УДК 621.375.826:(621.397:535)

ШИРОКОФОРМАТНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ СТВОР

М.С. Слободян, С.М. Слободян, А.А. Цупин

Инновационный центр «TECT», г. Томск E-mail: IC Test@ inbox.ru

Предложен новый принцип построения сканирующего лазерного створа широкого формата для навигации подвижных объектов, реализуемый на основе пьезоэлектрического привода управления наклоном лазерного пучка. Определены оптимальные параметры привода и закономерности управления сканированием лазерного пучка створа. Предельный угловой формат по азимутальной координате (наиболее важной для навигации водных и наземных подвижных объектов) до размера полусферы – 180°. Предложенный принцип апробирован в адаптивной телевизионной автоматической системе, средствах контроля и диагностики состояния лазерных пучков при стохастических воздействиях

Во многих задачах, решаемых в измерительной технике, радиолокации, астрономии, оптической связи, локации, ориентации, навигации и многих других одной из проблем является обеспечение высокого разрешения и точности определения координат подвижных объектов в широком поле зрения устройств и систем [1-4]. Возможности применения в лазерных системах элементов адаптивной оптики для прецизионного управления характеристиками излучения, несущего информацию о пространственном поле и объектах в нем, привлекательны. Для адаптации систем и управления волновым фронтом лазерных пучков используют пьезоэлектрические преобразователи «электрический сигнал - силовое воздействие» как исполнительные приводы микроуправления. Опыт показывает - пьезоприводы весьма эффективны в адаптивной оптической технике. Их преимущества в полной мере определяются степенью сложности принятых в устройствах алгоритмов управления и адаптации, что позволяет снизить искажения структуры поля, вызванных факторами случайного и активного противодействия помех на конечный результат работы систем [1–9].

Пьезоэлектрические приводы, имеющие высокое быстродействие и малые габариты, кроме лазерной, тепловизионной, локационной, навигационной и адаптивной техники, применяют для стабилизации изображений, в сканирующих микроскопах и виброножах микротома [1-9]. Их дальнейшее развитие как эффективных элементов управления излучением сдерживается узким диапазоном сканирования. Несмотря на многообразие [3, 4] конструкций привода, вряд ли можно считать, что проблема создания оптимальной структуры привода управления лазерным пучком решена или близка к завершению. Привод сканирования пучка лазерного створа как элемент системы управления навигацией судов [2, 7] имеет индивидуальные особенности, в том числе из-за необходимости высокой точности определения координат с целью управления в реальном времени подвижным объектом в широкой азимутальной области его места пребывания для навигации средств на криволинейных траекториях.

В настоящей статье описан оригинальный привод сканирования пучка лазерного створа [5] как элемента системы навигации подвижного объекта в широкой угловой зоне покрытия лазерным пучком близкой по размеру к полусфере в азимутальной области. Проводится анализ вариантов и оптимизация привода лазерного створа для улучшения его технических характеристик, приводятся результаты исследования в модельной турбулентной среде применения одной из его модификаций.

Структура привода представлена (рисунок) в варианте раздельного по каждой из координатных осей управления наклоном пучка Не-Ne лазера. Привод выполнен в виде консольно разнесенных в пространстве двух изгибных элементов – 1 и – 2, одним концом закрепленных в оправе – опоре – 3. К свободным концам изгибных элементов на двух упругих тягах – подвесах – 6 прикреплен объект управления – зеркало (плоская подложка – 4 с отражающим слоем – 5). Крепление зеркала в двух точках шарнирное – 7 и не ограничивает перемещение торца биморфа в пространстве. Применение изгибных элементов обусловлено условием достижения наибольшего выигрыша в чувствительности привода. Большие угловые отклонения дает шарнирное – 7 (7-1 и 7-2) крепление объекта управления – плоского зеркала.



Рисунок. Структурная схема биморфного привода

При малых угловых отклонениях зеркала (порядка ед. град.) тяги подвеса зеркала могут быть выполнены на основе пластично-упругих материалов (каучук, резина, полиимид). Применялся резино-полимерный материал, полученный на основе определенных соотношений бутилового и этилен-пропиленового каучуков.

Оба элемента – 1 и 2 привода склеены так, чтобы, при подаче сигналов управления на внутренние - 8 и наружные - 10 электроды пьезослоя - 9, в пьезопластинах биморфа возникали равные по величине, но противоположно ориентированные относительно плоскости склейки, деформации слоев, которые и обуславливают возникновение поперечных сил, приводящих к изгибным колебаниям элемента. Принципиально возможны два варианта склеек пластин (с совпадающими и встречными направлениями векторов поляризации) и две схемы подключения сигналов управления к электродам элемента для достижения требуемого вида изгиба. Биморфные элементы – 1 и 2 практически идентичны. Необходимый сдвиг элементов относительно друг друга обеспечивается ступенчатой формой опоры — 3. При плоской форме опоры — 3 используются элементы разной длины, а согласование идентичности динамики поведения обеспечивается электрическим путем - подбором коэффициента усиления сигналов управления этими элементами.

В зависимости от назначения и алгоритма пространственного сканирования (типа растра) возможны два варианта схем подачи сигналов управления к паре элементов и схем расположения элементов, приводящих к изгибу пары элементов, составляющих привод [5, 6]. В первом случае привод дает линейное перемещение зеркала вдоль одной из координатных осей. Во втором — имеем привод углового отклонения объекта управления — зеркала.

Цель оптимизации привода управления пучком лазерного створа заключается в достижении наибольших чувствительности, крутизны преобразования и широкого динамического диапазона управления пучком. Отношение перемещения свободного конца изгибного элемента к сигналу управления должно быть максимальным при высокой точности установки зеркала (и лазерного пучка) как объекта управления, быстродействия, механической прочности и надежности привода. Перемещение свободного конца биморфа определено деформацией элемента: $S_1 = d_{31}E_y + S_{11}^{e}T_1$, где: d_{31} – пьезомодуль; E_y – напряженность приложенного электрического поля; S_{11}^{e} – постоянная упругости (податливость); T_1 – упругое механическое напряжение.

В общем случае, ξ перемещение конца изгибного элемента привода является нелинейной функцией приложенного сигнала U_y управления приводом: $\xi = f(U_y)$. Биморфным элементам свойственна нелинейная статическая характеристика $\xi = f(U_y)$ с наличием гистерезисной петли. Настоящий привод управления позволяет получать угловые перемещения зеркала, определяемые удвоенным отношением ξ – смещения свободных концов изгибных элементов к ℓ_3 – межцентровому расстоянию точек крепления к ним зеркала $\alpha = 2\xi/\ell$. В частном случае крепления тяг к крайним граням зеркала это расстояние соизмеримо с геометрическими размерами зеркала. Нами использовались зеркала (5×5 и 8×5 мм²).

Смещение свободного конца биморфа линейно зависит от величины сигнала управления U_y , в качестве которого может служить сигнал развертки [10] или, в случае активного наведения объекта, сигнал управления положением пучка, формируемого электронной системой лазерного створа [1, 10]. Результирующее угловое перемещение зеркала приводом по выбранной (*X* или *Y*) оси координат составит величину порядка:

$$\alpha \sim 2K_{\Pi}d_{31}\ell^2 U_{\nu}/a^2\ell_3.$$

Здесь: K_{II} – коэффициент, зависящий от типа материала, размеров, добротности и ряда других параметров элементов; d_{31} – поперечный пьезомодуль; ℓ и α – соответственно длина и толщина элементов. В общем случае, $\ell_1 \neq \ell_2$, $U_{1y} = U_{2y}$, но ξ_1 и ξ_2 могут быть тождественны: $\xi_1 \equiv \xi_2$. Хотя для привода углового отклонения пучка выполнение этого условия не является обязательным. Добротность привода Q определяется временем затухания τ_e собственных колебаний частотой f_0 ($\omega_0 = 2\pi f_0$) в e раз:

$$Q = \omega_0 \tau_e / 2$$

Рациональный выбор механической схемы передачи усилия и исключение влияния случайных воздействий на элемент управления — зеркало и пучок — являются важным фактором обеспечения необходимой точности управления пучком. Путем несложных преобразований можно показать, что угол поворота зеркала составит

$$\alpha_0 = \sum_{i=1}^2 \operatorname{arctg}(K_{y_i} l_{x_i}^2 / \Delta x), \quad (i = 1, 2),$$

где K_{yi} — коэффициент пропорциональности, l_{xi} — длины изгибных элементов; Δx — расстояние между точками крепления зеркала. Эффективность выигрыша по угловому отклонению этого типа привода управления зеркалом, по сравнению с одиночным пьезоэлектрическим элементом в приводе типа [3], составит

$$\chi_{\alpha} = (m_e^2 + 1) / 2a_e m_e (1 - m_e),$$

где $m_e = l_{xl}/l_{x2}$ – отношение длин изгибных элементов в приводе ($l_{x2} \ge l_{x1}$); $a_e = l_l/l_{x1}$; l_1 – длина элемента в одиночном приводе. Из выражений следует, что для корректного сравнения (при $l_{x1} = l_1$ или $a_e = 1$) имеет место максимальный выигрыш равный (m_e^{2+1})/ $2m_e(1-m_e)$. При произвольных a_e и m_e выигрыш легко определяется. Отношение частот f первого резонанса для сравниваемых приводов составит:

$$\chi_f = a_e^2 m_e^2$$

Эти выражения позволяют найти оптимальные параметры привода управления удовлетворяющие выполнению двух условий: $\chi_{\alpha} > 1$ и $\chi_{f} > 1$. Таким образом, можно создать привод, обеспечивающий одновременно выигрыш как по углу отклонения и пространственному разрешению, так и по быстродействию (повышению частоты первого резонанса) сканирования пучком пространства. Оптимальное соотношение параметров привода найдётся из решения системы неравенств:

$$\begin{cases} a_e < (m_e^2 + 1) / 2m_e(1 - m_e) \\ a_e > m_e^{-1} \end{cases}$$

Область решений системы неравенств ограничена кривыми соответствующим условиям $\chi_a = 1$ и $\chi_f = 1$. Асимптотическое стремление зависимости (при $m_e \rightarrow 1$) к ∞ не совсем точно отражает практическую работу привода. В области $m_e \sim 1$ на перемещение лазерного пучка большое влияние оказывают способ крепления зеркала.

Для улучшения характеристик привода можно использовать различные решения. Например: применение элементов треугольной формы вместо элементов прямоугольной формы в приводе дает рост угловых перемещений зеркала в полтора раза ($\alpha_{\Delta}=1,5\alpha_{II}$) — при одновременном расширении рабочего участка амплитудно-частотной характеристики. Для элементов треугольной формы участок частотной характеристики привода, свободный от механического резонанса, расширяется для слабо нагруженного привода в 2 раза и в π раз — для сильно нагруженного привода, т. е., когда масса нагрузки — элемента управления соизмерима с массой элемента привода.

Практически созданный привод на основе пьезокерамики ЦТС-19 давал угловые перемещения зеркала в диапазоне $\pm 1,5^{\circ}$, в то время как турбулентное размытие и дрожание изображения на реальных трассах, например, в астрономических телескопах, составляет величину на три порядка меньшую.

Исследование динамических свойств привода сканирования пучка лазерного створа проводилось путем оценки прямых показателей качества переходного процесса. В общем случае переходный процесс установления привода, а с ним и лазерного пучка створа, является несимметричным колебательным и представляет собой сумму высокочастотной колебательной и апериодической медленно меняющейся составляющих. Это обусловлено наличием вещественных и комплексно сопряженных корней решения уравнения привода сканирования лазерного пучка - звена системы автоматического управления. Практически привод створа, как устройство управления наклоном волнового фронта лазерного пучка, представляет собой распределенную с несколькими степенями свободы колебательную систему. Передаточная функция привода в обобщенном виде – отношение нормированных степенных полиномов

$$\Phi = \frac{\xi(p)}{U_{v}(p)} = K \frac{B_{m}(p)}{A_{n}(p)} = K \frac{b_{m}p^{m} + \dots + b_{i}p + 1}{a_{n}p^{n} + \dots + a_{i}p + 1},$$

где K – статический коэффициент передачи привода; n > m и $n \ge 2$.

В случае управления сканированием лазерного пучка переменным сигналом передаточная функ-

ция привода имеет вид, характерный для колебательного звена второго порядка

$$\Phi(p) = K / (\tau_0^2 p^2 + 2D\tau_0 p + 1),$$

где τ_0 – постоянная времени; $D = \omega/2Q$ – декремент относительного затухания. Учет распределенного характера управляемого системой привода позволяет использовать специальные методы повышения устойчивости и снижения динамической погрешности в контуре управления. Этот путь ведет к синтезу более сложных устройств и закономерностей управления приводом положением лазерного пучка.

В сканирующем лазерном створе на привод подается сигнал $U[\Delta Z(t)]$, пропорциональный величине приращения пространственных координат для изменения положения лазерного пучка $\Delta Z(t)=Z_i(t)-Z_0(t)$ и равный разности координат задаваемого положения $Z_i(t)$ относительно координат опорного $Z_0(t)$ – предыдущего положения пучка в облучаемом пространстве. Процесс установления зеркала – элемента управления пучком лазерного створа в текущее положение $Z_i(t)$ с помощью привода управления зеркалом, например, по координате X плоскости Z(x,y) будет происходить в первом приближении по следующей зависимости

$$x_i(t) = x_0(t) + \Delta x_i(t) \exp(-Dt) \cos(\omega t + \varphi),$$

где ω и φ – круговые частота и фаза управляющего сигнала $U[\Delta(t)]$.

Среднее значение координаты положения пучка лазерного створа, управляемого приводом, найдется интегрированием в интервале периода колебаний биморфа (0; $\tau_{\delta} \sim \tau_{0}$) с последующим нормированием

$$\overline{x(t)} = \int_{0}^{\tau_{\delta}} x(t)p(t) dt / \int_{0}^{\tau_{\delta}} p(t) dt.$$

Здесь *p*(*t*) – симметричная весовая функция,

удовлетворяющая условию $\int_{0}^{\tau_{\delta}} p(t) dt = \tau_{\delta}$. Период

колебаний установления элемента управления в заданное новое положение жестко связан с резонансными свойствами привода как колебательного звена системы. Ошибка установления элемента управления в заданное положение $[x_i(t)-x_0(t)]$ найдется из вышеприведенных выражений (для $p_0=1$). Представляя весовую функцию p(t) в виде ряда Фурье $p(t) = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} p_k \cos \kappa \omega t$ (p_k – коэффициенты

ряда Фурье), получим

$$x(t) - x_0(t) =$$

= $\frac{\Delta x(t)}{\tau_{\delta}} \sum_{\kappa=0}^{\infty} p_{\kappa} [\int_{0}^{\tau_{\delta}} \exp(-Dt) \cos(\omega t + \varphi) \cos \kappa \, \omega t \, dt]$

Если ограничить точность вычисления погрешности установления элемента управления приводом лазерного створа в заданное положение членами порядка малости D^2 , то после интегрирования и некоторых упрощений ошибка примет вид

$$\overline{x(t)} - x_0(t) = \frac{\Delta x(t)D}{\omega} \sin \varphi \left(\sum_{\kappa=2}^{\infty} \frac{p_{\kappa}}{\kappa^2 - 1} - 1\right)$$

Условию минимизации ошибки управления $[\overline{x(t)}-x_0(t)\rightarrow 0]$ удовлетворяет $p_2=3$, при котором весовая функция принимает вид: $P(t)=1+3\cos 2\omega t$. Отсюда, среднее значение координаты положения элемента управления (зеркала и лазерного пучка) на такте τ интервала управления ($\tau_{\delta}=n\tau$) приводом наклона лазерного пучка составит

$$\overline{x}_0 = \frac{1}{\tau_\delta} \int_0^{t_\delta} x_0(t) (1 + 3\cos 2\omega t) dt = x_0 (1 + \frac{3}{2\omega\tau} \sin \omega\tau).$$

Для тактовых частот управления приводом близких к резонансным ($\omega \tau \sim 0.5$) и $\sin \omega \tau \sim \omega T$ и $x_{0} = 2,5 x_0$. Отсюда следует вывод, что на тактовой частоте управления близкой к резонансной амплитуда перемещения объекта управления – пучка – в 2,5 раза превышает требуемое значение. Вывод подтверждается поведением амплитудно-частотной характеристики привода, подобного [3]. Другими словами, на тактовой частоте отработки приводом сигнала управления положением пучка, ввиду увеличенной примерно в 2,5 раза чувствительности, требуется меньшее напряжение сигнала управления и меньший коэффициент усиления цепи, что повышает быстродействие, точность процесса управления и стабилизации пространственного положения пучка, а также устойчивость системы управления в целом.

Динамическую точность стабилизации установки пучка лазерного створа приводом можно повысить, используя вторую производную сигнала управления положением пучка створа. Ускорение изменения сигнала управления положением лазерного пучка пропорционально сумме моментов, действующих на зеркало $\alpha''(t) = \sum_{i}^{t} M_i(t) / I$, где I – момент инерции зеркала – объекта управления; $\sum_{i}^{t} M_i(t)$ – сумма всех моментов, действующих на объект стабилизации – лазерный пучок, включая возмущающие и стабилизирующие.

Формировать дополнительный сигнал, пропорциональный второй производной сигнала управления, необходимо при совпадении знаков ускорения и скорости сигнала стабилизации пучка, когда объект управления – зеркало разгоняется. В противном случае вторая производная сигнала управления ухудшает процесс стабилизации лазерного пучка. Благодаря тому, что спад дополнительного сигнала после снижения до заданной величины ускорения перемещения зеркала осуществляется по некоторой монотонной (линейной или экспоненциальной) зависимости, не скачкообразно, то привод плавно выходит на режим стабилизации. Переходный процесс установления зеркала и лазерного пучка в заданное положение становится менее колебательным. Использование второй производной сигнала управления только на этапе разгона при перемещении зеркала в новое положение позволит повысить еще и быстродействие лазерного створа. Так, при подаче на привод управления наклоном лазерного пучка ступеньки сигнала управления, зеркало устанавливается в требуемое положение примерно за время, равное $3\tau_{\delta}$ (τ_{δ} – постоянная времени привода). При использовании второй производной сигнала управления на этапе разгона установка зеркала в новое положение произойдет уже на первом этапе переходного процесса. В идеальном случае это дает трехкратный выигрыш в быстродействии с одновременным повышением точности стабилизации положения пучка в пространстве.

Очевидным недостатком пьезопривода лазерного створа, как прецизионного сканирующего устройства, является его подверженность влиянию шумовых вибраций, особенно той части, вектор которых действует в направлении наименьшей жесткости изгибных пластин. Идеальным вариантом привода управления зеркалом створа был бы вариант, основанный на соответствии первому закону Ньютона, при котором свободно подвешенное в приводе зеркало, обладающее некоторым моментом инерции, не было бы подвержено влиянию внешних возмущений.

Вибрации часто имеют неравномерное спектральное распределение с выбросами на частотах вращения электромеханических устройств и резонансных частот отдельных узлов системы. Верхняя граница низкочастотного спектра воздействия вибраций лежит в пределах 60 Гц и реже простирается до 300...400 Гц. Влияние вибрации, а также массы нагрузки привода – зеркала управления пучком, обуславливают возникновение равнодействующих сил инерции — вибрационной F_v и давления нагрузки $F_{\rm H}$, учитываемых изгибающим моментом $M=M_{\rm H}+M_{\rm v}$, определяемым соотношениями: $M_{\rm v}=F_{\rm v}l_{\rm v}$ и $M_{\rm H} = F_{\rm H} l_{\rm H}$ Здесь: $l_{\rm v}$ и $l_{\rm H}$ – расстояния от соответствующих точек приложения сил до биморфа. Сила $F_{\rm H}$ учитывает влияние не только веса зеркала и элементов его крепления, но и пространственную ориентацию изгибных элементов и элемента нагрузки – зеркала относительно направления вектора силы тяжести. Если силы инерции, вызванные воздействием вибрации с ускорением a_{ν} распределены по длине элементов равномерно, то для изгибного элемента (с удельной плотностью – ρ , шириной — b_i , толщиной — a_i и длиной — ℓ_i) имеем $F_{v} = (b_{i}\ell_{i}a_{i})\rho a_{v}$: или $M_{v} = (b_{i}\ell_{i}a_{i})a_{v}\rho\ell_{i}/2$.

Ускорение зеркала a_v пропорционально квадрату амплитуды вибраций, с учетом наложения амплитуд выбросов на частотах механического и электрического резонансов изгибного элемента и элементов привода. Линейные вибрации привода преобразуются в угловые колебания зеркала той же частоты за счет неизбежных погрешностей совмещения центра зеркала с центром масс и ограниченной жесткости конструкции. Момент инерции I_3 зеркала, стремящегося сохранить состояние покоя, противостоит моменту возмущающего воздействия. Момент инерции противодействия зеркала ускорению вынужденных колебаний a_v равен $M_I = I_3 a_v <<1$. При закреплении зеркала в шаровых шарнирах демпфирование воздействия вибрации на зеркало частично идет за счет «кулоновского» сухого трения в контактирующих поверхностях сфер шарниров. Величину демпфирования вибрации можно регулировать усилием обжатия внешней сферой сферы внутреннего пальца шарнира. Следует учесть, что увеличение демпфирования может привести к росту длительности переходного процесса установления зеркала в новое состояние на тактовом интервале управления. При адаптации часть спектра вибрации в основном компенсируется в замкнутом контуре, но влияние инерции нагрузки – сохраняется.

Управление приводом и лазерным пучком осуществляется векторным сигналом сканирования $\Delta Z(t,\tau)$ в плоскости Z(x,y), равным разности координат $\Delta Z(t,\tau) = Z(t_i) - Z_0(t_i)$. Здесь $Z(t_i)$ и $Z_0(t_i)$ – значения координат положения пучка лазера в моменты времени t_i и $t_i = t_i + \tau$, разделенные интервалом запаздывания, в течение которого формируется оценка положения и производится коррекция текущих координат пучка. Их изменение в точке нахождения подвижного объекта представляют собой случайный процесс, порождённый искажениями излучения, принимаемого наводимым на створ объектом. Наличие времени запаздывания при оценке и изменении координат порождает динамическую погрешность установки положения лазерного пучка относительно $Z_0(t_i)$ – координат его истинного положения в плоскости наблюдения

$$\Delta Z_{\sigma}(t,\tau) = Z(t_i) - Z_0(t_i).$$

Оценка динамической составляющей погрешности координат установки пучка в сигнале управления приводом лазерного створа может быть представлена в виде [1]

$$\Delta Z_g(t,\tau) = K_Z \sigma_Z [1 - \rho_Z^2(\tau)]^{1/2}$$

где K_Z — коэффициент, зависящий от статистики распределения флуктуаций координат в плоскости оценки лазерного пучка; σ_Z — среднее квадратичное отклонение и $\rho_Z(\tau)$ — автокорреляционная функция случайных смещений центра тяжести лазерного пучка. Вид последней определяется свойствами среды распространения излучения и нестабильностью положения самого объекта навигации. Для некоррелированных выборок $Z(t_{i,j})$ K_Z =0,5. Дисперсия сигнала управления приводом определяется как

$$\sigma[Z(t)] = 0.5\sigma_{Z}[\Delta Z(t,\tau)].$$

Эта оценка дисперсии является несмещенной, если выборки координат пучка $Z(t_i)$ и $Z(t_i)$ статистически независимы. Наличие корреляции между выборками координат $Z(t_i)$ и $Z(t_i)$ приводит к смещению оценки среднего квадратичного отклонения. Обычно, интервал τ между соседними выборками координат пучка при оценке положения объекта навигации и адаптации меньше интервала корреляции флуктуаций положения пучка для устойчивого управления его наведением и компенсацией этих случайных вариаций. На практике, сигнал управления приводом — это смесь регулярного или медленно меняющегося сигнала и случайных составляющих. Корреляционная функция такой смеси, из-за влияния регулярной составляющей, с увеличением интервала между выборками не стремится асимптотически к нулю, то появляется погрешность оценки среднего квадратичного отклонения составляющих сигнала управления, кратных частоте выборки координат пучка.

Для оценки влияния нестационарного, рефракционного тренда флуктуаций положения лазерного пучка интервал выборки значений его координат должен значительно превышать интервал корреляции выборок $Z(t_i)$ и $Z(t_i)$. Если учесть, что нестационарность флуктуаций наклона фронта лазерного пучка — процесс медленный (спектр лежит в диапазоне частот от 0 до 0,01 Гц), то можно ожидать, что он не окажет особого влияния на точность оценки эффективности привода в лазерном створе.

Мощность флуктуаций смещения, обусловленных нескомпенсированной частью случайного наклона лазерного пучка створа с адаптацией к стохастическому влиянию воздействия атмосферы — надводной среды и волнения — нестабильности поверхности перемещения объекта навигации, составит

$$P_{\Delta} = \frac{1}{T} \int_{0}^{T} \Delta Z^{2}(t,\tau) dt.$$

Представляя флуктуации координат лазерного пучка рядом Фурье и ограничивая разложение ряда $\sin \omega t$ – составляющей, в первом приближении получим мощность остаточных флуктуаций смещения пучка – сигнала управления приводом в виде

$$P_{\Delta} = P_0 (1 - \cos \omega_{\rm cp} \tau),$$

где P_0 – средняя мощность и ω_{cp} – средняя частота спектра остаточных случайных смещений пучка, обусловленных средой распространения излучения. Учитывая, что практически частота выборки координат пучка намного (в *m* раз) выше средней частоты случайных смещений ($\omega_{cp}\tau <<1$), то мощность остаточных флуктуаций сигнала управления пучком, как процесса флуктуаций его смещения в заданное положение, определится просто

$$P_{\Delta} = P_0 (1 - [1 - \omega_{\rm cp}^2 \tau^2]^{1/2}) \sim 10^{-m} P_0$$

Рассмотренный привод, созданный для корректора наклона лазерного пучка адаптивной системы, может быть использован и в системах контроля динамических характеристик и управления параметрами механических структур, в том числе для управления положением электродов подачи тока в средствах контактной сварки тонких слоев коррозионно-стойких материалов типа полиморфных сплавов циркония [11], т. к. обладает высокими временными (~ ед. мкс), линейным (~ долей мкм) и угловым (~10⁻⁶ рад) пространственными разрешениями в широком угловом динамическом диапазоне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Слободян С.М. Телевизионная диагностика лазерных пучков. – Барнаул: Азбука, 2006. – 224 с.
- Слободян С.М., Цупин А.А. Лазерные навигационные системы наведения автономных транспортных средств // Зарубежная радиоэлектроника. – 1988. – № 6. – С. 13–20.
- Ребрин Ю.К. Управление оптическим лучом в пространстве. М.: Советское радио, 1977. – 336 с.
- Джагупов Р.Г., Ерофеев А.А. Пьезокерамические элементы в приборостроении и автоматике. – Л.: Машиностроение, 1986. – 256 с.
- Слободян М.С., Слободян С.М. Консольный пьезопривод // Датчики и системы. – 2003. – № 3. – С. 47–48.
- 6. А.с. 1485188 СССР. МКИ⁴ G02B 26/10. Устройство углового отклонения / С.М. Слободян, А.Р. Яковлев // Открытия. Изобретения. — 1989. — № 21.

- А.с. 1420816 СССР. МКИ⁴ В63В 49/00. Оптическая система проводки судов / Ю.Н. Громов, А.А. Данилов, А.П. Евтеев, А.В. Рожанец, В.Г. Савельев, А.А. Цупин // Открытия. Изобретения. – 1989. – № 33.
- Слободян С.М. Многомернокоординатный привод микроуправления // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Т. 306. – № 5. – С. 92–95.
- Тевяшов В.И., Шушарин С.Н. Оптические дефлекторы для современных тепловизионных приборов // Оптический журнал. – 2007. – Т. 74. – № 1. – С. 12–16.
- А.с. 466825 СССР. МКИ¹ Н04N 3/16. Устройство телевизионной развертки / С.М. Слободян // Открытия. Изобретения. – 1973. – № 27.
- Слободян М.С. Управление свойствами соединений сплавов циркония. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2006. – 108 с.

Поступила 28.11.2006 г.

УДК 535.211

ТЕРМОДИФФУЗИОННЫЙ МЕХАНИЗМ ПРОСВЕТЛЕНИЯ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ СРЕДЫ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

В.И. Иванов, Ю.М. Карпец, К.Н. Окишев, А.И. Ливашвили

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск E-mail: valivi@mail.ru

Проанализирован термодиффузионный механизм просветления жидкофазной среды с поглощающими частицами под действием лазерного излучения. Экспериментально исследовано просветление водной суспензии частиц углерода под действием излучения He-Ne лазера. Исследована эффективность записи амплитудных динамических голограмм в двухкомпонентных средах с термодиффузионным механизмом модуляции коэффициента поглощения.

Введение

Термодиффузионный механизм оптической нелинейности многокомпонентных жидкофазных средах обусловлен перераспределением концентрации компонент в неоднородном световом поле и соответствующем изменении показателя преломления среды. В некоторых случаях (например, в микроэмульсиях вблизи критической точки) данный механизм обеспечивает коэффициент кубичной нелинейности среды значительно больший, чем обычная тепловая нелинейность, основанная на явлении теплового расширения среды [1, 2]. Кроме экспериментальных работ по исследованию термодиффузионного самовоздействия излучения, известны применения данной нелинейности для записи фазовых динамических голограмм [3, 4]. В случае различающихся коэффициентов поглощения компонент изменение их концентрации приводит также к изменению коэффициента поглощения среды (просветлению или потемнению), что может быть использовано для записи амплитудных (пропускающих) динамических голограмм.

Целью данной работы является теоретическое и экспериментальное исследование термодиффу-

зионного механизма просветления двухкомпонентной среды в поле лазерного излучения, а также анализ эффективности записи амплитудных динамических голограмм на основе данного механизма.

1. Модель термодиффузионного просветления среды

Рассмотрим двухкомпонентную жидкофазную среду, коэффициент поглощения которой α целиком определяется одним компонентом с концентрацией C ($\alpha = \beta C$, где $\beta = \partial \alpha / \partial C$ – константа среды). Для гауссова пучка распределение интенсивности падающего излучения в плоскости слоя $I = I_0 \exp(-r^2/\omega^2)$, где ω – радиус пучка, r – расстояние от оси пучка, рис. 1.

Систему балансных уравнений для концентрации С и теплового потока запишем следующим образом:

$$c_p, \rho \partial T / \partial t = -\operatorname{div} J_1 + \alpha I_0 \exp(-r^2 / \omega^2), \qquad (1)$$

$$\partial C / \partial t = -\operatorname{div} J_2, \tag{2}$$

где c_p , ρ – удельные теплоемкость и плотность среды, T – температура среды, J_1 и J_2 – тепловой и концентрационный потоки соответственно:

$$J_1 = -D_{11} \operatorname{grad} T, \qquad (3)$$