

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ВИЗУАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ

А.Ларюшин,
Д.Васильев, Е.Рудь

Выбор конструктивных параметров оптической системы – один из основных этапов создания зрительного навигационного комплекса, существенно влияющий на эффективность его работы. В статье предложен метод, позволяющий экономить время разработчика при выборе параметров качества оптической системы и проводить оптимизацию конструкции навигационного комплекса по критерию "цена-качество".

ВВЕДЕНИЕ

Развитие визуальных средств навигационного оборудования связано с улучшением существующих и появлением новых источников света. Задачи, решаемые системами визуальной навигации применительно к судоходству, усложняются (ввиду возросшей его интенсивности), особенно в прибрежной зоне и акваториях портов. Многообразие ситуаций, в которых нужно точно ориентироваться, требует оборудовать водные магистрали нужным количеством визуальных навигационных комплексов, имеющих определенные светотехнические характеристики [1]. Обеспечить их высокий технический уровень можно, если использовать перспективные полупроводниковые (п/п) источники света, например сверхъяркие светодиоды и лазеры различных типов.

Эффективность средств визуальной навигации определяется той точностью, которая обеспечивается при ориентации в пространстве на основе полученной информации о параметрах световых полей (геометрических размерах, цвете, временных характеристиках, взаимном расположении). Потребность в средствах визуальной навигации велика. Оптические системы этих средств определяют качество создаваемых световых полей и требуют оптимизации, чтобы обеспечить нужный объем получаемой от них информации.

МЕТОД РАСЧЕТА

Сечение светового поля излучателя навигационного комплекса плоскостью, перпендикулярной оптической оси, дает следующее распределение освещенности [2]:

$$E_i(x_i, y_i, d_i) = \frac{1}{d_i^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g'(v_x', v_y') \exp\left(-i2\pi\left(v_x' x_i \frac{1}{d_i} + v_y' y_i \frac{1}{d_i}\right)\right) dv_x' dv_y',$$

где d_i – длина трассы (расстояние от оптической системы до плоскости сечения), м; $g'(v_x', v_y')$ – пространственный спектр сечения светового поля, определяемый выражением

$$g'(v_x, v_y) = g(v_x, v_y) D_1(v_x, v_y) D_2(v_x, v_y) \dots D_i(v_x, v_y),$$

где $g(v_x, v_y)$ – пространственный спектр источника света; $D_i(v_x, v_y)$ – оптическая передаточная функция (ОПФ) звена тракта распространения излучения от источника до глаза наблюдателя (это может быть ОПФ оптической системы, рассеивающей или турбулентной атмосферы). Формирование светового поля визуальным навигационным комплексом показано на рис. 1.

Освещенность и ее пространственное распределение (без учета атмосферы) определяются качеством оптической систе-

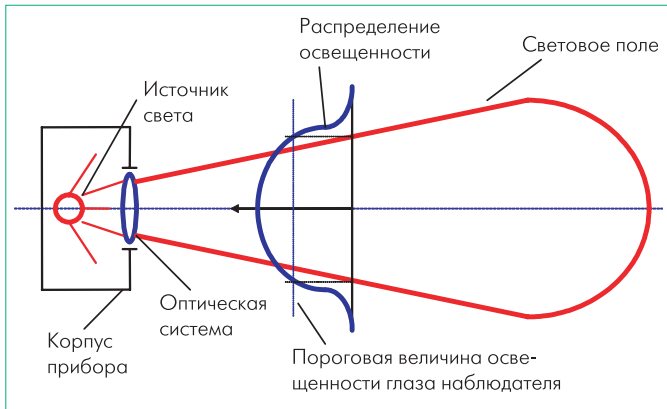


Рис.1 Схема работы визуального навигационного комплекса

мы и характеризуются коэффициентом пропорциональности K_{oc} , который определяет зависимость волновой aberrации от параметров конструкции (m^{-3}) [2]: $W(u,v) = (u^2 + v^2)^2 K_{oc}$, где u и v – координаты в плоскости выходного зрачка оптической системы (m). Если $K_{oc} = 0$, то имеем "идеальную" оптическую систему (или систему дифракционного качества). Если этот коэффициент растет – качество системы ухудшается. Для бесконечно тонкой линзы коэффициент K_{oc} определяется выражением [2]

$$K_{oc} = \frac{(n-1)(\rho_1 - \rho_2)}{8n} \left[n^3 (\rho_1 - \rho_2)^2 - n(2n+1)\rho_1(\rho_1 - \rho_2) + (n+2)\rho_1^2 \right],$$

где $\rho_1 = 1/R_1$ – величина, обратная радиусу первой поверхности линзы; $\rho_2 = 1/R_2$ – величина, обратная радиусу второй поверхности линзы (m^{-1}); n – показатель преломления материала линзы.

Одним из основных параметров, задаваемых при разработке навигационного комплекса, является дальность видимости при определенных погодных условиях в определенное время суток. Поставленную задачу можно решить просто, используя более мощный, чем требуется, источник света и оптическую систему высокого качества. Однако такой подход не оптимален. Он ведет к увеличению потребления энергии и размеров конструкции. Следствие этого – рост цены изделия.

Поэтому актуальна постановка задачи оптимизации, которая позволит выбрать оптику требуемого качества и снизить мощность источника света настолько, чтобы не только решать поставленные навигационные задачи, но и снизить себестоимость изделия, что важно при серийном производстве. Поиск оптимальных параметров оптической системы можно вести двумя путями:

1 – методом подбора, при котором строится ряд диаграмм световых полей для систем разного качества. Этот путь, хотя и дает необходимые результаты, достаточно трудоемок;

2 – методом, при котором расчеты световых полей проводятся только для двух конкретных типов оптических систем,

а затем используется функция, описывающая изменение дальности видимости светового сигнала в зависимости от качества оптической системы.

В последнем случае расчет световых полей ведется для идеальной оптической системы (дифракционного качества) и для простейшей системы (с одиночной линзой, форма которой близка к оптимальной, то есть имеет минимальную сферическую aberrацию).

Зависимость дальности видимости световых сигналов от качества оптической системы определяется с помощью коэффициента Штрейля D_s , характеризующего снижение качества реальной оптической системы по отношению к идеальной [3]:

$$D_s = \left\{ \frac{\sin\left(\pi(u^2 + v^2)^2 K_{oc}/\lambda\right)}{\pi(u^2 + v^2)^2 K_{oc}/\lambda} \right\}^2,$$

где λ – длина волны излучения (m).

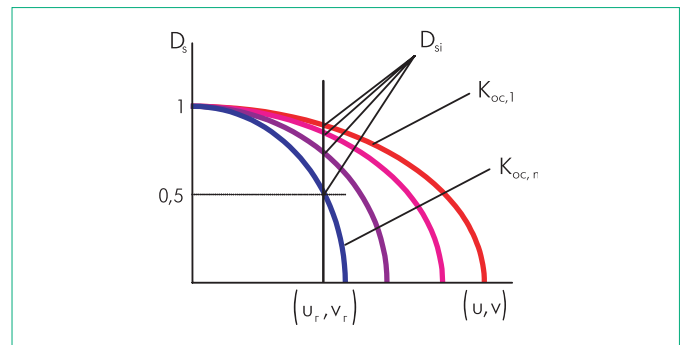


Рис.2 Зависимость коэффициента Штрейля от координат в плоскости выходного зрачка

Используя D_s , строится серия зависимостей $D_{s,i} = f_1(u, v)$ для ряда значений $K_{oc,i}$ в диапазоне от 0 до $K_{oc,n}$ (коэффициента для одиночной линзы оптимальной формы) (рис.2), где $K_{oc,n} > 0$. Определяются значения (u_r, v_r) , при которых коэффициент Штрейля снижается до уровня 0,5 для $K_{oc,n}$, соответствующего одиночной линзе оптимальной формы. Для полученных значений (u_r, v_r) по графику определяются значения $D_{s,i}$ (пересечение вертикальной линии с кривыми графика).

На основе полученных данных строится график зависимости $D_{s,i} = f_2(K_{oc,i})$ (рис.3). Для значений $K_{oc,1} = 0$ и $K_{oc,n}$ по приведенным выше формулам рассчитывается диаграмма направленности светового поля (дальность видимости L_1 и L_n). На оси

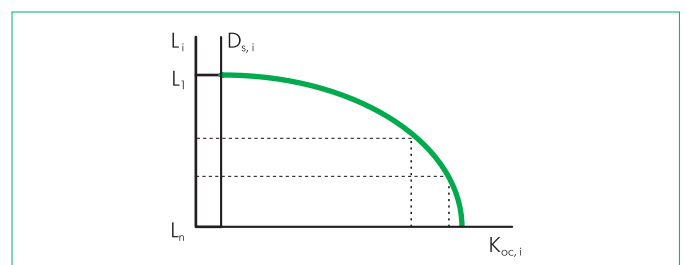


Рис.3 График зависимости дальности видимости светового сигнала от качества оптической системы

ординат графика откладываются полученные значения, причем $D_{s,1}$ ставится в соответствие L_1 , а $D_{s,n}$ – в соответствие L_n . Расстояние по оси ординат между значениями L_1 и L_n размечают в линейном масштабе.

Итак, получается искомый график зависимости $L_i = f_3(K_{oc,i})$, который позволяет определить качество оптической системы, нужное для достижения требуемой дальности видимости светового сигнала навигационного комплекса при выбранных условиях наблюдения и характеристиках источника света.

ВЫБОР ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Рассмотрим, например, навигационный комплекс на основе п/п лазера с накачкой сканирующим электронным пучком (режим сканирования имеет формат: $1024 \times 768 \times 75$ Гц) [4].

Расчет диаграммы направленности светового поля основан на представленных выражениях последовательно для трех длин волн: 520, 570 и 630 нм (средняя мощность лазерного пучка составила для каждой волны не менее 1 Вт). Исследование проводилось для оптической системы с объективом без aberrаций для одиночной положительной линзы оптимальной формы с фокусным расстоянием 300 мм и диаметром апертуры 160 мм. В результате (рис.4) наблюдалось изменение метеорологической дальности видимости в диапазоне от 0,5 до 50 км. На рис.4 приведены графики изменения дальности видимости монохроматического светового поля для оптической системы без aberrации ($K_{oc} = 0$) и одиночной линзы оптимальной формы из стекла K_8 ($K_{oc} = 8,6 \text{ м}^{-3}$) для трех длин волн (нм): 520 (зеленый), 570 (желтый) и 630 (красный) [2].

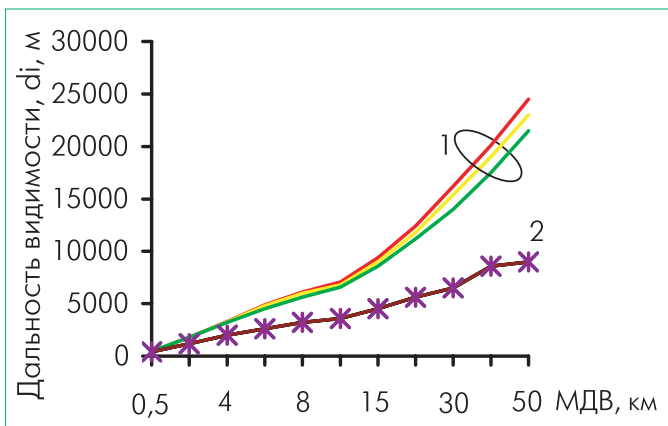


Рис.4 Дальность видимости светового поля в зависимости от МДВ: 1 – идеальная оптическая система ($K_{oc} = 0$); 2 – одиночная линза ($K_{oc} = 8,6 \text{ м}^{-3}$)

Полученные результаты выявили сильную зависимость дальности видимости светового поля от качества оптической системы. Переход от идеальной системы к одиночной линзе оптимальной формы снижает дальность видимости более чем в 2,5 раза при метеорологической дальности видимости (МДВ), равной 50 км. По мере уменьшения МДВ разница в предельных дальностях наблюдения светового сигнала с различными типами оптических систем уменьшается и исчезает при

дальности 0,5 км. Для одиночной линзы дальность видимости практически не зависит от длины волны. При использовании идеальной оптической системы – существуют небольшие различия в предельной дальности, уменьшающиеся по мере уменьшения МДВ. Причем дальность несколько уменьшается при переходе от красного цвета к зеленому.

Рассмотрим другой пример – навигационный комплекс на основе сверхъярких светодиодов, формирующий три монохроматических поля (красного (к), желтого (ж) и зеленого (з) цвета) с осевой силой света в каждом из них порядка 400 кд [5]. Расчеты параметров световых полей выполнены для длин волн 505 (з), 590 (ж) и 625 (к) нм при метеорологической дальности видимости: 50, 20, 5 и 0,8 км [6] применительно к идеальной оптической системе ($K_{oc} = 0$) и одиночной плоско-выпуклой линзе ($K_{oc} = 4183,286 \text{ м}^{-3}$) с фокусным расстоянием 40 мм, диаметром апертуры 25 мм и линзой из стекла К8. Принятые при расчетах уровни пороговой освещенности соответствуют двум случаям: обнаружению светового поля с вероятностью $p = 0,5$ и уверенному его распознаванию ($p \approx 1$).

Уровни пороговой освещенности взяты с учетом рекомендуемых значений отраслевых норм и значений экспериментальных характеристик Хилла [7]. Уровни пороговой освещенности глаза приведены в таблице.

Пороговые уровни монохроматической освещенности зрачка глаза наблюдателя

Цвет огня зрительного средства навигационного оборудования	Уровень пороговой освещенности, соответствующий уверенному распознаванию (нормы отрасли), $E_{y,p}$, лк	Уровень пороговой освещенности, соответствующий обнаружению огня, E_0 , лк
Красный ($\lambda = 625$ нм)	$5 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7}$
Желтый ($\lambda = 590$ нм)	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$2,2 \cdot 10^{-7}$
Зеленый ($\lambda = 505$ нм)	$8 \cdot 10^{-7}$	$1,6 \cdot 10^{-7}$

Результаты, приведенные в таблице, получены при наблюдении в ночных условиях (рис.5). На рис.5 по оси абсцисс отложена МДВ, по оси ординат – дальность видимости светового поля навигационного комплекса. Результаты расчетов показали, что

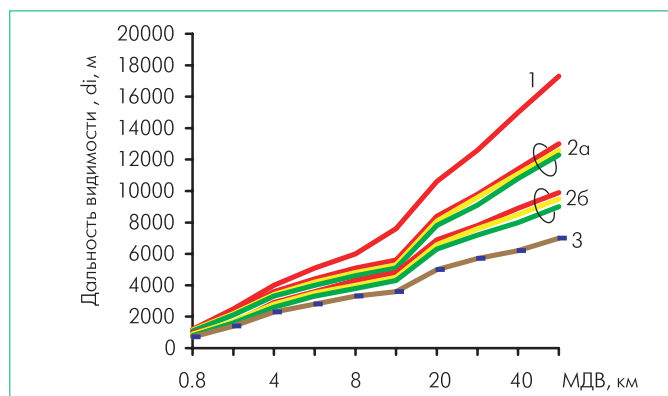


Рис.5 Дальность видимости светового поля в зависимости от МДВ: 1 – одиночная линза ($K_{oc} = 4183,286 \text{ м}^{-3}$), вероятность обнаружения 0,5; 2 – идеальная оптическая система ($K_{oc} = 0$) с вероятностью обнаружения 0,5 (2а) и ≈ 1 (2б); 3 – одиночная линза, вероятность обнаружения ≈ 1 (Замечание: шкалы на рис.4 и 5 даны в логарифмическом масштабе)

превышение дальности видимости монохроматического светового поля для оптической системы без аберрации ($K_{oc} = 0$) над дальностью видимости для одиночной плоско-выпуклой линзы ($K_{oc} = 4183,286 \text{ м}^{-3}$) имеет максимум для МДВ 50 км и равно 1,31. При МДВ = 0,8 км это превышение исчезает (сравнение проводилось при вероятности обнаружения ≈ 1).

Волновая аберрация оптической системы влияет на диаграмму светового поля. Для идеальной оптической системы она более плоская, а для одиночной линзы с аберрацией – более вытянутая. Максимальная дальность видимости достигается на длине волны 625 нм. Если в качестве оптической системы применена одиночная линза, то дальность обнаружения с вероятностью 0,5 превышает дальность устойчивого наблюдения (вероятность ≈ 1). Превышение максимально для МДВ = 50 км и равно 1,75. По мере уменьшения МДВ расстояния обнаружения и устойчивого наблюдения сближаются и при МДВ = 0,8 км становятся практически равными.

Следовательно, можно сделать вывод, что для навигационного комплекса с одиночной линзой обнаружение светового сигнала для любой из длин волн (505, 590 и 625 нм) превышает 5 миль. При приближении к навигационному комплексу начинается переход к устойчивому восприятию, которое (при МДВ = 50 км) для $\lambda = 625 \text{ нм}$ происходит на расстоянии 9900 м, а для $\lambda = 590$ и 505 нм – на расстоянии 7000 м. Устой-

чивое наблюдение соответствует превышению в 5–7 раз порогового хроматического уровня освещенности зрачка глаза [7].

Полученные результаты демонстрируют влияние параметров оптических систем на характеристики формируемых световых полей в зависимости от применяемых источников света и условий работы комплексов. В каждом конкретном случае очевидна необходимость поиска оптимального решения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зуев В.Е., Фадеев В.Я. Лазерные навигационные устройства. – М.: Радио и связь, 1987.
2. Васильев Д.В. Зрительные средства навигационного оборудования на основе сканирующего полупроводникового лазера с электронной накачкой. – Приборы и Системы. Управление, контроль, диагностика, 2004, № 11.
3. Шульман М.Я. Автоматическая фокусировка оптических систем. – Л.: Машиностроение, 1990.
4. Васильев Д.В., Ларюшин А.И. Мобильный навигационный комплекс. – Материалы конференции "Радиоэлектроника, электротехника и энергетика". – М., 2002.
5. Васильев Д.В., Кормаков А.А., Чумаков А.В. Навигационный комплекс на основе полупроводниковых сверхъярких светодиодов. – Материалы конференции "Лазеры в науке, технике, медицине". – Адлер, 2003.
6. Васильев Д.В. Зрительные средства навигационного оборудования на основе сверхъярких светодиодов. – Приборы и Системы. Управление, контроль, диагностика, – 2005, № 1.
7. Батусов С.В. Светосигнальные установки. – М.: Энергия, 1979.