

Г.А. Калошин, С.А. Шишкин

Расчет дальности видения световых сигналов навигационного комплекса со сканирующим полупроводниковым лазером с электронной накачкой. Ч. I. Энергетические параметры источника и пороговые характеристики зрения

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 14.07.2006 г.

Проведены расчеты энергетических и временных характеристик навигационного комплекса на основе сканирующего полупроводникового лазера с электронной накачкой, в котором электронный пучок сканируется по полупроводниковому кристаллу в режиме телевизионного разложения, осуществляя строчно-кадровую развертку. Осевая сила излучения на выходе лазерного маяка составила 131,2 Вт/ср для каждой длины волны излучения $\lambda = 0,52; 0,57$ и $0,63$ мкм.

Определены временные и пространственные характеристики ориентационной зоны и размеры «зоны неопределенности». Показано, что полученная величина «зоны неопределенности» не может оказать сколь угодно существенного влияния на качество навигационной информации.

Рассмотрены критерии решения зрительной задачи, и рассчитаны спектральные пороговые и комфортные характеристики зрения в зависимости от условий наблюдения.

Введение

Эффективность работы оптико-электронных систем в приземном слое атмосферы определяется выходными параметрами источника, пороговыми характеристиками приемника и прозрачностью атмосферы, которая в видимой области спектра, в основном, определяется атмосферными аэрозолями. Поэтому расчет дальности видимости зрительного лазерного навигационного комплекса со сканирующим полупроводниковым лазером с электронной накачкой (СПЛЭН) в условиях прибрежной атмосферы условно можно разделить на три блока: расчет энергетических и временных характеристик полупроводникового лазера, расчет пороговых характеристик зрения и расчет ослабления лазерного излучения в приземном слое морской прибрежной атмосферы.

К настоящему времени при обеспечении безопасности судоходства в стесненной зоне прибрежного плавания наибольшее распространение получили лазерные средства навигационного оборудования (СНО) с оптико-механическим управлением лазерными пучками [1–5]. Вопросы видимости и точностные характеристики таких лазерных СНО достаточно хорошо изучены [1, 6–8].

Однако в ряде случаев лазерные СНО с оптико-механическими устройствами управления лазерными пучками не удовлетворяют потребностям практики по необходимому быстродействию, разрешению и точности. Одним из возможных путей решений данной проблемы является использование в зрительных лазерных СНО полупроводникового сканирующего лазера с электронной накачкой [9–11]. СПЛЭН осу-

ществляет управление энергетическими и пространственными характеристиками излучения с помощью электронно-лучевой трубки со сканирующим электронным пучком и имеет возможность получения на выходе одного лазера набора пространственно разделенных излучений с разными длинами волн.

До настоящего времени всесторонней оценки эффективности по дальности такого комплекса выполнено не было.

1. Расчет энергетических характеристик СПЛЭН в зонах ориентирования

1.1. Оптическая схема СПЛЭН

Сканирующий полупроводниковый лазер с электронной накачкой состоит из электронно-лучевой трубки с оптико-формирующей системой (ОФС) и полупроводниковой мишени (ПМ), находящейся на торце головной части кинескопа [10, 11]. Принцип работы СПЛЭН основан на преобразовании энергии электронного пучка в полупроводниковом кристалле, являвшемся активной средой лазера, в оптическое излучение. Лазер генерирует излучение на трех длинах волн $\lambda = 0,52; 0,57$ и $0,63$ мкм с выходной мощностью порядка 1 Вт на каждой длине волны (вопросы лазерной безопасности в данной статье не рассматриваются). Длины волн определяются типом кристалла, выбором стехиометрического состава полупроводникового материала и соответствуют основным цветовым характеристикам зрительных СНО [4, 5].

Оптико-формирующая система состоит из двух сферических линз, формирует диаграмму направленности излучения со средней расходимостью, равной 0,34 угл. мин, и осуществляет перенос изображения тела излучения в зону ориентирования. Зона ориентирования формируется синхронно с перемещением электронного пучка по полупроводниковому кристаллу. ОФС обеспечивает высокое качество изображения как для лазерной мишени, так и для диаграммы направленности пучков зоны ориентации.

Рассмотрим оптическую схему СПЛЭН (рис. 1).

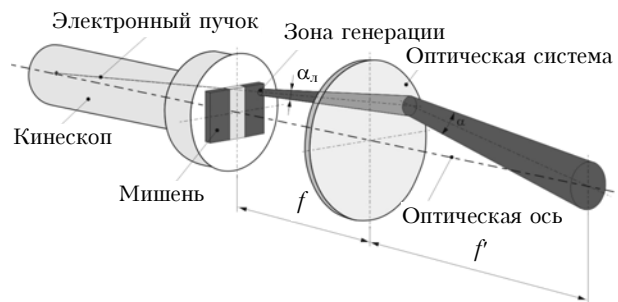


Рис. 1. Упрощенная оптическая схема навигационного комплекса на основе СПЛЭН

В электронно-лучевой трубке формируется электронный пучок, который сканируется по полупроводниковому кристаллу (мишени) в режиме телевизионного разложения, осуществляя строчно-кадровую развертку. Время одной строки $t_{стр}$ составляет $1,75 \cdot 10^{-5}$ с. Частота кадровой развертки ν равна 75 Гц. Зона генерации излучения совпадает с зоной сканирования электронного пучка. Характеристики электронного пучка и оптические параметры ОФС позволяют регулировать апертуру, форму, плотность распределения выходящего излучения и, соответственно, временные и пространственные характеристики ориентационной зоны. В зависимости от параметров сканирования навигационный комплекс (далее – лазерный маяк) способен формировать на выходе световой сигнал в проблесковом режиме с различной временной модуляцией.

Оптический диаметр ОФС d составляет 168 мм, а фокусное расстояние $f = 302$ мм. Мишень устанавливается в фокусе ОФС перпендикулярно и симметрично его оптической оси и состоит из трех кристаллов, расположенных, как показано на рис. 2. Горизонтальные размеры боковых кристаллов $D_6 = 16,285$ мм, центрального – $D_{ц} = 5,43$ мм. Вертикальный размер кристаллов $H = 28$ мм.

Источником излучения в СПЛЭН является область кристалла ПМ, на которую попадает сфокусированный электронный пучок (см. рис. 2). Эта область является зоной генерации и имеет форму круга диаметром $d_{л} = 30$ мкм. Выходящее из зоны генерации оптическое излучение распространяется расходящимся пучком в пределах телесного угла Ω с плоским углом α_1 , равным 25° . После преобразования в ОФС расходимость пучка излучения α составляет 0,34 угл. мин.

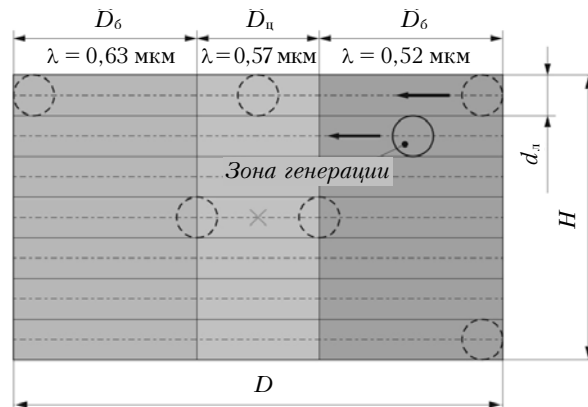


Рис. 2. Схематическое изображение мишени для расчета коэффициента мерцания

В результате на выходе маяка формируются три цветовых сектора ориентирования: зеленый, желтый и красный. Секторы имеют следующие угловые размеры:

- центральный сектор (желтый) по горизонтали $\alpha_{ц} = \alpha_{ж} = 1^\circ$;
- боковые секторы (зеленый, красный) по горизонтали $\alpha_6 = \alpha_к = \alpha_3 = 3^\circ$;
- общий вертикальный размер секторов $\beta = 5^\circ$.

1.2. Расчет размеров «зоны неопределенности»

На выходе оптической системы маяка происходит перемешивание цветовых секторов (рис. 3, а–в), что вызывает появление зоны неопределенности.

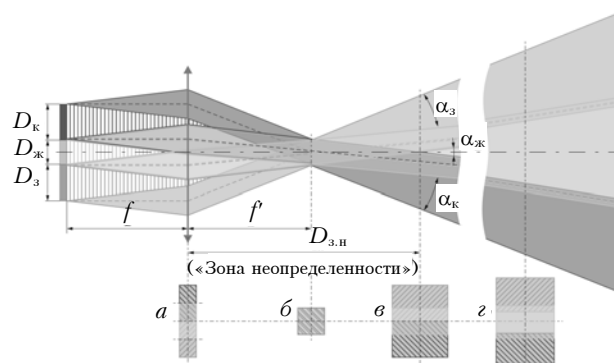


Рис. 3. Принцип формирования цветовых зон

После этой области сформированные цветовые секторы становятся практически отдельными, за исключением двух узких переходных зон между соседними секторами (рис. 3, г). Ширина этих переходных зон зависит от размера зоны генерации в месте перехода между кристаллами мишени и от характеристик оптической системы, задающей размеры сечения светового пучка. Использование двухлинзовой системы с точки зрения качества изображения является допустимым при заданных точностных характеристиках ориентационной зоны с погрешностью поддержания границ зоны, равной $1'$, на уровне 3σ . Повышение качества изображения за счет полной

коррекции aberrаций по всему световому полю может быть достигнута применением многолинзового объектива. Однако это приводит к сильному усложнению и удорожанию конструкции при незначительном улучшении качества визуальной регистрируемой навигационной информации. В этом смысле выбор двухлинзового объектива является оптимальным.

Оценим размеры «зоны неопределенности» $D_{з.н.}$. Для этого используем принципы геометрической оптики и схему, показанную на рис. 4.

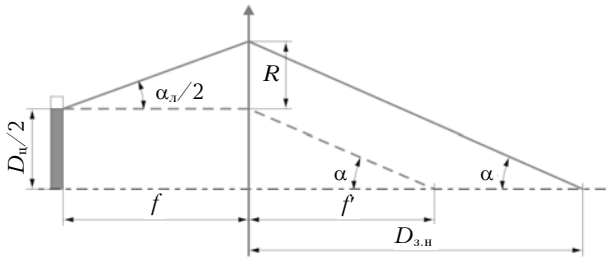


Рис. 4. Геометрическая схема хода лучей сканирующего пучка для расчета «зоны неопределенности»

Величину длины «зоны неопределенности» по оптической оси можно описать выражением

$$D_{з.н.} = \frac{2f}{D_{ц.}} \left(R + \frac{D_{ц.}}{2} \right), \quad (1.1)$$

где $D_{ц.}$ – горизонтальный размер центральной области полупроводниковой мишени, мм; R – радиус сечения пучка, мм, в плоскости объектива, определяемый по формуле

$$R = f \operatorname{tg}(\alpha_{л}/2). \quad (1.2)$$

При $\alpha_{л} = 25^\circ$ и фокусном расстоянии $f = 302$ мм радиус сечения пучка $R \approx 67$ мм. Тогда по формуле (1.1) находим, что длина «зоны неопределенности» $D_{з.н.} \approx 7,755$ м. С учетом того, что суда при движении по зрительным СНО не приближаются к ним ближе чем на несколько сотен метров, данная величина «зоны неопределенности» не может оказать сколько-нибудь существенного влияния на качество навигационной информации.

1.3. Расчет энергетических характеристик излучения маяка

Для определения энергетических характеристик излучения в зонах ориентирования примем следующие допущения: оптическая система не имеет aberrаций и потерями в ней можно пренебречь. В этом случае поток излучения P_{e0} после генерации на мишени равен потоку излучения на выходе оптической системы маяка. Однако после преобразования в оптической системе пучок изменяет свои пространственные характеристики, следовательно, изменяется спектральная плотность излучения. Кроме того, необходимо учитывать, что в процессе сканирования формируемый световой пучок при зрительном восприятии оказывает периодическое воздействие на глаз за время, меньшее времени инерции зрения.

Оценку периодического воздействия выразим через коэффициент мерцания K_M , который определяется длительностью *мгновенного* регистрируемого импульса оптического излучения $t_{имп.}$ в момент активности зоны генерации и частотой сканирования ν :

$$K_M = \nu t_{имп.}. \quad (1.3)$$

Длительность импульса $t_{имп.}$ зависит от диаметра зоны генерации $d_{л.}$, вертикального и горизонтального размеров мишени H и D (см. рис. 2), времени пробега луча по строке $t_{стр.}$ и связана с ними соотношением

$$t_{имп.} = \frac{d_{л.}}{D} t_{стр.}. \quad (1.4)$$

Для данного размера мишени длительность импульса $t_{имп.} = 1,374 \cdot 10^{-8}$ с.

По формуле (1.3) коэффициент мерцания оптического сигнала с учетом слитности восприятия мгновенных импульсов в течение одного кадра составляет $K_M = 1,03 \cdot 10^{-6}$.

С учетом коэффициента мерцания сила излучения I_e на выходе маяка в направлении визирования определяется следующим выражением:

$$I_e = \frac{P_e}{\Omega} K_M, \quad (1.5)$$

где P_e – *мгновенная* мощность (поток) излучения пучка, Вт; $\Omega = \pi \sin^2(\alpha/2)$ – телесный угол, определяемый плоским углом α . Углу $\alpha = 5,73 \cdot 10^{-3}$ град соответствует телесный угол $\Omega = 7,85 \cdot 10^{-9}$ ср.

По формуле (1.5) осевая сила излучения на выходе лазерного маяка составляет 131,2 Вт/ср для каждой длины волны.

2. Критерии решения зрительной задачи

2.1. Система зрительных функций

Зрение человека характеризуется тремя основными функциями [12–15]: пороговой яркостью L , пороговым контрастом k и предельным углом разрешения δ . Эти величины взаимосвязаны, и рассматривать каждую из них в отдельности не имеет смысла. Функцию, связывающую эти величины, условно можно записать в виде

$$f(L, k, \delta) = 0. \quad (2.1)$$

Геометрически функция (2.1) может быть представлена в виде поверхности в осях L, k, δ . Если точка лежит ниже поверхности, объект мы не видим, а если выше – видим. Если объект наблюдения проблесковый, то время тоже должно учитываться при определении пороговых условий, которые уже становятся поверхностью в четырехмерном пространстве. Кроме того, вводится еще и надежность обнаружения, задаваемая коэффициентом запаса. И тогда пороговые условия становятся пятимерным пространством. Для конкретной задачи пороговые условия

Относительная спектральная чувствительность зрения $V(\lambda)$, усредненные значения спектрального блеска для пороговых $E_{\text{п}}$ и комфортных $E_{\text{комф}}$ условий наблюдения в зависимости от яркости фона $B_{\text{ф}}$

Фон	$B_{\text{ф}}, \text{кд/м}^2$	$V(\lambda)$			$E_{\text{п}} \cdot 10^{-9}, \text{Вт/м}^2$			$E_{\text{комф}} \cdot 10^{-9}, \text{Вт/м}^2$		
		$\lambda = 0,52$	$\lambda = 0,57$	$\lambda = 0,63$	$\lambda = 0,52$	$\lambda = 0,57$	$\lambda = 0,63$	$\lambda = 0,52$	$\lambda = 0,57$	$\lambda = 0,63$
Ночь	$10^{-5} \div 10^{-2}$	0,9350	0,2076	0,0033	0,94	3,40	89,10	6,6	23,8	623,7
Сумерки	$10^{-1} \div 10$	0,6200	0,9500	0,2700	2,36	2,00	43,38	16,5	14,00	303,6
День	$10^2 \div 10^4$	0,7100	0,9520	0,2650	30,93	16,90	60,70	216,5	118,5	425,5

можно выразить функцией, аналогичной (2.1), с тем или иным числом взаимосвязанных переменных.

Видимость лазерного маяка существенным образом зависит от пороговых характеристик зрения, условий наблюдения, временных и энергетических характеристик маяка. При наблюдении точечных источников света, в частности – лазерного маяка, с угловыми размерами менее 10 угл. мин изображение источника на сетчатке глаза настолько мало, что соответствует угловому размеру отдельного светочувствительного элемента сетчатки глаза, равного 30 угл. с. Поэтому изображение кажется светящейся точкой. В этом случае влияние площади изображения перестает сказываться на силе зрительного ощущения, которое зависит только от светового потока, упавшего на один элемент сетчатки. Сила зрительного ощущения пропорциональна освещенности зрачка глаза наблюдателя, которая для краткости называется блеском. Поскольку лазерный маяк является точечным источником света, то для него пороговые условия (2.1) упрощаются и определяются только тремя величинами: блеском или освещенностью (облученностью) E на зрачке, длительностью блеска $\Delta t_{\text{пр}}$, с, и яркостью фона $B_{\text{ф}}$, на котором он наблюдается.

Важной характеристикой зрения является функция относительной спектральной световой эффективности излучения $V(\lambda)$ для стандартного фотометрического наблюдателя, утвержденная Международной комиссией по освещению (МКО) и принятой национальным Государственным стандартом [16]. Функция $V(\lambda)$ соответствует дневным условиям при значениях фона наблюдения $B_{\text{ф}}$, равного ($10^2 \div 10^4$) кд/м² [12]. Для ночных условий при $B_{\text{ф}} = (10^{-2} \div 10^{-5})$ кд/м² используется функция $V'(\lambda)$.

Область сумеречного зрения занимает промежуточное положение при значениях яркости фона $B_{\text{ф}} = (10^{-1} \div 10)$ кд/м². Считается, что верхняя граница функции относительной спектральной световой эффективности для сумеречного зрения переходит на верхней границе диапазона в функцию $V(\lambda)$, а на нижней границе диапазона – в функцию $V'(\lambda)$. Проведенный в работе [17] эксперимент показал, что рекомендуемая МКО функция $V(\lambda)$ дает заниженные значения в диапазоне коротких волн длин видимого спектра. Там же предложена новая функция для длин волн $\lambda = 0,38 \div 0,56$ мкм, определяемая соотношением

$$V_{\text{рег}}(\lambda) = V_{10}(\lambda) + p(V_{10}(\lambda) - V(\lambda)), \quad (2.2a)$$

где $V_{10}(\lambda)$ – функция относительной спектральной световой эффективности излучения для фотометри-

ческого наблюдателя с углом поля зрения, равным 10° [12]; p – весовой коэффициент, равный 0,8125.

Для длин волн $\lambda = 0,557 \div 0,8$ мкм

$$V_{\text{рег}}(\lambda) = V_{10}(\lambda). \quad (2.26)$$

Поэтому для лазерного маяка, генерирующего излучение на длинах волн 0,52; 0,57 и 0,63 мкм, значения функций $V(\lambda)$ и $V'(\lambda)$ взяты из [12], а для сумеречных условий определены на основании выражений (2.2a) и (2.26). Результаты представлены в сводной таблице.

2.2. Пороговые характеристики зрения

Критерием обнаружения излучения лазерного маяка является величина эффективного порогового блеска, определяемого соотношением

$$E_{\text{эф}}(\lambda) = k'E_{\text{п}}(\lambda), \quad (2.3)$$

где $E_{\text{п}}(\lambda)$ – пороговый блеск при наблюдении непрерывного источника, Вт/м²; k' – коэффициент, учитывающий проблесковый характер сигнального огня, и определяется выражением

$$k' = \Delta t_{\text{пр}} / (\Delta t_{\text{пр}} + \theta), \quad (2.4)$$

θ – постоянная времени инерции зрения, с.

Время инерции зрения θ зависит от яркости фона наблюдения $B_{\text{ф}}$ и определяется соотношением [13]:

$$\theta = 0,13 - 0,08 \text{th}(\ln B_{\text{ф}} + 1). \quad (2.5)$$

Для ночных условий наблюдения использовались нормативные данные [4, 5], принятые при проектировании зрительных СНО. Эти данные учитывают реальные условия наблюдения: ограниченность времени при обнаружении и распознавании световых сигналов, неизвестность места расположения и времени появления сигнального огня и т.п., которые определяются величиной коэффициента запаса или надежности. Согласно [14, 18] величина коэффициента запаса может достигать 50.

При дневных и сумеречных условиях наблюдения для определения значения $E_{\text{п}}$ использовалось эмпирическое выражение [14]:

$$E_{\text{п}} = E'(B_{\text{ф}}/B'_{\text{ф}})^{0,073 \ln(B_{\text{ф}}/B'_{\text{ф}})}, \quad (2.6)$$

где $B_{\text{ф}} = 5 \cdot 10^{-2} \div 2,5 \cdot 10^4$ кд/м²; $B'_{\text{ф}} = 10^{-2}$ кд/м²; $E' = 0,45 \cdot 10^{-6}$ лк – для красного огня ($\lambda = 0,63$ мкм); 10^{-6} лк – для желтого огня ($\lambda = 0,57$ мкм); $0,56 \cdot 10^{-6}$ лк – для зеленого огня ($\lambda = 0,52$ мкм).

Характеристика E_{Π} , используемая в [4, 5] и в выражении (2.6), является световой величиной. Для перехода к энергетической величине E_e (облученность) используем известное фотометрическое выражение [13] для монохроматического источника с длиной волны λ :

$$E_{\lambda} = 683 \int_{0,38}^{0,78} E_e V(\lambda) d\lambda. \quad (2.7)$$

С учетом (2.7) ведомственные значения блеска E_{Π} для ночных условий и усредненные значения блеска, рассчитанные по формуле (2.6), приведены в таблице, где также представлены значения освещенности на зрачке для условий комфортного наблюдения $E_{\text{комф}}$, когда световой сигнал маяка уверенно обнаруживается при нахождении его в любой точке поля зрения и при этом не создаются помехи при работе с другим навигационным оборудованием. Согласно данным [14, 18], значение величины $E_{\text{комф}}$ превышает значение блеска E_{Π} в 6–8 раз.

1. Зуев В.Е., Пересыткин В.И., Калошин Г.А., Фадеев В.Я., Константинов Р.С. Лазерные устройства для обеспечения судовождения. Новосибирск: Наука, 1985. 128 с.
2. Kaloshin G.A., Gordienko A.I. Laser Aids to Navigation (methods) // Magazine of the International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities // IALA Bull. 2003. V. 3. P. 46–51.
3. Kaloshin G.A., Gordienko A.I. Laser Aids to Navigation (technologies) // Magazine of the International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities // IALA Bull. 2004. V. 1. P. 30–39.
4. Инструкция по навигационному оборудованию (ИНО-2000). СПб.: ГУНИО МО РФ, 2001. 328 с.
5. The IALA Naviguide. 4th edition. 2002. 220 с.
6. Калошин Г.А., Носов В.В. Флуктуации интенсивности регистрируемого сигнала лазерных зрительных навигационных устройств // Оптика атмосф. и океана. 2002. Т. 15. № 12. С. 1098–1103.

7. Калошин Г.А., Михеев Ю.С. Энергетическая структура излучения в зонах ориентирования ЛНУ // Оптика ж. 1992. № 10. С. 3–6.
8. Калошин Г.А., Мальцев А.Н. Новые источники света для зрительных СНО // Навигация и гидрограф. 2001. № 13. С. 100–109.
9. Kaloshin G.A., Shishkin S.A., Gauss S.K. The performance assessment of navigational complex basis of the scanning semiconductor laser with electronic pumping on range // Proc. XII Joint Int. Symp. «Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics». Tomsk, 27–30 June, 2005. P. 91.
10. Олихов И., Косовский Л. Мобильная лазерная трехцветная навигационная система // Электроника. 1999. № 3. С. 46–49.
11. Васильев Д.В. Зрительные средства навигационного оборудования на основе сканирующего полупроводникового лазера с электронной накачкой (СПЛЭН) // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2004. № 12. С. 19–26.
12. Мешков В.В., Матвеев А.Б. Основы светотехники. Часть 2. Физиологическая оптика и колориметрия. М.: Энергоатомиздат, 1989. 432 с.
13. Луизов А.В. Глаз и свет. Л.: Машиностроение, 1978. 184 с.
14. Забелина И.А. Расчет видимости звезд и далеких огней. Л.: Энергоатомиздат, 1983. 144 с.
15. Басов Ю.Г. Светосигнальные устройства. М.: Транспорт, 1993. 309 с.
16. Функция относительной спектральной световой эффективности монохроматического излучения для дневного зрения. ГОСТ 8.332-78. М.: Изд-во стандартов, 1984. 25 с.
17. Вишари М., Елохолма М., Кетомаки Я. Функция относительной спектральной световой эффективности $V(\lambda)$ для периферического зрения // Светотехника. 2005. № 4. С. 7–15.
18. Калошин Г.А., Шишкин С.А. Методические вопросы расчета дальности видимости новых светооптических систем зрительных СНО // Навигация и гидрограф. 2004. № 18. С. 34–43.

G.A. Kaloshin, S.A. Shishkin. Calculation of the light signals visual range for a navigation complex based on the scanning electronically pumped semi-conductor laser. Part I. The source power parameters and threshold vision characteristics.

Energy and time characteristics of the navigating complex, based on the scanning electronically pumped semi-conductor laser, are calculated. The laser performs an electron-beam continuous scanning of a semi-conductor crystal in the television decomposition mode. The output radiation intensity of the laser beacon is $131.2 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$ at each following wavelength: 0.52, 0.57, and 0.63 μm .

The time and spatial characteristics of the orientation zone and the uncertainty zone are determined. The found magnitude of the uncertainty zone is shown to affect insignificantly the navigation information quality.

The decision criteria of a visual problem are considered. Vision spectral threshold and comfortable characteristics in dependence of environment conditions are calculated.