в использовании, так как расчет искомых матриц проводится по более простым алгоритмам, а модель имеет физическую основу.

Существуют несколько подходов к процедуре калибровки камер. Один из них заключается в прямом измерении координат расположения камеры и внутренних параметров, таких как размер одного пиксела, фокусное расстояние объектива и др. Однако этот подход слишком сложен на практике, имеет высокую погрешность, особенно в исследованиях на натуральных объектах. Другой подход проще и заключается в расчете внутренних параметров камеры и ее расположения относительно мировых пространственных координат на основе полученных изображений. Изображения могут содержать как сами исследуемые объекты (самокалибровка), так и специальные объекты с известными размерами. При самокалибровке требуется поиск соответствующих точек на двух изображениях, что сложно как с точки зрения трудоемкости вычислений, так и однозначности решения. Использование объекта с известными геометрическими размерами позволяет уменьшить погрешность калибровки и время обработки изображений.

Для проведения процедуры калибровки камеры выбрали «наилучшую аффинную калибровочную матрицу», включающую одиннадцать параметров [9]:

$$\begin{bmatrix} sP_r^i \\ sP_c^i \\ s \end{bmatrix} = \mathbf{C}_w^i \begin{bmatrix} P_x^w \\ P_y^w \\ P_z^w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_x^w \\ P_y^w \\ P_z^w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

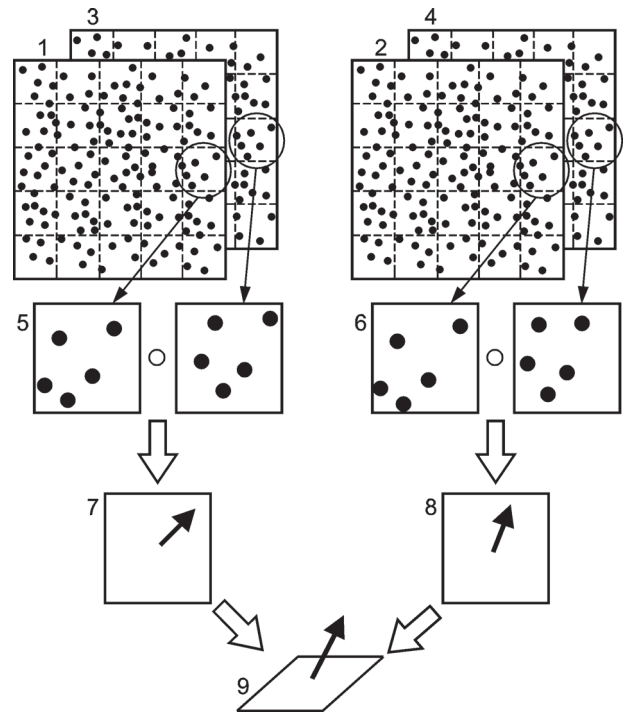


Рис. 3. Схема обработки 3D-картин МКФИ:

1, 2 и 3, 4 — соответственно опорные и измерительные изображения с первой и второй камер; 5, 6 — расчет корреляции для окон опроса; 7, 8 — найденные векторы смещения; 9 — итоговый 3D-вектор смещения

где P_r^i, P_c^i — координаты точки на изображении; $\mathbf{C}_w^i$ — матрица камеры, преобразующая координаты точки в мировых координатах P_x^w, P_y^w, P_z^w в координаты на изображении; $c_{11}, \dots, c_{33}$ — элементы матрицы камеры.

Матрица $\mathbf{C}_w^i$ содержит в неявном виде другие матрицы, включающие физические параметры камеры и оптической системы [9]:

$$\mathbf{P}^i = \mathbf{C}_w^i \mathbf{P}^w = \mathbf{P}^w \mathbf{S}_F^i \mathbf{P}_C^F(f) \mathbf{TR}_w^C(\alpha, \beta, \gamma, t_x, t_y, t_z), \quad (3)$$

где $\mathbf{P}^i, \mathbf{P}^w$ — координаты точки на изображении и в мировом пространстве; $\mathbf{S}_F^i$ — матрица преобразования вещественных координат в пиксельные координаты; $\mathbf{P}_C^F(f)$ — матрица перспективного преобразования; $\mathbf{TR}_w^C(\alpha, \beta, \gamma, t_x, t_y, t_z)$ — матрица, учитывающая поворот и перенос.

Таким образом, согласно (2) процедура калибровки сводится к нахождению одиннадцати неизвестных параметров матрицы камеры. Для этого необходимо определить на изображении минимум 6 точек, у которых будут известны координаты в мировом пространстве, а затем получить систему, состоящую из 12 уравнений, решив которую найдем искомые параметры.

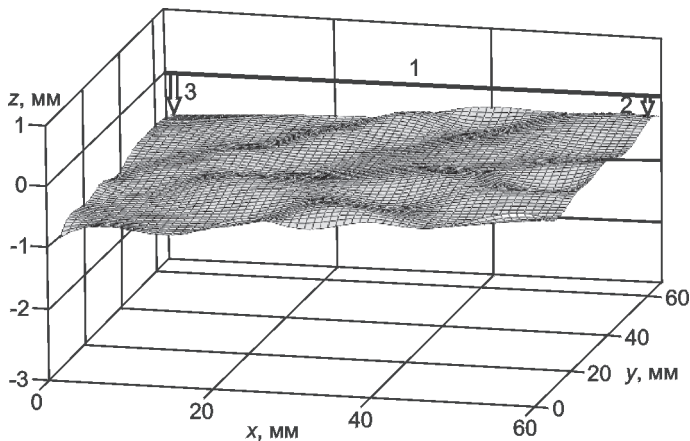


Рис. 4. Восстановленный вид 3D-поверхности исследуемой пластины при ее смещении:

1 — первоначальное положение пластины; 2, 3 — часть пластины, расположенная ближе к закрепленному концу и закрепленная на координатном устройстве, соответственно

На практике использование при калибровке только 6 точек приводит к повышению погрешности этой процедуры. Поэтому необходимо увеличивать количество точек с известными координатами до 25 и более [9]. Однако при этом усложняется калибровка вручную и предполагается автоматизация процесса. Последнее возможно, если применить преобразование Хафа [10], по концепции близкого к преобразованию Радона [11].

Результаты экспериментальных исследований. Для обработки экспериментальных изображений представленные выше алгоритмы были реализованы в виде программного обеспечения на языке C#. Программа *CamCalibrTool* разработана для калибровки камер перед проведением эксперимента [8]. Программа *IPCT_Proc* предназначена для субпиксельной кросскорреляционной обработки изображений на основе алгоритмов быстрого фурье-преобразования и восстановления 3D-профиля поверхности по известным калибровочным матрицам [8].

На рис. 4 показано изображение восстановленного 3D-профиля деформированной поверхности металлической пластины, где хорошо видно, что левый край пластины загибается относительно первоначального горизонтального положения.

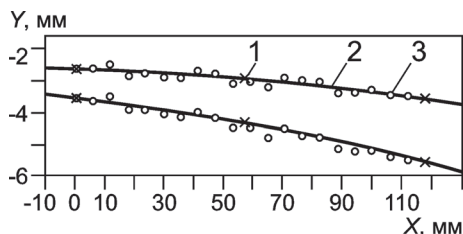


Рис. 5. Срезы восстановленных 3D-профилей по плоскости микрометров и результаты прямых измерений положения пластины микрометрами для двух различных положений свободного конца: 1 — измеренные микрометрами точки; 2 — аппроксимированный по измеренным точкам профиль поверхности; 3 — точки восстановленного рассматриваемым методом 3D-профиля поверхности

Срезы восстановленных 3D-профилей по плоскости микрометров и результаты прямых измерений положения пластины микрометрами для двух различных положений свободного конца изображены на рис. 5. Результаты измерений были использованы для оценки погрешности МКФИ. Относительная погрешность при сравнении положения восстановленных точек с аппроксимированным профилем поверхности (по результатам прямых измерений) не превысила 3 %, среднее квадратическое отклонение составило менее 0,15 мм на площади поверхности 128 см² при амплитуде смещений до 6 мм.

Выводы. Проведенная работа демонстрирует возможности МКФИ для восстановления 3D-профиля деформируемых поверхностей. Существенное преимущество метода — минимальное количество элементов измерительной установки и простота ее настройки. Цифровые методы обработки экспериментальных данных основаны на современных алгоритмах обработки изображений. В качестве программного средства для расчета кросскорреляционной функции можно использовать программы, применяемые в методе анемометрии по изображению частиц (Particle Image Velocimetry), в том числе и с открытым исходным кодом. Изложенный подход по измерению смещений поверхностей дает возможность уменьшить погрешность результатов измерений при использовании более сложных методов калибровки, адаптивных кросскорреляционных алгоритмов обработки и др.

Все это позволяет рекомендовать метод корреляции фоновых изображений там, где к измерительным методам предъявляются повышенные требования, например в натурных испытаниях авиационной техники, в том числе и в полетных испытаниях.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 12-07-31079 мол. а и Министерства образования и науки РФ (проект 7.3732.2011).

Литература

1. Мартыненко А. В. Применение экспериментальных голографических методов при исследовании элементов гидрообъемных передач // Вестник НТУ «ХПИ». Машиноведение и САПР. 2006. № 3. С. 117—133.
2. Разумовский И. А. Интерференционно-оптические методы механики деформируемого твердого тела. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007.
3. Kirmse T., Wagner A. Advanced Methods for In-flight Flap Gap and Wing Deformation Measurements in the Project AWIATOR // Proc. 1st CEAS Europ. Air and Space Conf. Berlin (Germany), 2007.
4. Поройков А. Ю., Скорнякова Н. М. Анализ метода корреляции фоновых изображений для измерения изгиба металлической поверхности // Измерительная техника. 2010. № 10. С. 43—46; Poroikov A. Yu., Skorniyakova N. M. An analysis of the image pattern correlation technique for measuring the bending of a metal surface // Measurement Techniques. 2011. V. 53. N. 10. P. 1147—1151.
5. Boden F. e. a. Advanced In-Flight Measurement Techniques. Springer, 2013. XIX.
6. Удалов А. В. Аппаратно-программный комплекс теневого фонового метода для натурных исследований: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. М., 2010.

7. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005.

8. Поройков А. Ю. Метод корреляции фоновых изображений для анализа смещений крупномасштабных поверхностей: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. М., 2012.

9. Шапиро З. Л., Стокман Дж. Компьютерное зрение. М.: Изд-во Бином. Лаборатория знаний, 2009.

10. Поройков А. Ю. Использование преобразований Хафа в задачах 3D калибровки цифровых видеокамер // Лазеры. Измерения. Информатика. Т. 3. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. С. 314—325.

11. Левин Г. Г., Вишняков Г. Н. Оптическая томография. М.: Радио и связь, 1989.

Дата принятия 04.02.2014 г.

551.510

Измерение мощности упругого рассеяния атмосферного аэрозоля реальным лидаром

В. Е. ПРИВАЛОВ*, В. Г. ШЕМАНИН**

* С.-Петербургский государственный политехнический университет, С.-Петербург, Россия, e-mail: vaevpriv@yandex.ru

** Новороссийский политехнический институт (филиал) Кубанского государственного технологического университета, Новороссийск, Россия

Изучено влияние ширины линии излучения лазера на работу моностатического аэрозольного лидара для зондирования атмосферы. Проведена оценка относительной погрешности измерений мощности сигнала упругого рассеяния назад в направлении лидара на расстояниях зондирования до 5 км.

Ключевые слова: лидарный сигнал, зондирование атмосферы, рассеяние Ми, ширина линии генерации лазера.

The role of the laser radiation linewidth in monostatic aerosol lidar for atmosphere sensing has been studied and the lidar signal relative error estimation has been carried out. It has been shown that the laser line half-width increase from 1 GHz to 5 GHz leads to the growth (about twice) of the elastic backscattering signal power measurements relative error at the sensing distances up to 5 km.

Key words: lidar signal, atmosphere sensing, Mie scattering, laser radiation linewidth.

В [1, 2] рассмотрено лидарное уравнение рассеяния Ми аэрозольными частицами в направлении 180° в предположении, что линия генерации лазера является δ -функцией и не влияет на результаты зондирования. Однако использование широкополосных лазерных источников в лидарах дифференциального поглощения и рассеяния приводит к необходимости учета влияния линии генерации лазера на результаты зондирования [3]. Цель настоящей работы — учет ширины линии генерации лазера в моностатическом аэрозольном лидаре для зондирования атмосферы и оценка относительной погрешности лидарного сигнала.

Рассмотрим оптическую схему моностатического аэрозольного лидара, приведенную на рис. 1. Оптические оси излучателя (лазера) и приемного телескопа направлены вдоль оси OZ. Обычно диаграммы направленности излучателя θ_n и приемного телескопа θ_r малы, $\theta_n \approx \theta_r \ll 1$ и составляют 10^{-4} — 10^{-3} . Исходя из этого будем считать, что их мгновенный диаметр определяется как $d_n \approx \theta_n z$. Для телесных углов, определяющих расходимость зондирующего лазерного излучения $\Omega_n = \pi \theta_n^2$ и поле зрения приемного телескопа

$\Omega_r = \pi \theta_r^2$, справедливо соотношение $\Omega_n < \Omega_r < 1$.

Передающая система лидара характеризуется мощностью посылаемого в атмосферу лазерного излучения P_0 , дли-

тельностью импульса лазера τ_n , а линия генерации лазера является гауссовой с максимумом на частоте ν_0 и полушириной Γ . Тогда мощность лазерного излучения представим в виде [4]:

$$P_1 = \int_{\nu_0 - \Gamma}^{\nu_0 + \Gamma} F(\nu) d\nu, \quad (1)$$

где $F(\nu)$ — гауссова форма линии генерации,

$$F(\nu) = \left[P_0 / (\sqrt{2\pi} \Gamma) \right] \exp \left[-(\nu - \nu_0)^2 / (2\Gamma^2) \right]. \quad (2)$$

Если принять

$$\Phi(\nu) = (\sqrt{2\pi} \Gamma)^{-1} \exp \left[-(\nu - \nu_0)^2 / (2\Gamma^2) \right] \quad (3)$$

и подставить (2), (3) в (1), получим

$$P_1 = P_0 \int_{\nu_0 - \Gamma}^{\nu_0 + \Gamma} \Phi(\nu) d\nu. \quad (4)$$