

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ РАБОТЫ ОПТИЧЕСКОГО КОММУТАТОРА МНОГОКАНАЛЬНЫХ ЛАЗЕРНЫХ СИСТЕМ

Потанин Ю.С.¹

¹ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», Владимир, Россия (600000, Владимир, ул. Горького, 87), e-mail: u1414@yandex.ru

В данной статье представлен один из вариантов построения многоканальной системы на твердотельных импульсных лазерах с использованием оптического коммутатора. Оптический коммутатор позволяет реализовать квазинепрерывный режим излучения системы за счет последовательного скоростного сведения каналов лазерных модулей в единый оптический тракт. Наряду с функцией сведения, коммутатор обладает функцией автоюстировки излучения лазерных модулей, которые претерпевают геометрические искажения под действием климатических факторов. Такой подход к построению многоканальной лазерной системы позволяет получить длительный режим работы при высокой средней мощности и повышенном КПД. На основе возможных разъюстировок лазерного модуля были сформулированы задачи позиционирования для манипулятора оптического коммутатора. В процессе работы были выделены законы формирования переносных и ориентирующих перемещений призмы коммутатора, а также смоделированы фрагменты рабочего пространства манипулятора. Базисом для расчетов служил векторно-матричный математический аппарат описания перемещений роботов. На основе выделенных законов были сделаны выводы о возможной кинематике манипулятора оптического коммутатора.

Ключевые слова: параллельная кинематика, гексапод, электропривод, оптический коммутатор, многоканальная лазерная система, призма

MATHEMATICAL ALGORITHM OF MULTICHANNEL LASER SYSTEMS'S OPTICAL SWITCH

Potinin Y.S.¹

¹Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russia (600000, Vladimir, Gorky street, 87), e-mail: u1414@yandex.ru

In this article presents one of the variants of solid-state pulsed lasers multi-channel system's making with using optical switchal. Optical switch allows to get quasicontinuous mode of radiation on account of speed switching of laser modules in a single optical path. Also, optical switch has the function of laser module's auto-aligning, which undergo geometric distortion under the influence of climatic factors. Such an approach to the construction of a multichannel laser system provides a continuous operation at high average power and increased efficiency. On the basis of possible misalignments of the laser module objectives were formulated for the manipulator positioning. In this article the laws for portable and orienting movements have been created, as well as fragments of manipulator workspace have been simulated. Mathematical operations have been based on vector-matrix calculations of the robot's movements . Allocated on the basis of laws, conclusions were drawn about the kinematics of the manipulator of the optical switch.

Keywords: parallel kinematics, hexapod, electric drive, optical switch, multichannel laser system, prism

Введение

Построение высокоэнергетических лазерных систем стабильно привлекает внимание разработчиков в различных сферах. Получение сверхвысоких плотностей энергии, применение на расстоянии и высокая точность позиционирования луча открывают лазерным системам многие сферы применения [4].

Общепринятым методом наращивания мощности твердотельных лазерных комплексов является использование многоканальных систем, состоящих из набора технологически унифицированных лазерных излучателей. Наряду с системами с

когерентным сложением излучения, возможно построение многоканальной системы из набора импульсных лазерных модулей, в т.ч. твердотельных, работающих последовательно с высокой частотой. Основной особенностью здесь является последовательное сведение каналов лазерных модулей на общую ось при помощи оптического коммутатора. Оптический коммутатор является устройством, позиционирующим элемент оптической коммутации (например, призма) в определенные положения с высокой скоростью. Коммутатор позиционирует призму таким образом, чтобы излучение модуля, проходя через призму, в дальнейшем попадало в одну точку. При повышении частоты коммутации в такой системе наблюдается квазинепрерывный режим излучения на цели.

Наиболее важными достоинствами такой многоканальной лазерной системы, по сравнению с традиционными одноканальными, являются: длительный режим работы, высокая мощность излучения, возможность включения в систему разнородных каналов.

Наряду с достоинствами, применение многоканальных систем обладает недостатками. Главным является необходимость юстировки отдельных модулей для дальнейшего корректного сведения лазерных пучков. Как показывает опыт работ с твердотельными лазерами на неодимовом стекле, разъюстировки в них возникают при изменении климатических условий окружающей среды, главным образом - температуры. Как правило, юстировка отдельных каналов обеспечивается введением клиновых компенсаторов (оптических клиньев). Наличие дополнительных юстировочных устройств вызывает неизбежное затухание излучения в оптических трактах. Таким образом, КПД системы падает вследствие рассеяния части энергии на юстирующих элементах в виде тепла. В процессе работы такой лазерной системы получается серия высокоэнергетических импульсов. Средняя мощность излучения такого режима определяется формулой (1):

$$P_{cp} = \nu \eta \int_0^T p(t) dt, \quad (1)$$

где ν – частота следования импульсов излучения; η – КПД оптического тракта; T – длительность режима работы; $p(t)$ – мощность излучения модуля в функции времени.

Из формулы (1) следуют три пути повышения мощности системы: рост мощности излучения отдельного импульса, рост КПД оптического тракта, рост частоты опроса каналов.

Первый вариант сводится к повышению импульсной мощности отдельного лазерного модуля и обладает определенными сложностями. На определенном этапе масштабирование отдельно взятого лазерного модуля становится. Это провоцирует разработки новых методик построения высокомошных лазерных систем.

Второй и третий варианты представляют интерес в части их синергетического объединения. Повысить КПД и увеличить частоту опроса каналов может принципиально

новый оптический коммутатор, обладающий, наряду с высоким быстродействием, функционалом автоматической юстировки оптических каналов. Обладая возможностью автоюстировки излучения, коммутатор охватит систему главной обратной связью по положению лазерного пучка и исключит излишние оптические элементы в системе, повысив тем самым КПД.

Цель исследования

Целью является разработка математического алгоритма позиционирования призмы оптического коммутатора многоканальной лазерной системы. На основе полученного закона формируются выводы о предпочтительной кинематике оптического коммутатора.

Материал и методы исследования

Исследования велись на лазерных модулях, представляющих собой твердотельные лазеры на неодимовом стекле с ламповой накачкой с длиной волны излучения $\lambda = 1,06$ мкм и длительностью импульса излучения 6 мс.

Определение разъюстировки лазерных модулей велось с помощью отвода части лазерного пучка на диффузный экран и регистрации световых пятен скоростной камерой Fastvideo – 500 с последующим вычислением на основе оптической геометрии. Отвод части лазерного пучка осуществлялся плоскопараллельными светоделительными пластинами из кварцевого стекла КУ ГОСТ 15130-86 с просветлением неотводящей поверхности на длину волны $\lambda = 1,06$ мкм для минимизации вторичного пятна.

Возникающая разъюстировка лазерного модуля может быть разложена на вертикальную и горизонтальную составляющие, каждая из которых может быть угловой и/или линейной. Схематичное изображение хода эталонного и разъюстированного луча при различных видах разъюстировки приведено на рисунке 1.

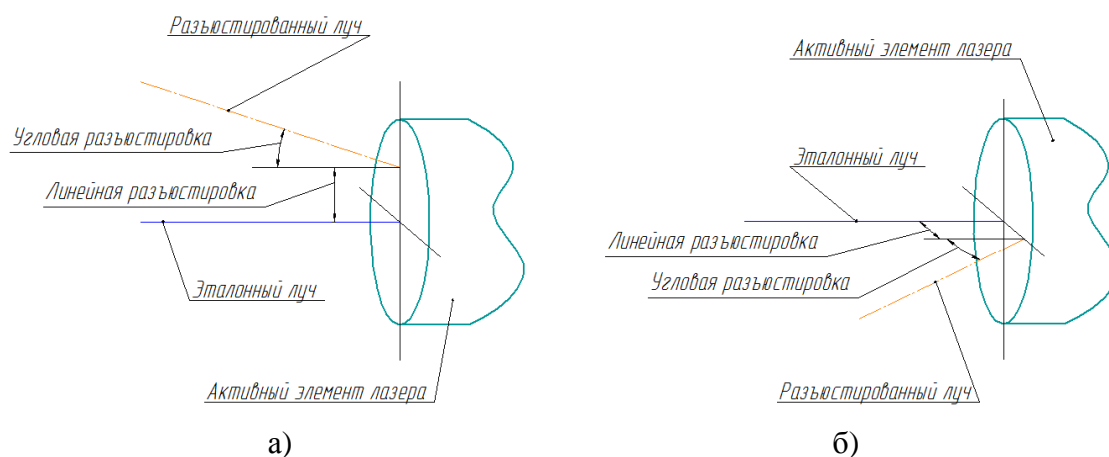


Рис. 1. Схема вертикальной (а) и горизонтальной (б) разъюстировок

Задачей оптического коммутатора, в данном случае, является позиционирование призмы со следующими условиями:

- оптическая ось излучения модулей \overline{PM} должна быть перпендикулярна её входной грани для исключения преломления излучения в призме;

- оптическая ось отраженного призмой излучения \overline{PT} должна проходить через целевую точку T .

Положения призмы оптического коммутатора при эталонном и разъюстированных лучах схематично изображены на рисунке 2.

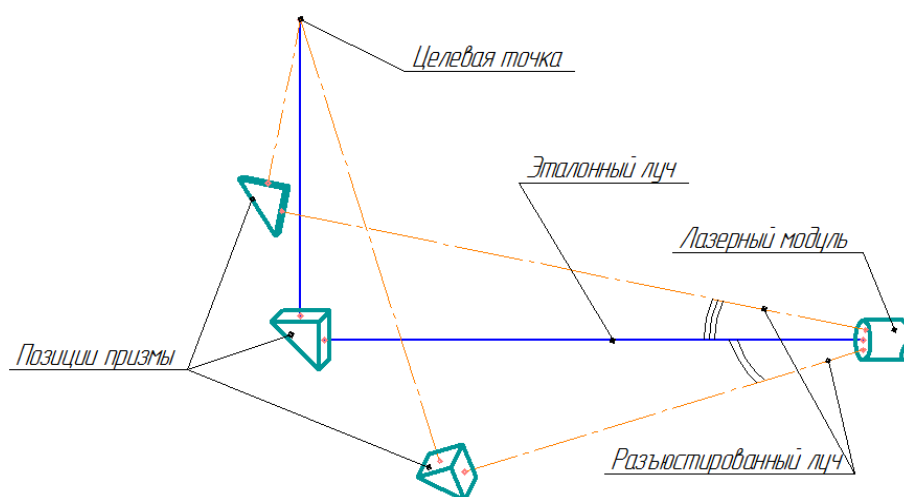


Рис. 2. Положения призмы коммутатора

Примем эталонное положение призмы за начало координат. Зададим ось излучения модуля \overline{PM} как прямую пролегающую в пространстве, описанную системой уравнений в параметрическом виде (2):

$$\begin{aligned} x &= L_{PM} - t; \\ y &= -L_H - tg(A_H) \cdot t; \\ z &= -L_V - tg(A_V) \cdot t, \end{aligned} \quad (2)$$

где x, y, z – координаты точки прямой в декартовых координатах; L_{PM} – расстояние от призмы до лазерного модуля; L_H – линейная горизонтальная разъюстировка; A_H – угловая горизонтальная разъюстировка; L_V – линейная вертикальная разъюстировка; A_V – угловая вертикальная разъюстировка; t – параметр, имеющий действительное значение.

Зададим плоскость I , перпендикулярную оси излучения модуля и проходящую через целевую точку в виде уравнения (3):

$$-x - tg(A_H) \cdot y - tg(A_V) \cdot (z - L_{PT}) = 0, \quad (3)$$

где x, y, z – координаты точки плоскости в декартовых координатах; L_{PT} – расстояние от призмы целевой точки.

Точку пересечения оси излучения модуля с плоскостью, описанной уравнением (3) получим посредством объединения (2) и (3) в единую систему уравнений. Параметр t , характерный для точки пересечения P , определяется уравнением (4):

$$t = \frac{L_{PM} - \operatorname{tg}(A_H) \cdot L_H - \operatorname{tg}(A_V) \cdot L_V - \operatorname{tg}(A_V) \cdot L_{PT}}{1 + \operatorname{tg}^2(A_H) + \operatorname{tg}^2(A_V)}. \quad (4)$$

Параметр t , найденный при заданных отклонениях L_H , A_H , L_V и A_V , будет определять точку $P(x_p, y_p, z_p)$ положения призмы в 3-мерном пространстве и координаты позиционирующих степеней свободы манипулятора оптического коммутатора. В среде MatLab была промоделирована гипотетическая ситуация, когда вертикальная угловая разъюстировка модуля изменялась от 5° до -45° , а горизонтальная от 60° до -60° . Расстояние между модулем и призмой составляло 400 мм, между призмой и целевой точкой – 300 мм. Для множества положений разъюстированного луча было построено множество положений призмы в пространстве. Полученный фрагмент рабочего пространства манипулятор оптического коммутатора приведен на рисунке 3.

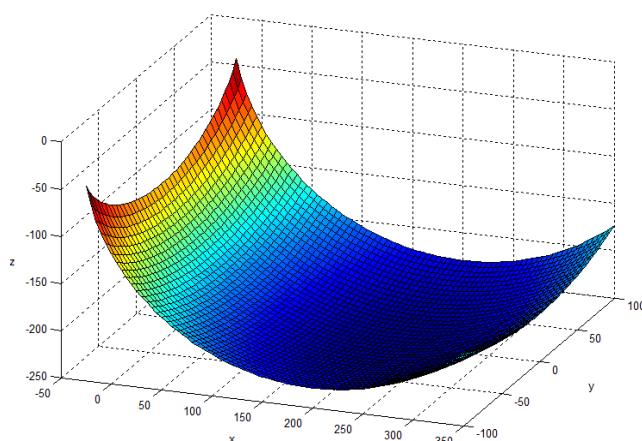


Рис. 3. Фрагмент рабочего пространства манипулятора коммутатора

Полученный фрагмент является элементом сферической поверхности с большим кругом, образованным целевой точкой, точкой эталонного положения призмы и точкой выхода луча из модуля. Координаты множества точек, определяемых системой уравнений (2) являются координатами переносных степеней подвижности манипулятора по осям X , Y и Z .

Ориентирующие степени подвижности оптического коммутатора позволят установить призму в такое положение, чтобы ось излучению модуля была перпендикулярна входной плоскости призмы $\overline{PM} \perp I$. Кроме того должно выполняться условия пролегания оси отраженного излучения через целевую точку $T \in \overline{PT}$. Заданная позиция призмы достигается коммутатором в два этапа:

- поворот призмы вокруг вектора \overline{PR} на такой угол β , чтобы нормаль выходной грани совпала с осью \overline{PT} ;

- поворот призмы вокруг нормали выходной грани на такой угол α , чтобы входная грань стала перпендикулярна оси излучения модуля \overline{PM} .

Схема ориентирующих перемещений призмы коммутатора приведена на рисунке 4.

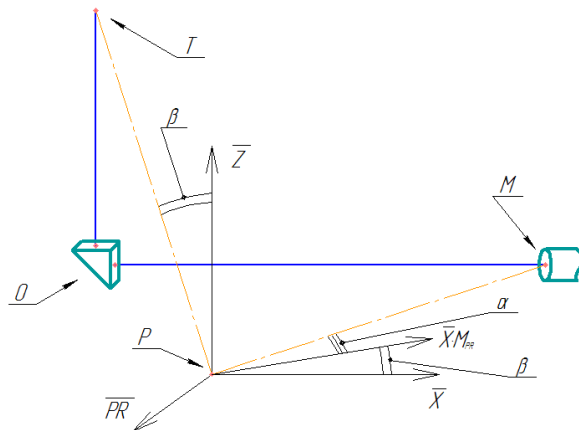


Рис. 4. Схема перемещения по ориентирующим степеням подвижности

Результаты исследования

Вектор оси \overline{PT} определяется вычитанием координат точки Р из координат точки Т и имеет следующие координаты $\overline{PT} = \{-x_P, -y_P, L_{PT} - z_P\}$.

Вектор \overline{PR} , вокруг которого осуществляется вращение призмы на первом этапе, является векторным произведением вектора оси \overline{PT} и орта оси \overline{Z} и имеет следующие координаты $\overline{PR} = \{-y_{PT}, x_{PT}, 0\}$.

Угол поворота β на первом этапе является углом между вектором оси \overline{PT} и ортом оси \overline{Z} и определяется по формуле (5):

$$\beta = \arccos \left(\frac{\overline{Z} \cdot \overline{PT}}{|\overline{Z}| \cdot |\overline{PT}|} \right) = \arccos \left(\frac{z_{PT}}{\sqrt{x_{PT}^2 + y_{PT}^2 + z_{PT}^2}} \right). \quad (5)$$

Расчет движения звеньев манипулятора для поворота призмы на первом этапе может вестись на основе матрицы поворота вокруг произвольной оси [3]. Здесь осью является вектор \overline{PR} , углом является β . Для данного случая матрица поворота M_{PR} примет вид (6):

$$M_{PR} = \begin{pmatrix} \cos \beta + (1 - \cos \beta) \cdot x_{PT}^2 & (1 - \cos \beta) \cdot x_{PT} \cdot y_{PT} & \sin \beta \cdot x_{PT} \\ -(1 - \cos \beta) \cdot x_{PT} \cdot y_{PT} & \cos \beta + (1 - \cos \beta) \cdot x_{PT}^2 & \sin \beta \cdot y_{PT} \\ -\sin \beta \cdot x_{PT} & -\sin \beta \cdot y_{PT} & \cos \beta \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Перемещение манипулятора при наклоне призмы описывается матрицей поворота (6) и сводится к развороту вокруг осей X и Y.

Основой для второго этапа является нахождение угла α между вектором \overline{PM} и вектором, полученным при повороте орта оси \overline{X} на угол β вокруг \overline{PR} . Таким образом, расчеты перемещений на втором этапе имеют в своей основе математический аппарат первого этапа и сводятся к формуле, определяющей поворот призмы на угол собственного вращения (7):

$$\alpha = \arccos \left(\frac{(M_{PR} \cdot \overline{X}) \cdot \overline{PM}}{(M_{PR} \cdot \overline{X}) \cdot |\overline{PM}|} \right). \quad (7)$$

Предел перемещения по ориентирующей степени подвижности собственного вращения должен превышать центральный угол сектора, в котором расположен набор лазерных модулей вокруг коммутатора. Для большей универсальности манипулятор должен быть полноповоротным по этой степени подвижности.

Учитывая требования по максимизации быстродействия и наличие 6 степеней подвижности, адекватным решением будет построение оптического коммутатора на базе привода с параллельной кинематикой – гексапода. Данный манипулятор обладает 6 независимыми степенями свободы и находит применения в измерительных, станочных и высокоточных позиционирующих системах [1]. Гексапод обладает высоким быстродействием, ввиду малой массы рабочего органа, повышенной жесткостью, и высокой унификацией узлов системы [5]. Однако гексапод характеризуется высокой степенью сложности задания перемещений, свойственной параллельным механизмам [2]

Выводы

1. Оптический коммутатор должен обладать 6 степенями подвижности. Построение оптического коммутатора предпочтительно на базе манипулятора типа гексапод.
2. Вследствие большого предела перемещений по углу собственного вращения, данная степень подвижности гексапода дублируется отдельным электроприводом вращения.

Список литературы

1. Глазунов В.А. Принципы классификации и методы анализа пространственных механизмов с параллельной структурой // Проблемы машиностроения и надежности машин, 1990, №1, с. 41–49.
2. Глазунов В.А. Разработка манипуляционных механизмов с параллельно-перекрестной структурой // Проблемы машиностроения и надежности машин, 2008, №2, с. 90.

3. Лурье А.И. Аналитическая механика. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1961. – 824 с.
4. Напартович А.П. Справочник по лазерной технике. Пер. с нем. - М.: Энергоатомиздат, 1991. – 554 с.
5. Подураев Ю.В. Мехатроника: основы, методы, применение.– М.: Машиностроение, 2007.– 256 с.

Рецензенты:

Гоц А.Н., д.т.н., профессор кафедры тепловых двигателей и энергетических установок Владимирского государственного университета, г. Владимир.

Кульчицкий А.Р., д.т.н., доцент, главный специалист ООО «Завод инновационных продуктов «Концерн тракторные заводы», г. Владимир.