

DOI: 10.20535/kpissn.2021.1.231213

УДК 621:681.7

В.С. Стаднічук*, В.Г. Колобродов, О.О. Мосолаб, Д.Ю. Кондратенко, Д.І. Рябоконт

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

*corresponding author: SVS97@i.ua

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОЄКТУВАННЯ ОБ'ЄКТИВА КАМЕРИ ВИСОКОЇ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ ДЛЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ АВТОМОБІЛЕМ

Проблематика. Аналіз статистичних даних показав, що переважно причиною автомобільних аварій є помилки водіїв. Через це протягом останніх 10-ти років активно виконують розробки в галузі розпізнавання дорожніх знаків і перешкод на шляху руху автомобіля. Автовиробники пропонують готові системи, вмонтовані за внутрішнім дзеркалом заднього виду та підключені до бортового комп'ютера автомобіля, що контролює його в критичній ситуації. Основними недоліками систем цього класу є невисока дальність розпізнавання дорожніх знаків, залежність оптичних параметрів від температури та низька світлочутливість.

Мета дослідження. Змодельовати атермальний об'єктив для камери високої роздільної здатності, дослідити характеристики лінз залежно від температури довкілля.

Методика реалізації. Аналіз і моделювання об'єктивів, лінз, оптичного скла з різних матеріалів.

Результати дослідження. Запропоновано об'єктив камери високої роздільної здатності для всіх типів автомобілів. Розроблено атермальний об'єктив для камери високої роздільної здатності.

Висновки. Розглянуто оптимізовану атермічну конструкцію об'єктива видимого спектра для автомобільних камер дальнього радіуса дії. Автомобільні камери зазвичай мають фіксований фокус, а камери, спрямовані вперед, зазвичай потребують відносно великих фокусних відстаней для надання інформації про віддалені об'єкти. Оптична система для цих камер має забезпечувати високу роздільну здатність, а також працювати в широкому діапазоні температур довкілля. Параметри конструкції камери отримані з функціональних вимог розпізнавання дорожніх знаків на відстані 200 м. Конструкція об'єктива має п'ять лінз зі сферичними поверхнями. Об'єктив має відносний отвір $f/2$ і МПФ понад 0,5 за 111 л/мм у всьому температурному діапазоні.

Ключові слова: поле зору; система керування автомобілем; проєктування оптико-електронних систем; моделювання об'єктивів; моделювання лінз; відеокамера високої роздільної здатності; комп'ютерний зір.

Вступ

Щорічно у світі в ДТП гине понад 1,3 млн осіб, а 20–50 млн отримують серйозні травми [1]. Для зменшення кількості аварій автовиробники активно розробляють системи допомоги водієві (Advanced Driver Assistance System (ADAS)), що дають змогу водіям ухвалювати правильні рішення та коректувати траєкторію руху транспортного засобу для запобігання ДТП [2].

Щоб уникнути зіткнення транспортних засобів, необхідно дотримуватися безпечної відстані до різних об'єктів. Зараз для оцінювання відстані використовують вимірювальні технології, як-от ультразвукове визначення відстані, радар міліметрового діапазону, LIDAR (Light Identification, Detection and Ranging), комп'ютерний зір й інфрачервоні прилади визначення відстані [3]. Для підвищення ефективності поєднують різні технології (наприклад, LIDAR і камеру).

Одним із найпростіших, надійних і недорогих джерел інформації є камера, що працює

у видимому діапазоні. Крім визначення відстаней, камера може виконувати спектр завдань, як-от визначення перешкод і їхнього розміру, встановлення виїзду за межі смуги руху, розпізнавання дорожніх знаків і світлофорів. Отже, камера є ключовим компонентом ADAS, а також систем автономного водіння.

Постановка задачі

Розглянути метод проєктування оптико-електронної системи камери для систем керування автомобілем. Зазначений метод враховує вимоги до цих камер: здатність розпізнавати дорожні знаки з відстані 200 м і незалежність характеристик від температури.

Параметри камери

З розвитком систем допомоги водієві на основі камер і систем автономного водіння багато компаній, що виробляють приймачі випромінювання (ПВ), почали створювати матриці високої роздільної здатності для автомо-

більних камер. Як зазначено в табл. 1, нещодавно представлені ПВ, призначені для таких камер, мають роздільну здатність майже 8 Мп і розміри пікселів 2,1 мкм або 2,25 мкм. OnSemi AR0820AT має співвідношення сторін 16:9, тимчасом як у Sony IMX324 і Samsung S5K2G1 співвідношення сторін становить 2:1 [4–6]. Оскільки ці ПВ мають однакові розміри та роздільну здатність, конструкція з одним об'єктивом може бути сумісна з усіма трьома ПВ.

Важливим результатом використання камер високої роздільної здатності в автомобілях є можливість розпізнавання та супроводження об'єктів. За допомогою комп'ютерного зору можна реалізувати такі системи: попередження про вихід зі смуги руху (LDW), попередження про пряме зіткнення (FCW), допомоги під час руху по шосе (HDA), автоматичного екстреного гальмування (AEB), розпізнавання знаків дорожнього руху (TSR) і розпізнавання світлофорів (TLR). Одним із традиційних прикладів TSR є автоматичне розпізнавання знака зупинки.

Розрахунок кардинальних параметрів об'єктива

Точне розпізнавання дорожніх знаків залежить від алгоритму розпізнавання, а також цифрової роздільної здатності їх зображень. Для камери високої роздільної здатності алгоритм TSR, який може розпізнавати дорожні знаки невеликими ділянками зображення, призведе до розпізнавання знаків на великій відстані (орієнтовно 200 м). У [7] для розпізнавання знака обмеження швидкості використовували підхід зіставлення з шаблоном із роздільною здатністю до 32×32 пікселів. У [8] використовували згортковий мережевий підхід для розпізнавання дорожніх знаків із точністю 99,17 % на зображен-

нях із роздільною здатністю 32×32 пікселів.

Якщо зображення дорожнього знака має займати 32×32 пікселі в площині зображення, фізичний розмір цього зображення має становити 72×72 мкм для приймача Sony IMX324 або 67×67 мкм для двох інших вищезазначених автомобільних ПВ. Щоб бути сумісними з усіма трьома приймачами, як параметри еталонного зразка були обрані розмір пікселя 2,25 мкм і розмір матриці Sony. Якщо передбачається, що відстань до об'єкта становить 200 м, то для дорожнього знака розміром 0,75×0,75 м ефективна фокусна відстань об'єктива має становити 19,2 мм, що розраховується з використанням тригонометричних співвідношень, показаних на рис. 1. Це призводить до діагонального поля зору близько 26,5° із ПВ Samsung S5K2G1 або 28,3° із ПВ Sony IMX324.

За ефективною фокусною відстані 19,2 мм і розміру пікселя 2,25 мкм гіперфокальна відстань для об'єктива $f/2$ становить 82 м, а для об'єктива $f/1,6$ – 102 м. За фокусування на гіперфокальній відстані ці об'єктиви можуть забезпечувати чітке зображення від 41 м до нескінченності (об'єктив $f/2$) або від 51 м до нескінченності (об'єктив $f/1,6$). Тож ці об'єктиви з фіксованим фокусом забезпечують знімок на великій відстані.

Для розрахунку поля зору використовували таку методологію. Поля зору, відповідно, позначають як поле зору по вертикалі ($VFOV$) і поле зору по горизонталі ($HFOV$). Однак у технічних характеристиках приймачів наводять лише значення “діагональне поле зору” ($DFOV$), як показано на рис. 2.

Щоб розрахувати $HFOV$ і $VFOV$, проводять моделювання, яке полягає у вимірюванні поля зору за допомогою мірної дошки (табл. 2).

Таблиця 1. Основні параметри доступних приймачів випромінювання з високою роздільною здатністю

Приймач випромінювання	Роздільна здатність	Розмір пікселя, мкм	Частота Найквіста, л/мм	Розмір масиву пікселів, мм	Діагональний розмір масиву, мм
OnSemi AR0820AT	3848×2168	2,1	238	8,081×4,553	9,28
Sony IMX324	3849×1929	2,25	222	8,660×4,340	9,69
Samsung S5K2G1	3840×920	2,1	238	8,064×4,032	9,02

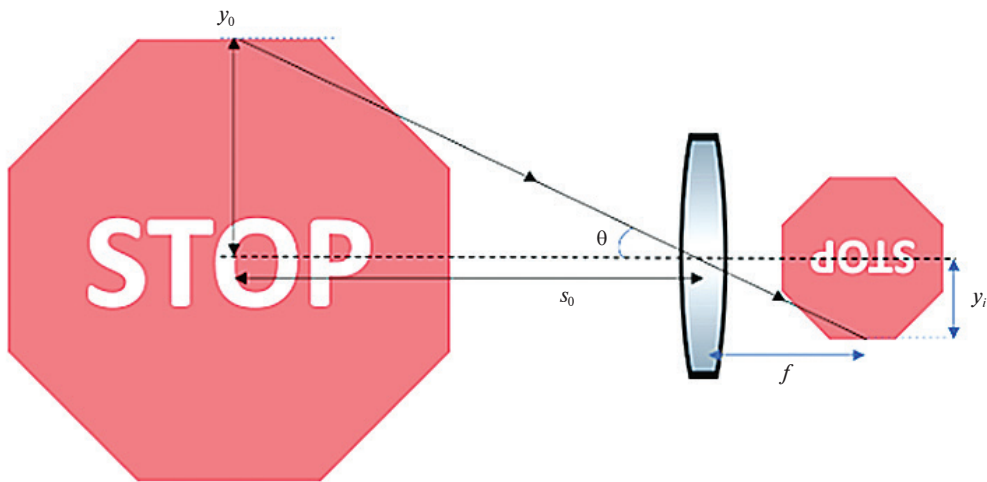


Рис. 1. Спрощена схема для розрахунку параметрів об'єктива:
 y_0 – розмір об'єкту; s_0 – дистанція до об'єкту; y_i – розмір зображення; f – фокусна відстань

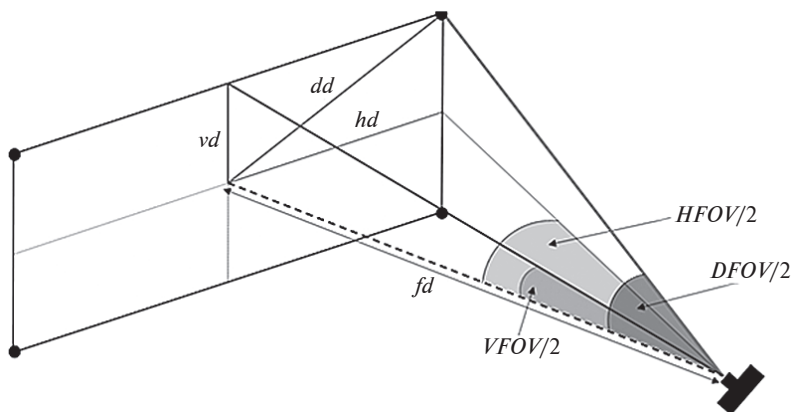


Рис. 2. Поле зору цифрової камери

Таблиця 2. Поля зору оптичної системи

–	Тест 1	Тест 2	Тест 3
$DFOV$	28,3°	28,2°	28,3°
$HFOV$	25,1°	25,0°	25,1°
$VFOV$	21,6°	21,6°	21,5°

Також було виміряно відстань від камери до дошки. Вирази (1)–(3) розраховують значення кутів $DFOV$ (діагональне поле зору), $HFOV$ і $VFOV$ відповідно:

$$\arctg\left(\frac{DFOV}{2}\right) = \frac{dd}{fd}, \quad (1)$$

$$\arctg\left(\frac{HFOV}{2}\right) = \frac{hd}{fd}, \quad (2)$$

$$\arctg\left(\frac{VFOV}{2}\right) = \frac{vd}{fd}, \quad (3)$$

де dd – діагональна відстань; fd – фокусна відстань; vd – вертикальна відстань; hd – горизонтальна відстань.

Розрахунок атермальних матеріалів

Коли температура змінюється, деякі параметри, що визначають оптичні властивості об'єктива, також змінюються. Найбільш значущими є зміна показника заломлення матеріалів лінз, розширення чи стиснення фізичних розмірів елементів об'єктива та зміна відстаней між лінзовими елементами. Ці ефекти зумовлені залежністю показника заломлення від температури (відомої як $\frac{dn}{dT}$) і температурного коефіцієнта лінійного розширення (ТКЛР) матеріалів лінз. Тепловий вплив на лінзи більш помітний в інфрачервоній області, оскільки $\frac{dn}{dT}$ інфрачервоних матеріалів, які працюють у видимому діапазоні, зазвичай на порядки більше, ніж у скла [9].

Щоб задовольнити вимоги до роздільної здатності та атермальних умов експлуатації для автомобільної камери дальнього радіуса дії, за основу було взято п'ятилінзовий об'єктив [6] й оптимізовано його до вимог дослідження з кращим склом Шотта [10]. Камера повинна працювати у видимому спектрі, тому

для об'єктива було обрано довжину хвилі Fraunhofer FdC. Алюміній був прийнятий як матеріал оправы лінзи й має ТКЛР приблизно $24 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Основні параметри конструкції об'єктива наведено в табл. 3 і на рис. 3.

Таблиця 3. Характеристики об'єктива

Параметр	Специфікація
Кількість лінз	5
Розмір зображення	9,7 мм
Поле зору	$\pm 14,2^\circ$ (діагональне)
Робочий діапазон	Видимий спектр
Дисторсія	< 1 %
Оправа об'єктива	Алюміній (ТКЛР = $24 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)
Температурний діапазон	$-40^\circ \dots +100^\circ \text{ C}$

Апертурна діафрагма розташована на задній поверхні першої лінзи. Відстань від першої вершини поверхні до площини зображення становить 30,7 мм, а дисторсія – менш як 1 %.

Оптичні характеристики оцінюють на осі та за полів у 0,5; 0,7; 0,9 площини зображення. Графік модуляційної передавальної функції (МПФ) для об'єктива за номінальної температури (20° C) показано на рис. 4. На осі МПФ становить 0,68 за 111 л/мм (частота Найквіста для датчика Sony IMX324) і 0,44 за 222 л/мм (частота Найквіста для датчика Sony IMX324). За умови кута поля зору (0,9 поля) мінімальна МПФ становить 0,54 за 111 л/мм і 0,29 за 222 л/мм.

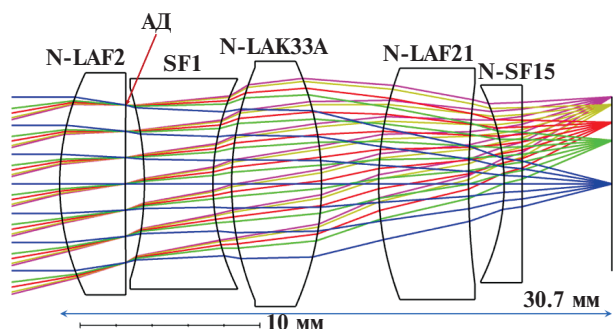


Рис. 3. Схематичне зображення конструкції багатоелементного об'єктива

Щоб продемонструвати атермальні характеристики, мінімальну МПФ за 111 л/мм нанесено в різних місцях поля для діапазону температур $-40^\circ - 100^\circ \text{ C}$, як показано на рис. 5.

Зміна температури слабо впливає на МПФ за умови кутів поля до 70 % поля зору, однак на краю поля зору (90 % поля) МПФ починає погіршуватися за низьких температур. Проте МПФ понад 0,65 до 70 % поля та понад 0,5 до 90 % поля в усьому температурному діапазоні. Це означає, що за допомогою розробленого об'єктива можна сформувати чіткі зображення з високою роздільною здатністю з мінімальним впливом температури.

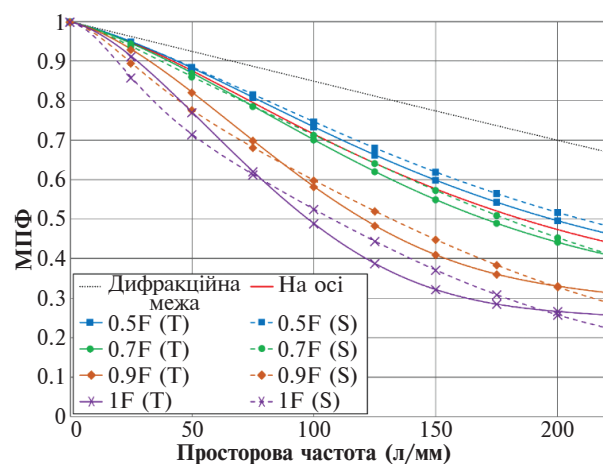


Рис. 4. Графік модуляційної передавальної функції для проектного об'єктива (див. рис. 3) за номінальної температури 20° C : тангенціальні (T) компоненти показано суцільними лініями, сагітальні (S) компоненти – пунктирними

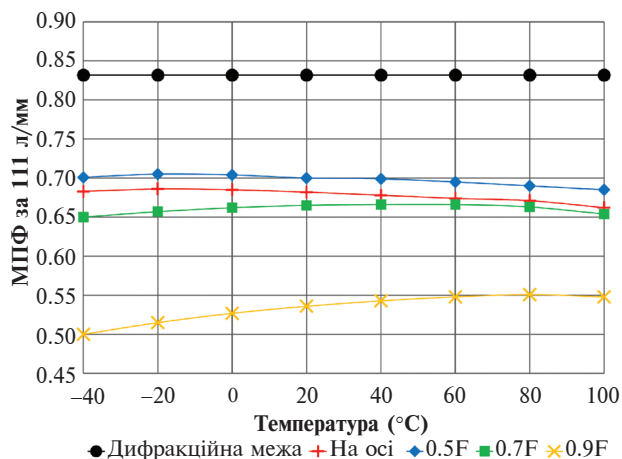


Рис. 5. Мінімум МПФ за 111л/мм для проектного об'єктива (див. рис. 3) за різних температур

Висновки

У статті розглянуто оптимізовану атермічну конструкцію об'єктива видимого спектра для автомобільних камер дальнього радіуса дії.

Автомобільні камери зазвичай мають фіксований фокус, а камери, спрямовані вперед, зазвичай потребують відносно великих фокусних відстаней для надання інформації про віддалені об'єкти. Оптична система для цих камер повинна забезпечувати високу роздільну здатність, а також працювати в широкому діапазоні температур довкілля. Параметри конструкції камери отримані з функціональних вимог розпізнавання дорожніх знаків на відстані 200 м. Конструкція об'єктива має п'ять лінз зі сферичними поверхнями. Об'єктив має відносний отвір $f/2$ і МПФ понад 0,5 за 111 л/мм у всьому температурному діапазоні.

Конструкція цього об'єктива відповідає вимогам як ADAS, так і систем повністю автономних автомобілів. Зазначений об'єктив можна інтегрувати з матрицями на 8 Мп, щоб

сформувати автомобільну камеру з високою роздільною здатністю, яка працює на великій відстані, може встановлюватися серійно та широко використовуватися в сучасних транспортних засобах.

Дослідження в цьому напрямку є перспективними, адже автомобілі отримують дедалі більше автономності, а для гарантування відповідного рівня безпеки на дорогах і точності визначення об'єктів необхідні якісні камери та об'єктиви до них. Надалі в цій предметній області будуть необхідні дослідження алгоритмів обробки зображень, нейронних мереж детектування розмітки та характеристик і параметрів об'єктивів, адже саме від них залежить не лише якість зображень і їх обробки, а й точність роботи всієї системи.

References

- [1] *Road safety annual report 2019* [Online]. Available: <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/irtad-road-safety-annual-report-2019.pdf>
- [2] G. Vivo *et al.*, "The European Integrated Project "SAFESPOT"-How ADAS applications co-operate for the driving safety," in *2007 IEEE Intelligent Transportation Systems Conf.*, Bellevue, 2007. doi: 10.1109/ITSC.2007.4357715
- [3] M. Zhao *et al.*, "Distance measurement system for smart vehicles," in *2015 7th Int. Conf. on New Technologies, Mobility and Security (NTMS)*, Paris, France, 2015. doi: 10.1109/NTMS.2015.7266486
- [4] *Driving safer with high quality Image Sensors* [Online]. Available: <https://www.samsung.com/semiconductor/image-sensor/automotive-image-sensor/S5K2G1/>
- [5] *Sony Releases the Industry's Highest Resolution 7.42 Effective Megapixel Stacked CMOS Image Sensor for Automotive Cameras* [Online]. Available: <https://www.sony.net/SonyInfo/News/Press/201710/17-094E/>
- [6] F.E. Sahin, "Lens design for active alignment of mobile phone cameras," *Optic. Eng.*, vol. 56, no. 6, p. 065102, 2017. doi: 10.1117/1.OE.56.6.065102
- [7] P. Sermanet and Y. LeCun, "Traffic sign recognition with multi-scale Convolutional Networks," in *2011 Int. Joint Conf. on Neural Networks*, San Jose, 2011. doi: 10.1109/IJCNN.2011.6033589
- [8] K. Schwertz *et al.*, "Graphically selecting optical components and housing material for color correction and passive athermalization," in *Current Developments in Lens Design and Optical Eng. XIII*, San Diego, 2012. doi: 10.1117/12.930968
- [9] *Optical Glass Data Sheets* [Online]. Available: https://www.schott.com/d/advanced_optics/ac85c64c-60a0-4113-a9df-23ee1be20428/1.17/schott-optical-glass-collection-datasheets-english-may-2019.pdf
- [10] F.E. Sahin, "Long-range, high-resolution camera optical design for assisted and autonomous driving," *Photonics*, vol. 6, no. 2, p. 73, 2019. doi: 10.3390/photonics6020073

В.С. Стадничук, В.Г. Колобродов, А.А. Мосолаб, Д.Ю. Кондратенко, Д.И. Рябоконт

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОБЪЕКТИВА КАМЕРЫ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ АВТОМОБИЛЕМ

Проблематика. Анализ статистических данных показал, что в большинстве случаев причиной автомобильных аварий являются ошибки водителей и, как следствие, нарушение правил дорожного движения. В связи с этим в течение последних 10 лет активно выполняются разработки в области распознавания дорожных знаков и препятствий на пути движения автомобиля. Автопроизводители предлагают готовые системы, смонтированные за внутренним зеркалом заднего вида и подключенные к бортовому компьютеру автомобиля, который контролирует его в критической ситуации. Основными недостатками систем этого класса являются невысокая дальность распознавания дорожных знаков, зависимость оптических параметров от температуры и низкая светочувствительность.

Цель исследования. Смоделировать атермальный объектив для камеры высокого разрешения, исследовать характеристики линз в зависимости от температуры окружающей среды.

Методика реализации. Анализ и моделирование объективов, линз, оптического стекла из разных материалов.

Результаты исследования. Предложен объектив камеры высокого разрешения для всех типов автомобилей. Разработан атермальный объектив для камеры высокого разрешения.

Выводы. Рассмотрено оптимизированную атермическую конструкцию объектива видимого спектра для автомобильных камер дальнего радиуса действия. Автомобильные камеры обычно имеют фиксированный фокус, а камеры, направленные вперед, обычно нуждаются в относительно больших фокусных расстояниях для предоставления информации об удаленных объектах. Оптическая система для этих камер должна обеспечивать высокое разрешение, а также работать в широком диапазоне температур окружающей среды. Параметры конструкции камеры получены из функциональных требований распознавания дорожных знаков на расстоянии 200 м. Конструкция объектива имеет пять линз со сферической поверхностью. Объектив имеет относительное отверстие $f/2$ и МПФ более 0,5 по 111 л/мм во всем температурном диапазоне.

Ключевые слова: поле зрения; система управления автомобилем; проектирование оптико-электронных систем; моделирование объективов; моделирование линз; видеокамера высокого разрешения; компьютерное зрение.

V.S. Stadnichuk, V.G. Kolobrodov, O.O. Mosolab, D.Yu. Kondratenko, D.I. Ryabokon

HIGH RESOLUTION CAMERA DESIGN PLANNING THEORETICAL FOUNDATIONS FOR DRIVING SYSTEMS

Background. Analysis of statistical data showed that in most cases the cause of the accident is driver error and, as a consequence, violation of traffic rules. In this regard, over the past 10 years, active developments in the field of recognition of road signs and other obstacles in the path of a car have been actively developing. Car manufacturers offer ready-made built-in systems, mounted behind the interior rearview mirror and connected to the car's on-board computer, which carries out further control of the car in a critical situation. The main disadvantage of these systems of this class is the low range of recognition of road signs, the dependence of optical parameters on temperature and low light sensitivity.

Objective. The purpose of the paper is to model an athermal objective for a high-resolution camera, investigate the characteristics of lenses depending on the ambient temperature.

Methods. Analysis and modeling of objectives, lenses, optical glass from different materials.

Results. A high-resolution camera objective for all types of cars is proposed. An athermal objective was developed for a high-resolution camera.

Conclusions. The optimized athermal design of the visible spectrum objective for long-range car cameras is considered. Car cameras typically have a fixed focus, and forward-facing cameras typically require relatively long focal lengths to provide information about distant objects. The optical system for these cameras should provide high resolution, as well as operate in a wide range of ambient temperatures. The camera design parameters are derived from the functional requirements of road sign recognition at a distance of 200 m. The objective design has five lenses with spherical surfaces. The objective has a relative aperture of $f/2$ and a modulation transfer function (MTF) of more than 0.5 at 111 l/mm over the entire temperature range.

Keywords: field-of-view; driving system; optoelectronic system planning; modeling of objectives; modeling of lenses; high resolution camera; computer stereo vision.

Рекомендована Радою
приладобудівного факультету
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
10 листопада 2020 року

Прийнята до публікації
29 березня 2021 року