

УДК 535.3:621.78:621.373

## САМООРГАНИЗАЦИЯ ЛАЗЕРНОГО «AWL-SIGHT» ПРИ НАВЕДЕНИИ ОБЪЕКТА

А.А. Большанин, С.М. Слободян, А.Р. Яковлев

Томский политехнический университет  
E-mail: bola666@rambler.ru; sms\_46@ngs.ru

Предложены принципы управления уровнем плотности мощности облучения объекта узким «awl-sight»-шилообразным пучком лазера в процессе наведения подвижных объектов, реализующие на основе локационной обратной связи необходимое изменение параметров излучения «awl-sight» лазерного пучка. Определены оптимальные параметры и законы адаптивного управления мощностью лазерного пучка к воздействию на глаз оператора при визуальном и автоматическом наведении объекта по лазерному «awl-sight». Принцип самоорганизации лазерного «awl-sight» апробирован на стендовых испытаниях в адаптивной системе стабилизации параметров лазерных пучков при стохастических воздействиях турбулентной среды пространства наблюдения объектов.

**Ключевые слова:**

Лазерное зондирование, наведение объектов, ориентация, самоорганизация, обеспечение безопасности.

**Key words:**

Laser sounding, object guidance, alignment, self-organization, protection.

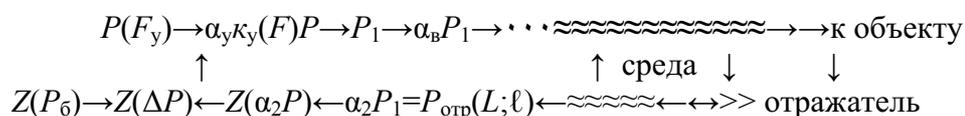
Несмотря на впечатляющие успехи в автоматизации управления физическими процессами и техническими средствами не следует ожидать, что человек, как звено систем управления, особенно в области управления воздушными, водными и наземными транспортными средствами [1–4], в ближайшем будущем будет полностью заменен автоматикой. Опыт создания лазерных створов, результаты исследований и натурных испытаний при навигации судов, управляемых человеком, в условиях речных (р. Нева, Москва) и морских (порты Балтики и Черного моря) акваторий приводят [1] к выводу, что для оптимального функционирования систем оптической и лазерной навигации и наведения объектов по лазерному указателю («awl-sight») опорного направления движения нужен учет не только адаптивных способностей человека, но и факторов его психофизиологического восприятия. Один из таких факторов: наличие, установленных санитарными нормами, безопасных для глаза – зрительного анализатора информации и датчика системы оценки навигационной обстановки – уровня облучения.

Существование предельного уровня облучения, как элемента технической системы, глаза человека на минимальной дистанции наведения объекта в определённой степени ограничивает предельно возможный диапазон, а значит и дальность действия средств лазерной навигации, простейший путь увеличения которой – повышение мощности излучения лазерного «awl-sight» – указателя рекомендуемой траектории движения объекта. Разрешению этого противоречия – обеспечению наибольшей дальности действия лазерного «awl-sight» – указателя опорного направления с соблюдением требований, норм и правил техники безопасности

на минимальной дистанции управления наведением объекта по рекомендуемой траектории и посвящена данная работа. Ниже проводится анализ одного из вариантов решения – путь динамической (в реальном времени) стабилизации уровня облучённости глаз человека (аналога приемника автоматической системы наведения) как специфического зрительного анализатора – звена системы управления подвижным объектом – на основе использования в линии обратной связи физического принципа лазерной локации [5, 6].

Во многих публикациях, например [6–9], посвящённых стабилизации параметров, в том числе мощности лазерного излучения, не рассматриваются вопросы, связанные с проблемой совместности требований физиологии человека с наилучшим применением аппаратных лазерных средств наведения подвижного объекта, то есть принятии во внимание специфичности психологии и зрительного восприятия лазерного излучения оператором. Для успешного применения лазерных «awl-sight» – указателей направления при наведении объектов, например, транспортных средств, учет реакции человека на лазерное излучение необходим. Так, при приближении объекта наведения к лазерному «awl-sight» – указателю опорного направления движения, облучённость или освещённость глаза оператора, управляющего объектом, возрастает с уменьшением расстояния по квадратичному закону.

Алгоритм предложенного принципа стабилизации облучения объекта наведения, управляемого человеком, с включением подвижного объекта в контур ранжирования управления стабилизацией мощности лазерного излучения «awl-sight» может быть представлен графически схемой:



Здесь  $P(F_y)$  – мощность излучения лазерного источника «*awl-sight*» указателя;  $F_y = \kappa_y(F)$  – функция управления мощностью излучения лазера «*awl-sight*» указателя направления;  $P_1 = \alpha_y \kappa_y(F)P$  – мощность лазерного излучения на выходе оптического элемента, управляющего величиной лазерного сигнала «*awl-sight*»;  $\alpha_y$  и  $\kappa_y(F)$  – коэффициент и функция управления величиной лазерного сигнала;  $\alpha_b P_1$  – мощность лазерного излучения на выходе «*awl-sight*» указателя опорного направления;  $\alpha_b$  – коэффициент передачи выходных оптических элементов указателя (защитного окна, формирующей лазерный пучок оптики и т. п.);  $\alpha_{атм}(L)$  и  $\alpha_{отр}(L)$  – ослабление, вносимое средой распространения (функция удаления объекта и геометрии оптической схемы) и отражателем (функция его размеров и геометрии);  $\alpha_2 P_1 = P_{отр}(L, l)$  – мощность отраженного объектом излучения, падающая на вход фотоприемника средства адаптации лазерного «*awl-sight*» указателя и системы лазерного наведения в целом;  $\alpha_2 = f(\kappa_{фп}, \alpha_{атм}, \alpha_{отр})$  – коэффициент передачи или преобразования лазерного сигнала, пропорциональный усилению фотоприемника  $\kappa_{фп}(\alpha_2 P/P_{отр})$ ;  $Z(\alpha_2 P)$  – выходной сигнал фотоприемника;  $Z(P_6)$  – сигнал пропорциональный стандарту безопасного уровня облученности глаза лазерным излучением;  $Z(\Delta P)$  – сигнал отклонения величины лазерного сигнала, принимаемого фотоприемником, от установленного стандартом безопасного для глаза уровня облучения;  $\kappa_1(Z_{\Delta P})$  – коэффициент передачи элементов тракта формирования сигнала управления – элементов регулирующих мощность лазерного источника или пропускание излучения.

Представленный алгоритм оптимальной самоорганизации уровня мощности облучения объекта реализуется введением в структуру лазерного «*awl-sight*» – указателя опорного направления дополнительного контура обратной связи, содержащего пассивный линейный элемент – оптический отражатель с коэффициентом передачи  $\leq 1$ , установленный на подвижном объекте. Контур обратной связи включается автоматически в момент облучения объекта лазерным пучком «*awl-sight*» указателя на предельно достижимой для автоматики дистанции обнаружения объекта, когда поток мощности облучения объекта и глаз оператора весьма мал. В общем случае контур обратной связи содержит нелинейный элемент – устройство управления мощностью лазерного излучения «*awl-sight*» указателя опорного направления. Управление мощностью лазерного излучения «*awl-sight*» указателя направления может быть выполнено двумя путями. В первых, управлением параметрами режима источника питания лазерного генератора и, во-вторых, варьированием значения коэффициента пропускания тракта передачи лазерного излучения в структуре «*awl-sight*» указателя направления. Во втором варианте для управления пропусканием оптического тракта указателя направления полезны свойства поляризации лазерного излучения; для расширения динамического диапазона управления – нелинейные свойства электрооптических кристал-

лов. Конкретные решения устройств управления мощностью излучения лазерного «*awl-sight*» ниже не рассматриваются; считается, что управление параметрами выполняется в реальном времени.

Для повышения быстродействия стабилизации уровня облучения лазерным «*awl-sight*» пучком в основу рассматриваемого алгоритма положено сочетание управления мощностью излучения нестабилизированного или стабилизированного лазера [7–9] с внешним контуром, включающим как звено контура управления сам объект наведения с угловым или, адекватным ему, зеркально-линзовым отражателем [5, 6], установленным на объекте наведения, то есть с активным внешним элементом контура стабилизации мощности лазерного излучения «*awl-sight*» указателя направления. Контур стабилизации мощности излучения активизируется с момента появления объекта в поле действия «*awl-sight*» указателя направления за счет включения объекта в цепь обратной связи контура управления. При отсутствии объекта контур управления мощностью лазерного излучения будет разомкнут и указатель направления генерирует максимальную мощность лазерного излучения, обеспечивая, таким образом, предельную дальность действия лазерного «*awl-sight*».

В известных моделях стабилизации мощности лазерного излучения основа управления – критерий постоянства передачи лазерного излучения во внешнюю среду. В настоящей работе, в отличие от известного, за основу принят критерий дистанционного динамического ранжирования безопасного для глаз оператора, управляющего объектом, уровня облученности объекта.

Для медленно движущихся объектов динамику стабилизации облучения лазерным «*awl-sight*» – указателем направления в первом приближении можно рассматривать в статическом – «замороженном» режиме. Поэтому, при малой скорости перемещения объекта, расстояние в интервале времени между двумя моментами облучения объекта сканирующим пучком лазерного «*awl-sight*» указателя или на интервале такта оценки отклонения величины отраженного сигнала, определяющего тактовый интервал оценки мощности сигнала несканирующего лазерного «*awl-sight*» указателя, меняется несущественно. Это значит, что анализ идет при условии допущения малости изменения принимаемой лазерным указателем направления мощности отраженного от объекта наблюдения лазерного сигнала на интервале времени между двумя смежными выборками сигнала. Тогда в основу стабилизации облучения объекта (значит и глаза оператора) лазерным пучком «*awl-sight*» указателя направления с активным контуром обратной связи для регулирования выходной мощности, например, линейно поляризованного излучения лазера путем управления взаимной угловой ориентацией скрещенных поляризованных или вращения призмы Волластона, может быть положен монотонный закон управления выходной мощностью лазерного излучения «*awl-sight*» указателя опорного направления.

Применим для стабилизации облучения объекта лазерным пучком «*awl-sight*» указателя направления в контуре обратной связи закон управления мощностью лазерного излучения  $\ddot{Z}+U=0$  с управляющим прозрачностью оптического тракта воздействием вида  $U=K_y^2 Z+2K_y \dot{Z}$ . Дифференциальное уравнение алгоритма управления мощностью лазерного излучения «*awl-sight*» указателя примет вид:

$$\ddot{Z} + 2\kappa_y \dot{Z} + \kappa_y^2 Z = 0.$$

Корни его решения относительно  $\kappa_y$  для рабочей точки соответствуют средней точке диапазона регулирования:

$$\begin{cases} Z = [Z_0 + (\dot{Z}_0 + \kappa_y Z_0)t] \exp(-\kappa_y t); \\ \dot{Z} = [\dot{Z}_0 - \kappa_y (\dot{Z}_0 + \kappa_y Z_0)t] \exp(-\kappa_y t). \end{cases}$$

Обеспечение в системе уравнений выполнения условия  $\dot{Z}_0 = -\kappa_y Z_0$  упрощает решение:

$$\begin{cases} Z = Z_0 \exp(-\kappa_y t); \\ \dot{Z} = \dot{Z}_0 \exp(-\kappa_y t). \end{cases}$$

Решая эту систему уравнений, находим:

$$\kappa_y = -\dot{Z} / Z \text{ и } U = \kappa_y \dot{Z}.$$

Полученное решение говорит о том, что величина рассогласования сигнала, соответствующего значению выходной мощности лазерного излучения пучка «*awl-sight*» указателя и сигнала управления отражающего уровень мощности лазерного облучения объекта наведения плавно изменяются во времени по закону  $\exp(-\kappa_y t)$ , что соответствует аperiodическому процессу управления уровнем выходной мощности лазерного указателя направления с нулевым перерегулированием. Экспоненциальный закон управления как плавное воздействие отрабатывается устройствами управления мощностью излучения лазерного пучка без возникновения колебательного переходного процесса в элементах регулирования прозрачности оптического тракта и мощности лазера. Закономерность изменения мощности в координатах  $(Z; \dot{Z})$  линейная.

Диапазон управления прозрачностью оптического тракта «*awl-sight*» указателя часто на практике ограничен некоторой величиной  $U_{\max} \geq |Z^2/Z|$ . Рассмотренный алгоритм стабилизации мощности лазерного облучения объекта обеспечивает изменение мощности излучения от максимального до нулевого, то есть до полного подавления лазерного сигнала. При малом значении  $\kappa_y$  время переходного процесса установки требуемой мощности лазерного излучения может быть большим. Это приводит к необходимости ограничения минимального значения  $\kappa_y$ . Увеличение коэффициента передачи контура управления мощностью лазерного облучения объекта для повышения быстродействия вызовет нарушение монотонности, т. к. при неизвестных реальных условиях трудно предположить, будет ли выполнено установленное ограничение на управление мощностью.

Описанный алгоритм реализует пропорциональный закон управления мощностью лазерного излучения «*awl-sight*» указателя опорного направления.

При рассмотренном выше законе управления мощностью лазерного пучка и скоростном объекте наведения по лазерному «*awl-sight*» указателю возможны, особенно в начальный момент его появления в зоне наведения, отклонения от безопасного уровня лазерного сигнала облучающего объект, который может приводить к кратковременному «дискомфорту» оператора. Тогда для стабилизации уровня плотности облучения объекта и приведения выходной мощности лазерного излучения «*awl-sight*» указателя к среднему значению уровня плотности мощности установленного стандартом безопасности может быть использован закон управления с более высоким быстродействием понижения плотности мощности излучения лазерного пучка указателя направления. Рассмотрим этот случай подробнее.

Приведение величины лазерного сигнала или равнозначно распределения плотности мощности лазерного пучка из некоторой области значений с текущими координатами  $Z_T = (Z_T; \dot{Z}_T)$  в центральную область динамического диапазона его значений, совмещенного с центром области, заданных стандартом с безопасных для глаза значений  $Z_0$  ( $Z_0=0; \dot{Z}_0=0$ ), осуществляемое управляющим устройством с точностью  $(|Z_0| < \Delta Z; |\dot{Z}_0| < \Delta \dot{Z})$  и временем приведения  $t_H$  зададим законом управления

$$\ddot{Z} - U = 0, \tag{1}$$

где  $U$  – управляющее воздействие вида

$$U = -\kappa \dot{Z}^2 / Z, \text{ при } |U| \leq U_m. \tag{2}$$

Здесь  $\kappa$  – коэффициент, удовлетворяющий условию  $0,5 \leq \kappa < 1$ , и  $U_m$  – максимальное значение управляющего воздействия.

Для точного приведения значения уровня плотности мощности лазерного пучка «*awl-sight*» указателя направления к центральной точке динамического диапазона варьируемых значений мощности как системы координат, необходимо, чтобы управляющее изменением мощности лазерного пучка воздействие менялось быстро, но плавно, от максимального до нулевого значения. Выбранный выше закон управления дает необходимое плавное снижение скорости процесса изменения плотности мощности лазерного пучка по мере приближения его значения к центральной точке диапазона с высоким качеством переходного процесса приведения плотности мощности лазерного пучка к центру динамического диапазона управления. При этом в центральной области значений создается большой запас по диапазону сигналов управления, который может быть использован для коррекции возмущающих атмосферных воздействий одновременно с приведением к требуемому уровню мощности лазерного пучка «*awl-sight*» указателя. Решение уравнения (1) имеет вид:

$$\begin{cases} Z(t) = (C_1 t_H + C_0)^{\frac{\kappa}{1-\kappa}}; \\ \dot{Z}(t) = \frac{\kappa}{1-\kappa} C_1 (C_1 t_H + C_0)^{\frac{2\kappa-1}{1-\kappa}}, \end{cases} \quad (3)$$

где  $C_1$  и  $C_0$  – некоторые постоянные величины, определяющие  $t_H$  – интервал времени процесса приведения плотности мощности лазерного «*awl-sight*» пучка в центральную область динамического диапазона. Если момент начала управления плотностью мощностью лазерного пучка начинается с некоторой области диапазона значений  $Z(t)=[Z_m; Z_M]$ , то постоянные решения (3) определяются из системы уравнений:

$$\begin{cases} C_0 = Z_M^{\frac{\kappa}{1-\kappa}}; \\ C_1 = \frac{1-\kappa}{\kappa} \dot{Z}_M Z_M^{\frac{1-2\kappa}{\kappa}}, \end{cases} \quad (4)$$

Выбранный закон управления (2), обеспечивающий приведение плотности мощности лазерного пучка в центр динамического диапазона значений за время равное

$$t_H = \frac{\kappa}{\kappa-1} \cdot \frac{Z_M}{\dot{Z}_M}, \quad (5)$$

с учетом формул (4), примет вид

$$U = -\kappa \frac{\dot{Z}_M^2}{Z_M^2} \cdot Z \quad (6)$$

– линейной зависимости от величины отклонения плотности мощности лазерного пучка «*awl-sight*» указателя направления от центра динамического диапазона. Для стабилизации мощности лазерного пучка указателя направления в контуре обратной связи может быть использован и вышеописанный алгоритм управления.

Экспериментальная амплитудная характеристика лазерного «*awl-sight*» указателя направления – зависимость мощности лазерного пучка от амплитуды управляющего сигнала усредненная по множеству значений – линейна. Распределение погрешностей измерения характеристик управления плотностью мощности лазерного излучения «*awl-sight*» опорного указателя соответствует нормальному закону.

Алгоритм управления плотностью мощности лазерного пучка, представленный системой уравнений (1–6), дает при многомерном управлении возможность управлять, наряду с опорным уровнем начальной установки плотности мощности лазерного излучения, например, изменением продольной фокусировки пучка, выполняя цели оптимального управления путем усиления/ослабления его мощности, для повышения быстродействия всей системы в целом. Быстродействие обеспечивается квадратичной зависимостью изменения плотности мощности излучения от линейного размера поперечного сечения пучка. Это особенно важно для пространственной стабилизации положения лазерного пучка как опорного направления. Стабилизация опорного направления пучка может быть выполнена путем снижения влияния высокочастотных составляющих спектральной плотности распределения флуктуаций мощности, возникающих из-за случайных смещений центра тяжести лазерного пучка, в том числе обусловленных стохастическим процессом перераспределения «спекл»-пятен во внутренней пространственной области конусного объёма лазерного пучка, которое вызвано динамикой конвективного и ветрового переноса атмосферных вихрей порядка внутреннего масштаба турбулентности через пространственную область потока излучения лазерного пучка [5]. Этот же канал управления может быть использован и как контур управления продольной фокусировкой излучения лазерного пучка облучаемого объект и как цепь компенсации влияния низкочастотной рефракционной составляющей суточного хода показателя преломления атмосферы при стабилизации опорного направления лазерного «*awl-sight*» указателя движения объекта наведения [4].

Современная техника позволяет создавать достаточно простые алгоритмы для достижения оптимального качества управления плотностью мощности лазерного пучка и предотвращения срыва управления плотностью мощности; качественное управление параметрами излучения лазерного указателя опорного направления на границе области устойчивости системы и другие алгоритмы повышения качества адаптации наведения, с учетом особенностей криволинейных траекторий движения объектов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Слободян С.М., Цупин А.А. Лазерные навигационные системы наведения автономных транспортных средств // Зарубежная радиоэлектроника. – 1988. – № 6. – С. 13–20.
2. Слободян С.М. Многомерногоординатный привод микроуправления // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Т. 306. – № 5. – С. 92–95.
3. Слободян С.М. Триангуляционный алгоритм трёхмерного перемещения зеркала управляемой оптической системы // Измерительная техника. Метрология. – 2003. – № 8. – С. 29–38.
4. Слободян М.С., Слободян С.М., Цупин А.А. Широкоформатный лазерный створ // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311. – № 2. – С. 34–39.
5. Сазанович В.М., Слободян С.М., Лукин В.П. Случайные смещения изображения при локации в турбулентной атмосфере // Известия вузов. Радиофизика. – 1980. – № 6. – С. 721–729.
6. Слободян С.М. Телевизионная диагностика лазерных пучков. – Барнаул: Азбука, 2006. – 224 с.
7. Галутва Г.В., Рязанцев А.И. Селекция типов колебаний и стабилизация частоты оптических квантовых генераторов. – М.: Связь, 1972. – 228 с.
8. Климов Ю.М. Основы расчета оптико-электронных приборов с лазерами. – М.: Советское радио, 1978. – 264 с.
9. Алленцев Б.М. Создание измерительного лазера с нормированными энергетическими характеристиками // Измерительная техника. – 1980. – № 7. – С. 21–22.

Поступила 20.03.2009 г.