

---

## Анализ особенностей управления зеркалом для формирования точных лазерных лучей

*Хтин Линн У, Зо Мьо Наин, Чжо Сое Вин, Е Тем Линн, Хейн Хтет Зо*

*Национальный исследовательский университет «Московский Институт  
Электронной Техники»*

**Аннотация:** В статье рассматривается проблема точного управления лазерным лучом и говорится о значении точного наведения во многих областях применения. Оптический сигнал может отклоняться и дрейфовать из-за влияния окружающей среды. На основе анализа системы рулевого управления по углу луча представлены некоторые важные факторы для проектирования структуры зеркала быстрого рулевого (БРЗ) управления и компоновки системы рулевого управления с лазерной оптикой. В качестве датчика для входящего света используется 4-х квадрантный детектор.

**Ключевые слова:** прецизионное управление лазерным лучом, управление оптической фокусировкой, быстрое рулевое зеркало, регулятор нечеткой логики, пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор.

### Введение

Управление лазерным лучом - важнейшая технология, которая играет центральную роль в современных технологических приложениях, таких, как высокоэнергетические лазерные системы, оптическая связь в свободном пространстве, производство и проверка полупроводников, лазерная сварка и резка материалов, обработка оптических данных, хранилища и информационный дисплей, сканирующая оптическая литография и различные медицинские приложения для биомедицинских систем [1]. Анализ функций управления зеркалом для точного наведения лазерного луча часто требуется в сложных условиях, где возникают возмущения, такие, как колебания основного движения, быстрое относительное движение [2-4]. Такие условия окружающей среды могут вызывать дрожание лазерного луча, которое создает критические ограничения производительности и даже небольшие помехи часто приводят к значительному дрожанию из-за усиления по оптическим длинам пути. Чтобы поддерживать связь, два терминала оптической связи должны отслеживать и выполнять точное

---

---

непрерывное наведение друг на друга, с тем, чтобы данные не терялись [5]. Получены модель БРЗ и управление с обратной связью и показаны диаграммы Боде для того, чтобы прояснить конструкцию и разницу между допущениями модели и результатами моделирования. Цель состоит в том, чтобы создать систему управления лучом с использованием БРЗ на основе совместимых механизмов и электромагнитных приводов для обеспечения точного управления рулём лазерных лучей.

### Дизайн быстрого рулевого зеркала(БРЗ)

Быстрое рулевое зеркало играет решающую роль в стабилизации линии прямой видимости и компенсации фазового сдвига, используется в качестве зеркального устройства для направления светового луча между целью и приемником, и кроме того, быстрое рулевое зеркало широко используется в оптических системах, таких, как телескопы, лазерная связь, стабилизация изображения, точное отслеживание и прицеливание [6]. Угловое управление лучом, представленное на рис. 1, может соответствовать важному требованию управления, так что лазерный луч будет следовать в идеальном направлении. Точные вращения вдоль одной или двух осей выполняются с помощью устройств на оптическом пути. Существует два вида зеркал для выполнения рулевого управления: одномерное зеркало (для вращения только вокруг одной оси - 1D) и двухмерные зеркала (для вращения вокруг двух осей - 2D).

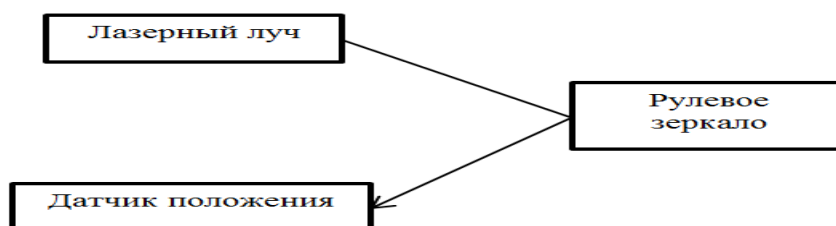


Рис. 1. Угловое управление лучом

БРЗ представлено в виде зеркала, которое установлено над актуаторами. Актуаторы способны производить быстрые и точные движения. В целях выполнения наклона вокруг оси, зеркала расположены линейно в наборах по два на ось. Начало координат системы координат находится в центре зеркала. Линейные приводы создают угловой крутящий момент, который создает небольшое вращение вокруг оси X[7].

Вращение поворачивает зеркало под другим углом  $\alpha$ , чтобы отражать входной лазерный луч. Изменение оптического угла выходного луча в два раза больше механического угла вокруг одной оси плоскости XY, как показано на рис. 2.

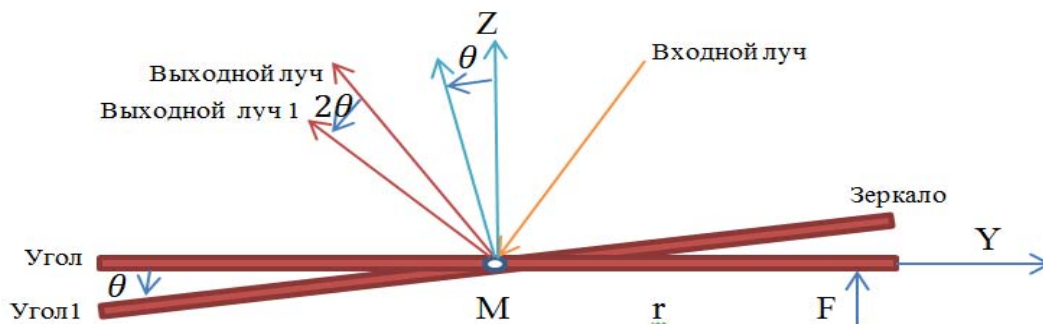


Рис. 2. Диапазон отношений угла рулевого

Система управления лучом состоит из следующих компонентов: быстрое рулевое зеркало(БРЗ), оптический светоделитель, датчик положения и линзы для визуализации или фокусировки. В этом случае исполнительным механизмом является зеркало БРЗ.

Четыре сектора 4-х КД представлены буквами А, В, С и D. Уравнение (1) используется для описания смещений луча по оси x и y, где А, В, С и D - токи, генерируемые каждым из четырех секторов. Есть два существенных ограничения на движение луча, используемых с детекторами квадранта. Во-

первых, для предоставления данных  $x - y$  луч должен всегда перекрывать часть всех четырех секторов. Во-вторых, имеется значимая информация об абсолютном положении только для небольших смещений луча.

$$X = \frac{(B+C)-(A+D)}{A+B+C+D} \quad Y = \frac{(A+B)-(C+D)}{A+B+C+D} \quad (1)$$

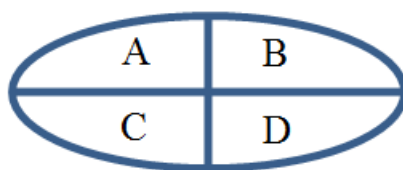


Рис.3. 4-х квадрантный детектор

### Симуляция

Две оси БРЗ контролируются независимо, поскольку контур управления каждой из осей БРЗ выглядит одинаково. На рис. 4 показан только один контур оси.

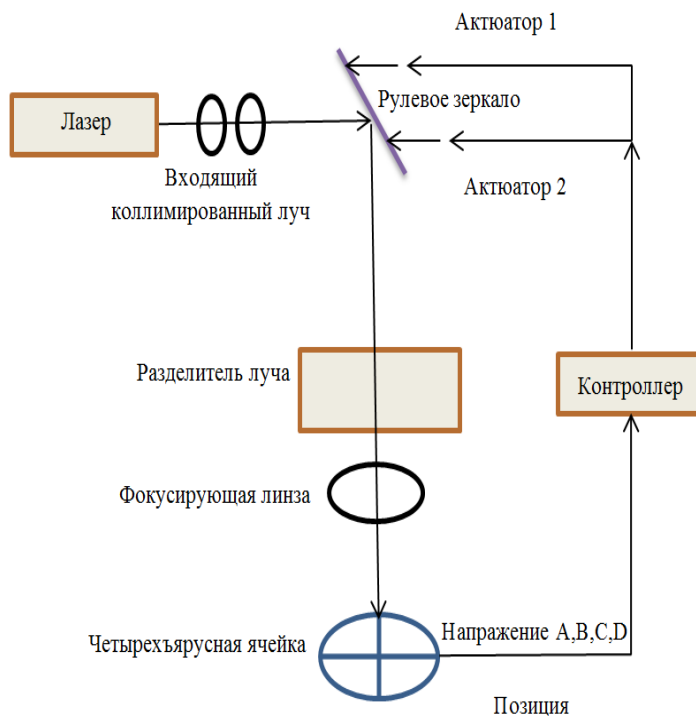


Рис.4. Блок схема с одним контуром управления для одно - осевого управления.

Вход системы представляет собой входящий коллимированный луч, а выход - свет, сфокусированный на фотодиод. Коллимация луча обычно выполняется до того, как он попадет в систему наведения. Луч отражается исполнительным механизмом, а затем разделяется расщепителем луча в двух направлениях: один луч фокусируется на фотодиод, а другой фокусируется на 4-х КД. Выход 4-х КД является сигналом обратной связи для контура управления [8]. Для простоты при тестировании только управляющей части из системы исключаются светоделитель и оптоволоконный ответвитель, поскольку они не влияют на характеристики наведения. Цикл управления основан на информации, поступающей от детектора квадранта. Каждый фотодиод преобразует входящий свет в ток, который затем преобразуется в напряжение. Затем 4 выхода используются для расчета центральной точки луча на детекторе, который, в свою очередь, подается в контроллер. В соответствии с положением центра контроллер генерирует рабочие сигналы для зеркала быстрого рулевого управления, чтобы повернуть его для нужной ориентации.



Рис.5. Блок-схема оптической настройки.

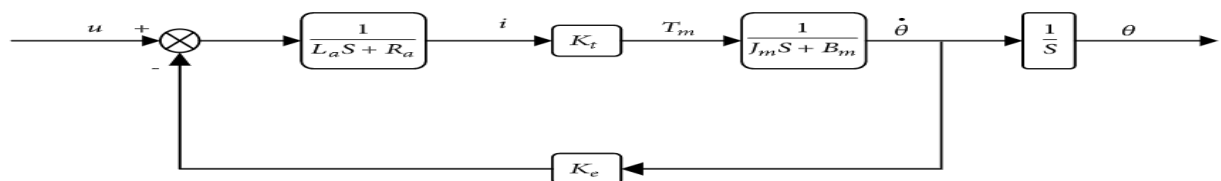


Рис.6. Модель структурной схемы акьюатора

На рисунке 6 –  $u$  - сигнал входного напряжения,  $\theta$  – угол наклона,  $L_a$  – индуктивность якоря,  $R_a$  – сопротивление якоря,  $i$  – ток якоря,  $K_t$  – постоянная электромагнитного момента,  $T_m$  – выходной крутящий момент двигателя,  $J_m$  – момент инерции двигателя,  $B_m$  коэффициент вязкого демпфирования со стороны двигателя -  $\dot{\theta}$  это угловая скорость и  $K_e$  коэффициент обратной ЭМФ.



Рис. 7. Структурная-схема контрольной обработки

Дифференциальное уравнение, описывающее систему, определяется как:

$$M = [J + (m_1 + m_2)d^2]\theta'' + (c_1 + c_2)d^2\theta' + (K_1 + K_2)d^2\theta; \quad (2)$$

Где:  $m$  - масса самого зеркала и крепление на изгиб;  $k$  - пружинная постоянная;  $c$  - коэффициент вязкого демпфирования. Для описания поведения системы, передаточная функция  $G(s)$  выводится, чтобы связать выход с входом:

$$G(s) = \frac{\theta(s)}{M(s)} = \frac{1}{s^2 + \frac{(c_1 + c_2)d^2}{J + (m_1 + m_2)d^2}s + \frac{(K_1 + K_2)d^2}{J + (m_1 + m_2)d^2}}; \quad (3)$$

Крутящий момент  $M$  используется в качестве входного параметра, но сила  $F$  может быть смоделирована, как отклик исполнительного механизма. Он получает команды напряжения и преобразует их в четыре команды тока. Таким образом, передаточная функция одного привода выводится для оценки БРЗ.

$$G(s) = \frac{\theta(s)}{F(s)} = \frac{d}{Is^2 + cs + k}; \quad (4)$$

Где:  $I$  - момент инерции ( $I = m d^2$ ). Масса зеркала рассчитывается в соответствии с его размерами и свойствами материала.

$$V = \pi \cdot d^2 \cdot h ; \quad (5)$$

$$m = \rho V ; \quad (6)$$

где:  $V$  - объем зеркала,  $h$  - толщина зеркала, и  $\rho$  - плотность материала. Необходимо учитывать трение между поверхностью зеркала и воздухом. В таком случае коэффициент трения  $c$  становится:

$$C = uA \quad (7)$$

Где:  $u$  - вязкость воздуха,  $A$  - площадь зеркальной поверхности, на которую действует сила, действующая на газ. В соответствии со всеми параметрами вышеизложенного зеркала передаточная функция (уравнения (3) и (4)) модели РБЗ становится следующей:

$$G(s) = \frac{\theta(s)}{F(s)} = \frac{31.0688}{s^2 + 29.5009s + 61.6s + 31} \quad (8)$$

В качестве первой попытки моделирования системы частотная характеристика модели БРЗ показана на рис. 8. График Боде показывает резонансную частоту 309(rad/s).



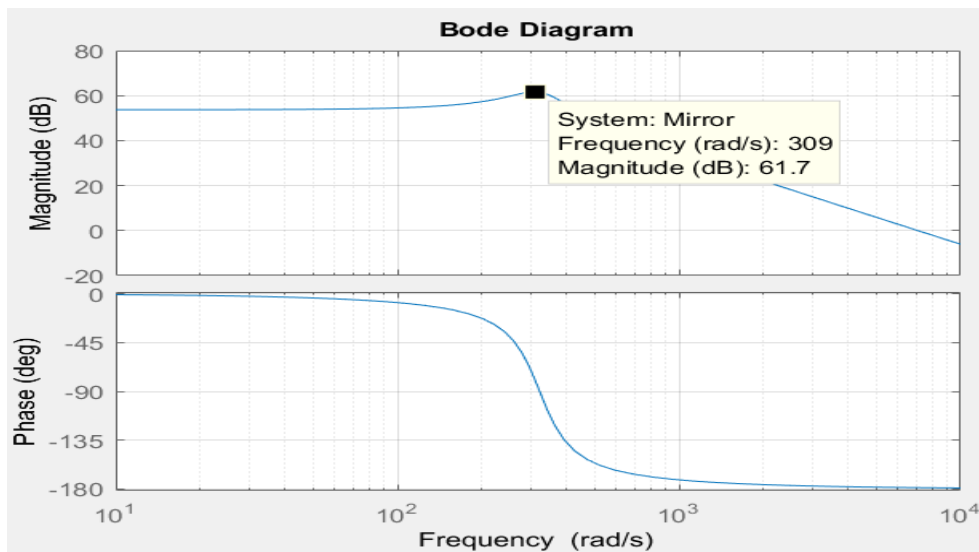


Рис. 8. Диаграмма Боде зеркала БРЗ.

ПИД регулятор используется, поскольку он прост в реализации и имеет хорошие характеристики для моделей, представляющих линейные дифференциальные уравнения 2-го порядка [9-11]. Цикл управления изображен на рис. 9.

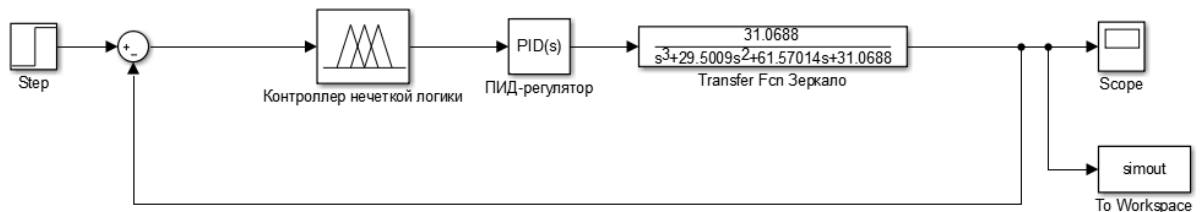


Рис.9. Структурная-схема замкнутым контуром БРЗ

На рис. 10 показан выходной отклик, который является результатом настройки регулятора нечеткой логики-ПИД в соответствии с уравнением 8. Как показано на рис. 11, система стабильна. Результат моделирования - перерегулирование 0% (no overshoot) и уменьшает время установления до 6,3 сек.

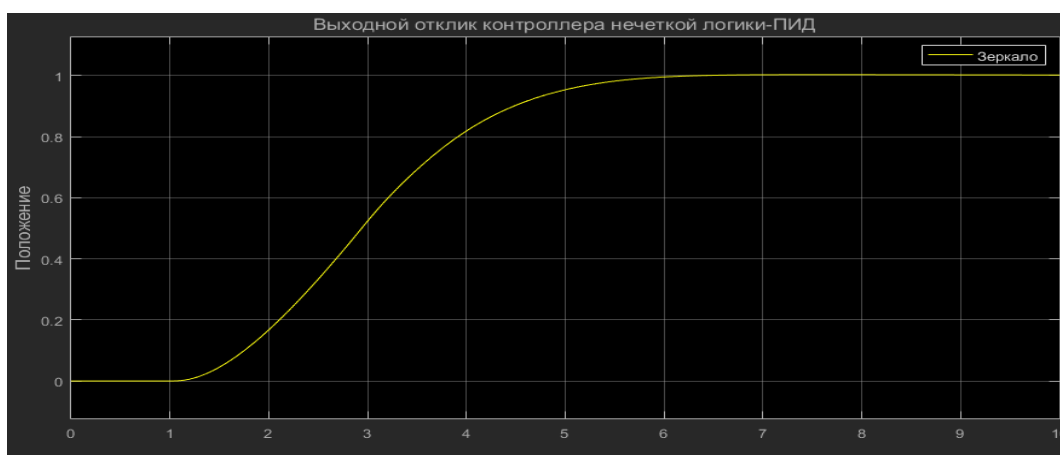


Рис. 10. Результат управление положением зеркала БРЗ

## Выводы

Точное управление лазерным лучом имеет огромное значение для многочисленных военных и промышленных ситуаций его применения. Проблема нарушения джиттера является основной проблемой характеристик рулевого управления. В этой статье представлены возможные технологии точного лазерного управления для оптического управления. В данной работе в общих чертах описаны преимущества внедрения совместимых структур механизма в РБЗ и приводится схема системы управления. Возможен метод проектирования системы управления лучом с использованием автомата, основанного на совместимых механизмах и электромагнитных приводах для обеспечения точного управления рулём лазерных лучей.

## Литература

1. Optics in Motion LLC. Available: ([opticsinmotion.net/index.html](http://opticsinmotion.net/index.html))

2. Wang V., Chen C., Ya K. Fu, Control Method for a Fast Steering Mirror Powered by a Voice Coil Engine Based on Feedback Features, Opto-Electronic Engineering, Vol. 32, Issue 2, 2005, pp. 9-11.
  3. Di Lin, Yi-ming Wu, Fan Zhu Research on Precision Tracking on Fast Steering Mirror and Control Strategy. URL: [researchgate.net/publication/322999812\\_Research\\_on\\_Precision\\_Tracking\\_on\\_Fast\\_Steering\\_Mirror\\_and\\_Control\\_Strategy](https://researchgate.net/publication/322999812_Research_on_Precision_Tracking_on_Fast_Steering_Mirror_and_Control_Strategy).
  4. Xinhan Xu and Hongbo Yang Research on the key technology of the high-speed mirror [J]. Laser and infrared , 2013, 43 (10): pp.1095-1103.
  5. OKO Technologies, Adaptive Optics Product Guide. Available: ([okotech.com/content/oko/pics/gallery/catWWW2.pdf](http://okotech.com/content/oko/pics/gallery/catWWW2.pdf)).
  6. CVI Melles Griot, Fundamentals of Beam Positioning, ([mellesgriot.com/pdf/X\\_43\\_12-14.pdf](http://mellesgriot.com/pdf/X_43_12-14.pdf)).
  7. Hilker J. M. Inertially stabilized platform technology [J]. IEEE Control systems Magazine, 2008, pp. 2:26-46.
  8. Zhou Qingkun, Pinhas Ben-Tzvi, Andrew A. Goldenberg. Design of Fast Steering Mirror Systems For Precision Laser Beams Steering.([researchgate.net/publication/251862184\\_Design\\_of\\_Fast\\_Steering\\_Mirror\\_Systems\\_for\\_Precision\\_Laser\\_Beams\\_Steering](https://researchgate.net/publication/251862184_Design_of_Fast_Steering_Mirror_Systems_for_Precision_Laser_Beams_Steering)).
  9. Zhiliang Yu \*, Ning Cui, Xinglin Chen, Chuanghuan Xu, Kairui Cao “H $\infty$  Control for Fast Steering Mirror based on the Incremental PI Controller,” Proceeding of SPIE, Vol. 9521, page no. 95210G1-G5, 2015.([spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/9521/95210G/H-control-for-fast-steering-mirror-based-on-the-incremental/10.1117/12.2087306.short?SSO=1](http://spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/9521/95210G/H-control-for-fast-steering-mirror-based-on-the-incremental/10.1117/12.2087306.short?SSO=1)).
  10. Fuzzy PID Control with Type-2 FIS. Available: ([mathworks.com/help/fuzzy/fuzzy-pid-control-with-type-2-fis.html](http://mathworks.com/help/fuzzy/fuzzy-pid-control-with-type-2-fis.html)).
-



11. Ernst Csencsics, Georg Schitter, Parametric PID Controller Tuning for a Fast Steering Mirror. ([ieeexplore.ieee.org/document/8062697](http://ieeexplore.ieee.org/document/8062697)).