

ЛАЗЕРНЫЙ СТОР ВИЗУАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ

С.М. Слободян, А.А. Цупин

Томский политехнический университет

E-mail: sms_46@ngs.ru

Показано, что существование санитарных норм на величину предельного уровня лазерного облучения глаз человека – оператора управления подвижным объектом (транспортным средством) – на минимальной дистанции наведения объекта, в определённой степени ограничивает предельно возможный диапазон, а значит, и дальность действия средств лазерной навигации. Дается решение этого противоречия, а именно, обеспечение наибольшей дальности действия лазерного створа с соблюдением требований, норм и правил техники безопасности на минимальной дистанции управления транспортным средством – судном, по рекомендуемой траектории. Предложен новый принцип построения лазерного створа для визуального и инструментального ориентирования подвижных объектов, реализуемый управлением параметрами лазерных лучей створа. Определены оптимальные параметры и закон изменения мощности лазерного пучка с учётом существующих норм и ограничений к воздействию на глаз оператора при визуальном ориентировании по лазерному створу.

Ключевые слова:

Лазер, створ, визуальное ориентирование, подвижный объект, воздействие на глаз.

Несмотря на впечатляющие успехи в автоматизации управления техническими средствами не следует ожидать, что человек, как звено систем управления, особенно в области управления воздушными, водными и наземными транспортными средствами [1–6], 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) акваториях приводят к выводу, что для оптимального функционирования систем оптической и лазерной навигации, ориентирования и проводки судов, возможно и других транспортных средств, по лазерным створам необходим учет не только адаптивных способностей человека, но и его психофизиологических факторов восприятия. Один из таких факторов предельного восприятия – наличие установленных санитарными производственными нормами, безопасных для глаза-анализатора информации и датчика системы оценки навигационной обстановки уровня лазерного облучения.

Существование предельного уровня лазерного облучения глаз человека на минимальной дистанции наведения объекта в определённой степени ограничивает предельно возможный диапазон, а значит дальность действия средств лазерной навигации. Простейший путь увеличения дальности действия лазерных инструментальных средств – повышение мощности излучения лазерного створа – указателя рекомендуемой траектории движения объекта. Разрешению этого противоречия – обеспечению наибольшей дальности действия лазерного створа с соблюдением требований, норм и правил техники безопасности на минимальной дистанции управления судном по рекомендуемой траектории – и посвящена данная работа. Ниже проводится анализ одного из вариантов решения этой проблемы – путь динамического (в реальном времени) управления уровнем облучённости глаз

человека как специфического зрительного анализатора – звена системы управления подвижным транспортным средством по принципу оптической локации [1, 4].

В публикациях, например [7, 8], посвящённых управлению параметрами, в том числе мощностью лазерного излучения, не учитываются факторы, связанные с решением проблемы совместимости требований физиологии человека с наилучшим применением аппаратных лазерных средств наведения подвижного объекта, то есть не принимается во внимание специфичность психологии и зрительного восприятия лазерного излучения оператором. Для успешного расширения областей применения, в том числе [9] с повышением мощности излучения лазерных створов при навигации объектов – транспортных средств, учет реакции человека на лазерное излучение необходим. Так, при приближении объекта навигации к лазерному створу облучённость или освещённость глаз оператора, управляющего объектом, возрастает с уменьшением расстояния по квадратичному закону. Это нарушает комфортность восприятия излучения указателя направления движения, раздражает оператора и затрудняет применение эффективных лазерных навигационных средств.

Алгоритм предложенного принципа управления величиной облучения объекта наведения, управляемого человеком, с включением подвижного объекта в контур ранжирования управления уровнем мощности лазерного излучения створа может быть представлен графически схемой, приводимой на рис. 1.

Здесь: $P(F_y)$ – мощность излучения лазерного источника створа; $F_y = \kappa_y(F)$ – функция управления мощностью излучения лазера створа; $P_1 = \alpha_y \kappa_y(F) P$ – мощность лазерного излучения на выходе оптического элемента, управляющего величиной лазерного сигнала; α_y и $\kappa_y(F)$ – коэффициент и функция управления величиной лазерного сигнала; $\alpha_y P_1$ – мощность лазерного излучения на выходе створа;

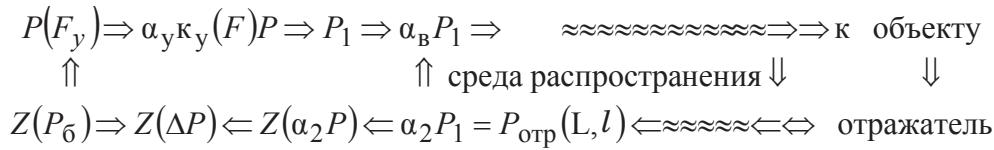


Рис. 1. Последовательность прохождения информационного (оптического и электрического) сигнала, составляющая сущность понятия «алгоритм»

$\alpha_{\text{в}}$ – коэффициент передачи выходных оптических элементов створа (защитного окна, формирующей лазерный пучок оптики и т. п.); $\alpha_{\text{атм}}(L)$ и $\alpha_{\text{отр}}(L)$ – ослабление, вносимое средой распространения (функция удаления объекта и геометрии оптической схемы) и отражателем (функция его размеров и геометрии); $\alpha_2 P_1 = P_{\text{отр}}(L, l)$ – мощность отраженного излучения объектом наведения, падающая на вход фотоприемника лазерного створа; $\alpha_2 = f(\kappa_{\text{фп}}, \alpha_{\text{атм}}, \alpha_{\text{отр}})$ – коэффициент передачи или преобразования лазерного сигнала, пропорциональный усилению фотоприемника $\kappa_{\text{фп}}(\alpha_2 P / P_{\text{отр}})$; $Z(\alpha_2 P)$ – выходной сигнал фотоприемника; $Z(P_6)$ – сигнал, пропорциональный величине установленного стандартом безопасного уровня облученности глаза лазерным излучением; $Z(\Delta P)$ – сигнал отклонения величины лазерного сигнала, принимаемого створом от установленного стандартом безопасного для глаза уровня облучения; $\kappa_y(Z_{\Delta P})$ – коэффициент передачи элементов тракта формирования сигнала управления, регулирующих мощность излучения лазерного источника или элементов оптического тракта, изменяющих коэффициент пропускания излучения. Под алгоритмом принято [4] понимать «предписание, однозначно задающее процесс преобразования исходной информации в виде последовательности элементарных дискретных шагов, приводящих за конечное число их применений к результату».

Представленный алгоритм, или, другими словами, процесс управления мощностью облучения объекта, реализуется введением в структуру лазерного створа дополнительного контура обратной связи, содержащего пассивный линейный элемент – оптический отражатель с коэффициентом передачи < 1 , установленный на подвижном объекте. Контур обратной связи включается автоматически в момент облучения объекта лазерным лучом створа на предельно достижимой для автоматики дистанции обнаружения объекта, когда световой поток облучения объекта, а значит, и глаз оператора очень мал. В общем случае контур обратной связи содержит нелинейный элемент – устройство управления мощностью лазерного излучения створа. Управление мощностью лазерного излучения створа может быть выполнено, например, управлением параметрами режима работы лазерного генератора и изменением коэффициента пропускания тракта передачи лазерного излучения в структуре створа. Во втором варианте для управления пропусканием оптического тракта створа полезно использовать особенности изменения свойств поляризации лазерного излучения; для расширения

динамического диапазона управления – нелинейные свойства электрооптических кристаллов. Конкретные решения устройств управления мощностью лазерного излучения ниже не рассматриваются; считается, что управление параметрами выполняется в реальном времени.

Для повышения быстродействия управления величиной уровня облучения объекта лазерным пучком в основу рассматриваемого алгоритма положено сочетание управления мощностью излучения не- или стабилизированного лазера [7, 8] с внешним контуром, включающим, как звено контура управления, сам объект навигации с уголко-вым или адекватным ему зеркально-линзовым отражателем [4], установленным на объекте навигации, то есть с активным внешним элементом контура управления мощностью лазерного излучения створа. Контур управления мощностью излучения створа активизируется с момента появления объекта навигации в поле действия створа за счет включения объекта в цепь обратной связи контура управления. При отсутствии объекта контур управления мощностью лазерного излучения разомкнут. Створ генерирует максимальную мощность лазерного излучения для достижения предельной дальности действия инструментального средства навигации (рис. 2).

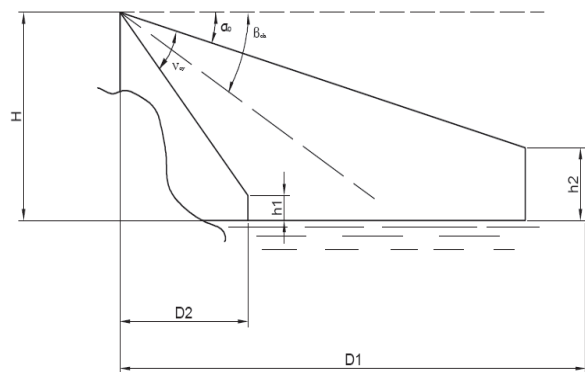


Рис. 2. Рабочая зона лазерного створа по вертикали: H – высота маяка над уровнем воды; h_1 – высота наблюдателя над минимальной высотой рубки; h_2 – высота глаз наблюдателя для максимальной высоты рубки; α_0 – угол наклона луча маяка при максимальном удалении судна; β_0 – угол наклона к горизонту биссектрисы вертикального угла; v_{0y} – рабочая зона створа; D_1 и D_2 – максимальное и минимальное удаление судна от места установки створа

В известных устройствах и моделях лазерных створов [1, 2] в качестве основы управления формированием мощности лазерного излучения положен критерий постоянства мощности передачи ла-

зерного излучения во внешнюю среду. В настоящей работе, в отличие от известных технических решений, за основу принят критерий дистанционного динамического ранжирования уровня лазерной облучённости объекта навигации, безопасного для глаз оператора, управляющего объектом.

Для медленно движущихся объектов навигации динамику процесса управления мощностью облучения объекта лазерным створом в первом приближении можно рассматривать в статическом, «замороженном», режиме. Тогда при малой скорости перемещения объекта расстояние в интервале времени между двумя моментами облучения объекта сканирующим пучком лазерного створа типа «бегущий огонь» [1] или на интервале такта оценки отклонения величины отражённого сигнала, определяющего тактовый интервал оценки мощности сигнала не сканирующего лазерного створа, меняется несущественно. Это значит, что анализ идет при допущении малости изменения принимаемой створом мощности отражённого лазерного сигнала на интервале времени между двумя смежными выборками сигнала. Тогда в основу алгоритма управления мощностью облучения объекта (значит и глаза оператора) лазерным пучком створа с активным контуром обратной связи для регулирования выходной мощности, например, линейно поляризованного излучения лазера путем управления взаимной угловой ориентацией скрещенных поляроидов или вращения призмы Волластона, может быть положен монотонный закон управления выходной мощностью лазерного излучения.

Применим для стабилизации облучения объекта лазерным пучком створа в контуре обратной связи закон управления мощностью лазерного излучения $\ddot{Z} + U = 0$ с управляющим прозрачностью оптического тракта воздействием вида $U = \kappa_y \dot{Z} + 2\kappa_y \ddot{Z}$.

Дифференциальное уравнение, решение которого определяет характер изменения закономерности процесса управления мощностью лазерного излучения створа, примет вид:

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

Корни его решения относительно κ_y для рабочей точки Z_0 соответствуют средней точке диапазона регулирования:

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

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

Обеспечив в системе выполнение условия $\dot{Z}_0 = -\kappa_y Z_0$, упростим решение:

$$Z = Z_0 \exp(-\kappa_y t);$$

$$\dot{Z} = \dot{Z}_0 \exp(-\kappa_y t).$$

Отсюда $\kappa_y = -\dot{Z}/Z$ и $U = \kappa_y \dot{Z}$. Полученное решение говорит о том, что величина рассогласования сигнала, соответствующего значению превышения выходной мощности лазерного излучения пучка створа относительно требуемой по нормам, и сиг-

нала управления (рис. 3), отражающего необходимую меру ослабления мощности лазерного сигнала луча створа и, следовательно, закономерность ослабления требуемой величины уровня облучения объекта навигации, плавно изменяются во времени по закону $\exp(-\kappa_y t)$, что соответствует аperiодическому процессу управления уровнем выходной мощности лазерного створа с нулевым перерегулированием. Экспоненциальный закон управления как плавное воздействие отрабатывается устройствами управления мощностью излучения лазерного пучка без возникновения колебаний процесса в элементах регулирования прозрачности оптического тракта и мощности лазера. Закономерность изменения мощности в координатах $(Z; \dot{Z})$ линейная. Диапазон управления прозрачностью оптического тракта створа ограничен величиной $U_{\max} \geq |\dot{Z}^2/Z|$.

Найденная решением системы уравнений закономерность процесса управления облучением объекта обеспечивает изменение мощности излучения от максимального до нулевого, то есть до полного подавления лазерного сигнала. При малом значении κ_y время переходного процесса установившейся требуемой мощности лазерного излучения может быть большим. Это приводит к необходимости ограничения минимального значения κ_y . Увеличение коэффициента передачи контура управления облучением объекта для повышения быстродействия должно быть согласовано с уровнями установки ограничений на управление. Превышение установленного ограничения может приводить к нарушению монотонности управления, так как при неизвестных реальных условиях трудно предположить, будет ли строгое выполнение ограничений на управление [4]. Описанный алгоритм реализует пропорциональный закон управления мощностью лазерного излучения створа.

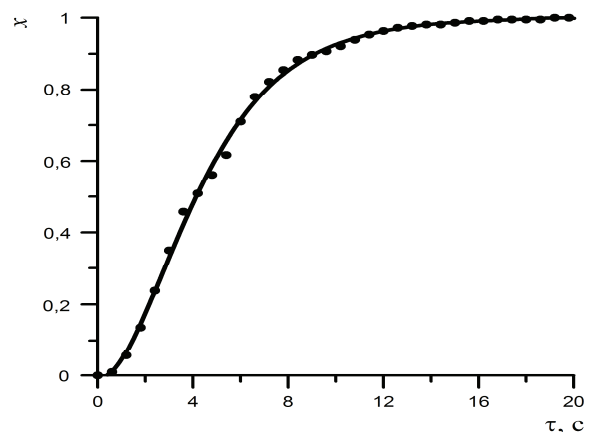


Рис. 3. Типичный вид экспоненциального закона изменения сигнала управления устройством управления мощностью луча лазерного створа (x – скорость снижения мощности, отн. ед.; τ – время, отн. ед.) – графическая иллюстрация поведения нормированного решения системы дифференциальных уравнений управления мощностью: сплошная линия – теоретическая; точки – данные эксперимента

Образец одного из вариантов экспериментальных макетов лазерного сканирующего маяка «ЛСМ-1», составляющего основу лазерного створа «ЛС-1», представлен на рис. 4.

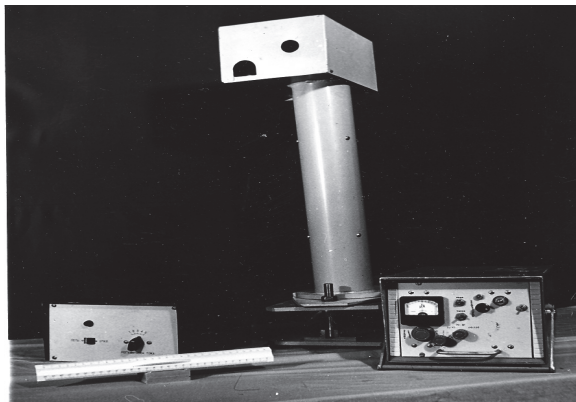


Рис. 4. Экспериментальный образец лазерного сканирующего маяка «ЛСМ-1» – компоненты комплекса лазерных створов «ЛС-1» ориентирования транспортных средств

Закономерность процесса управления мощностью лазерного пучка, представленная решением приведённой выше аналитической системой уравнений, дает, например, при многомерном управлении, возможность управлять, наряду с опорным уровнем начальной установки мощности лазерного излучения, фокусировкой лучей створа в качестве канала оптимального управления мощностью для повышения быстродействия всей системы в целом. Это особенно важно для снижения влияния высокочастотных составляющих спектральной плотности распределения флуктуаций мощности, из-за случайных смещений центра тяжести лучей, в том числе обусловленных стохастическим процессом перераспределения «спекл»-пятен внутри луча, которое вызвано динамикой конвективного и ветрового переноса атмосферных вихрей порядка внутреннего масштаба турбулентности через область лазерного луча. Этот же канал управления может быть использован как контур управления продольной фокусировкой лазерного луча створа и как контур компенсации влияния низкочастотной рефракционной составляющей суточного хода показателя преломления атмосферы в визуальном лазерном створе.

Таким образом, в работе исследован вариант предложенного авторами решения проблемы увеличения дальности действия лазерных средств инструментальной навигации подвижных объектов, управляемых оператором, с соблюдением норм санитарной лазерной безопасности. Сущность решения заключается в динамическом регулировании в реальном времени уровня облучённости глаз чело-

века как специфического зрительного анализатора оператора – звена системы управления подвижным транспортным средством. В основу решения положен принцип оптической локации по критерию динамического ранжирования уровня облучённости объекта, безопасного для глаз оператора, управляющего подвижным объектом.

Современная микропроцессорная техника [10] позволяет создавать достаточно простые устройства управления параметрами лазерного створа, выполняющие, кроме автоматической коррекции простейших мод искажений волнового фронта пучка, и другие функции: пространственное совмещение фронтов опорного и отраженного объектом излучения; оценку значения интенсивности турбулентности среды над водной поверхностью по структурной характеристике показателя преломления атмосферы; вычисление статистических характеристик результата воздействия среды на параметры лазерного пучка створа (статистическая обработка данных); автоматическую подстройку значений сигнала управления и его производных для достижения оптимального качества управления мощностью лазерного пучка и предотвращения срыва управления мощностью; качественное управление параметрами излучения лазерного створа на границе области устойчивости системы и другие варианты повышения качества лазерного створа, включая управление траекторией движения объектов навигации.

Выводы

Найден закон управления лазерным облучением подвижного объекта навигации, обеспечивающий изменение мощности излучения от максимального до нулевого уровня, то есть до полного подавления лазерного сигнала. Экспоненциальный закон управления мощностью лазерного луча створа, представленный решением системы аналитических уравнений, дает возможность управлять, наряду с опорным уровнем начальной установки мощности лазерного излучения, фокусировкой лазерных лучей створа в качестве канала оптимального управления (усиления/ослабления) выходной мощностью лазерного створа для повышения быстродействия всей навигационной системы в целом при визуальном и инструментальном определении положения надводного подвижного объекта в процессе траекторного управления. Показано, что канал управления может быть использован как контур управления продольной фокусировкой лазерных лучей створа и как контур компенсации влияния низкочастотной рефракционной составляющей суточного хода показателя преломления атмосферы в визуальном лазерном створе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цупин А.А., Слободян С.М. Лазерные средства навигационного оборудования для ориентирования подвижных объектов. – М.: Мэйлер, 2013. – 166 с.
2. Слободян С.М., Цупин А.А. Лазерные навигационные системы наведения автономных транспортных средств // Зарубежная радиоэлектроника. – 1988. – № 6. – С. 13–20.
3. Слободян М.С., Слободян С.М., Цупин А.А. Широкоформатный лазерный створ // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311. – № 2. – С. 34–39.
4. Слободян С.М. Телевизионная диагностика лазерных пучков. – Барнаул: Азбука, 2006. – 224 с.
5. Цупин А.А., Слободян С.М., Шаталова Е.А. Информационные и психофизиологические аспекты восприятия судоводителями принципов лазерной навигации при проводке судов // Фундаментальные исследования. – 2009. – № 5–3. – С. 94.
6. Цупин А.А., Слободян С.М. Многофункциональные визуально-инструментальные лазерные навигационные комплексы морского применения // Фундаментальные исследования. – 2009. – № 5–3. – С. 102–103.
7. Галутва Г.В., Рязанцев А.И. Селекция типов колебаний и стабилизация частоты оптических квантовых генераторов. – М.: Связь, 1972. – 228 с.
8. Алентев Б.М. Создание измерительного лазера с нормированными энергетическими характеристиками // Измерительная техника. – 1980. – № 7. – С. 21–22.
9. Пономарев А.А., Слободян С.М. Система автоматического контроля лазерной плазмы при воздействии на материалы // Контроль. Диагностика. – 2010. – № 3. – С. 62–63.
10. Бродин Б.В., Шагурин И.И. Микроконтроллеры: Справочник. – М.: ЭКОМ, 1999. – 395 с.

Поступила 01.06.2013 г.

UDC 621.375.876:621.373.8:551.521

LASER RIVER ROUTE OF VISUAL NAVIGATION

S.M. Slobodyan, A.A. Tsupin

Tomsk Polytechnic University

It was shown that the existing sanitary standards for the value of ultimate level of laser irradiation for man (operator of controlling dynamic object – vehicle) eyes limit to some extent the marginal and operation range of laser navigation means. This contradiction is solved – the extreme operation range of laser river route is provided with compliance with the requirements, standards and safety regulations at minimum distance of vehicle (vessel) by the specified route. The authors have proposed a new principle of designing laser river route for dynamic object vision and instrument orientation which is implemented by controlling the parameters of the river route laser rays. Optimal parameters and the law of changing the laser beam power were determined considering the existing standards and restrictions for impact on operator eyes at vision orientation by laser river route.

Key words:

Laser, river route, vision orientation, dynamic object, impact on eyes.

REFERENCES

1. Tsupin A.A., Slobodyan S.M. *Lasernye sredstva navigatsionnogo oborudovaniya dla orientirovaniya podviznykh ob'ektov* [Laser system navigation mobile objects]. Moscow, Meyler, 2013. 166 p.
2. Slobodyan S.M., Tsupin A.A. *Lasernye navigatsionnye sistemy navedeniya avtonomnykh transportnykh sredstv* [Laser system navigation of mobile transport objects]. *Zarubezhnaya radioelektronika*, 1988, no. 6. pp. 13–20.
3. Slobodyan M.S., Slobodyan S.M., Tsupin A.A. *Shirokoformatnyy lasernyy stvor* [Wide laser river route]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2007, vol. 311, no. 2, pp. 34–39.
4. Slobodyan S.M. *Televizionnaya diagnostika lasernih puchkov* [Television diagnosis of laser light]. Barnaul, Azbuka, 2006. 224 p.
5. Tsupin A.A., Slobodyan S.M., Shatalova E.A. *Informatsionnye i psikhofiziologicheskie aspekty vospriyatiya sudovoditelyami printsipov lasernoy navigatsii pri provodke sudov* [Information and psychology aspects for laser navigation]. *Fundamentalnye issledovaniya*, 2009, no. 5–3, pp. 94.
6. Tsupin A.A., Slobodyan S.M. *Mnogofunktsionalnuye visualno-instrumentalnye lasernye navigatsionnye komplekсы morskogo primeneniya* [Polyfunctional visual-instrument marine laser navigation complexes]. *Fundamentalnye issledovaniya*, 2009, no. 5–3, pp. 102–103.
7. Galutva G.V., Ryazantsev A.I. *Seleksiya tipov kolebaniy i stabilizatsiya chastot opticheskikh kvantovykh generatorov* [Mode selection and stabilization in laser]. Moscow, Svyaz, 1972. 228 p.
8. Alentev B.M. *Sozdanie izmeritelnogo lazera s normirovannymi energeticheskimi kharakteristikami* [Measurement laser of normal energy parameters]. *Measurement Techniques*, 1980, no. 7, pp. 21–22.
9. Ponomarev A.A., Slobodyan S.M. *Sistema avtomaticheskogo kontrolya lasernoy plasmy pri vozdeystvii na materialy* [Plant for the automatic control laser-induced heating of structures]. *Control. Diagnosis*, 2010, no. 3, pp. 62–63.
10. Brodin B.V., Shagurin I.I. *Mikrokontrollery: Spravochnik* [Microsystems: Handbook]. Moscow, ECOM Publ., 1999. 395 p.