
ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.396.96
DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-3-226-233

РАДИООПТИЧЕСКИЙ ЛИНЗОВЫЙ ОТРАЖАТЕЛЬ-ИЗЛУЧАТЕЛЬ

Е. Л. ШОШИН

*Сургутский государственный университет, 628400, Сургут, Россия
E-mail: shoshin6@mail.ru*

Представлена конструкция рассеивающей линзы, выполняющей в оптическом диапазоне функции излучения и отражения волн радиолокационного диапазона. Рассмотрена методика расчета конструктивных параметров и энергетических характеристик рассеяния радиооптического линзового отражателя-излучателя. Приведены результаты экспериментальных исследований опытного образца отражателя-излучателя.

Ключевые слова: линза Люнеберга, омические потери, эффективная поверхность рассеяния, светоизлучающий диод, навигационный знак

Введение. Для обеспечения безопасности морского и речного судоходства широко применяются плавучие и береговые навигационные знаки. Одним из требований ГОСТ 26600-98 при организации судоходства является установка на навигационные знаки светосигнальных приборов [1, 2]. К дополнительным мерам относится ввод в состав навигационных знаков пассивных радиолокационных отражателей, используемых при судоходстве в условиях недостаточной видимости, а также при резком изменении береговой линии и русла реки, когда опасность для судна выйти из фарватера многократно возрастает [3].

На практике в качестве искусственных радиолокационных отражателей используются биконические отражатели, трехгранные уголкового отражатели и линзы Люнеберга [4—8]. Последние обладают значительной эффективной поверхностью рассеяния (ЭПР) и круговой индикатрисой обратного рассеяния (ИОР), что обуславливает целесообразность использования этих отражателей как в составе линейных створов, так и в составе плавучих бакенов. Появление новых материалов позволяет снизить стоимость изготовления линзы Люнеберга.

Радиооптический отражатель-излучатель на основе линзы Люнеберга. Схема радиооптического линзового отражателя-излучателя (РЛОИ) приведена на рис. 1, где 1 — линза, 2 — рассеивающий обруч, 3 — источник света.

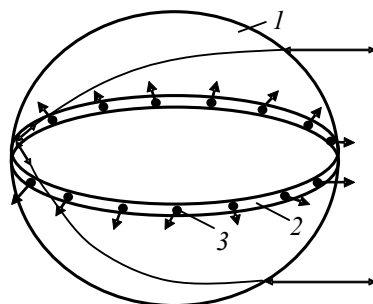


Рис. 1

При падении плоских электромагнитных волн на РЛОИ они претерпевают концентрацию и фокусировку, что связано с выбранным законом изменения диэлектрической проницаемости линзы в радиальном направлении:

$$\varepsilon(r) = 2 - \left(\frac{r}{a}\right)^2, \quad (1)$$

где r — радиальная координата в сферической системе координат, a — радиус линзы.

В целях упрощения технологии изготовления РЛОИ структуру линзы целесообразно разделить на однородные слои, значения диэлектрической проницаемости которых позволяют заменить непрерывный закон (1) на ступенчатый.

Индикатриса обратного рассеяния отражателя-излучателя определяется формой экрана, покрывающего поверхность линзы. Экран рассматриваемой конструкции РЛОИ формируется на внутренней стороне рассеивающего обруча (см. рис. 1) и состоит из одного или нескольких локальных металлизированных участков, непосредственно соприкасающихся с линзой. В частном случае топология экрана может соответствовать форме обруча, расположенного в сечении линзы экваториальной плоскостью. В этом случае ЭПР линзы Люнеберга не зависит от направления падения электромагнитных волн, приходящих с произвольного азимутального направления.

На внешней поверхности рассеивающего обруча размещаются источники света, которые обеспечивают оптическую видимость РЛОИ в ночное время суток и в условиях недостаточной видимости. Наиболее перспективны в применении светоизлучающие полупроводниковые диоды, различающиеся яркостью, цветом свечения и наличием встроенных светорассеивающих линз. Тип светоизлучающих диодов и их количество, при размещении в составе РЛОИ, определяются требованиями по достижению заданной дальности видимости и показателями надежности при эксплуатации. При размещении достаточно большого количества источников света с постоянным углом разноса диаграмма углового распределения силы света в азимутальной плоскости носит равномерный характер. Выход из строя одного или нескольких источников света не приведет к потере работоспособности РЛОИ.

В качестве альтернативы точечным светоизлучающим диодам следует рассматривать светодиодные ленты, в которых светоотдача одного излучающего диода составляет 90 лм/Вт и более. Промышленные светодиодные ленты, выпускаемые на гибкой печатной плате в полиуретановой оболочке, имеют классы защиты IP65, IP66, IP67, IP68 и способны по сигналу управления изменять цвет излучения, в том числе, формируя белый, красный, желтый и зеленый цвета, рекомендованные Международной ассоциацией маячных служб [9]. Использование поликарбонатных рассеивающих линз позволяет сформировать требуемые характеристики светового излучения по азимуту и углу места.

Расчет конструктивных параметров и энергетических характеристик РЛОИ. При реализации РЛОИ кругового действия будет проявляться эффект затенения экраном облучающих электромагнитных волн, поэтому размер экрана в угломестной плоскости не может быть выбран большим. Площадь приема S соответствует проекции сферической линзы РЛОИ на плоскость, перпендикулярную направлению приема радиолокационных сигналов, приходящих под углом азимута произвольного значения (рис. 2). На прием сигналов влияет затенение экрана, форма проекции которого на плоскость приема близка к прямоугольной при направлении падения облучающих волн под углом места $\gamma = 0$ (рис. 2, а), и в общем случае, для произвольных γ , форма проекции экрана представляет собой искривленную фигуру с эллиптической траекторией срединной линии (рис. 2, б).

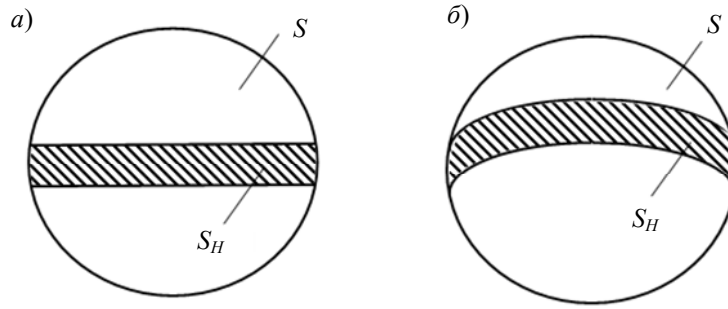


Рис. 2

Затенение облучающих электромагнитных волн экраном площадью S_H приводит к уменьшению площади приема:

$$S = \pi a^2 - S_H. \quad (2)$$

В свою очередь, площадь затенения может быть найдена по формуле

$$S_H = wL, \quad (3)$$

где w — ширина экрана, L — длина срединной линии проекции экрана, равная половине длины эллипса:

$$L \approx 2 \frac{\pi ab + (a-b)^2}{a+b}, \quad (4)$$

где b — малая полуось срединной линии проекции экрана, равная

$$b = \frac{\gamma a}{2}. \quad (5)$$

Подставляя формулы (4) и (5) в (3), получаем

$$S_H = aw \frac{4 + 2\gamma(\pi - 2) + \gamma^2}{2 + \gamma}. \quad (6)$$

Формулы (4)—(6) справедливы при $\gamma \leq 20^\circ$, при этом погрешность определения S по формуле (2) не превышает 1 %.

При определении коэффициента усиления РЛОИ необходимо учитывать омические потери в материале линзы, которые рассчитываются с помощью оптической теоремы [10]. В работах [11, 12] получены оценки потерь усиления линзы Лüneберга, состоящей из шести слоев с равношаговым приближением диэлектрической проницаемости, для материалов с различными значениями омических потерь. Эмпирическая формула, аппроксимирующая значения потерь усиления линзы из шести слоев с относительной погрешностью $\leq 2,5\%$, имеет следующий вид:

$$\Delta G = e^{-200 \operatorname{tg} \delta \cdot a}, \quad (7)$$

где $\operatorname{tg} \delta$ — тангенс диэлектрических потерь.

Формула (7) может применяться для рассеивающих линз диаметром от 2λ до 20λ (λ — длина волны). Омические потери в материале линзы вносятся дважды, сначала при прохождении РЛОИ падающих волн и затем при рассеянии и формировании переизлученных электромагнитных волн, при этом коэффициент усиления РЛОИ равен

$$G = \frac{4\pi S e^{-400 \operatorname{tg} \delta \cdot a}}{\lambda^2}. \quad (8)$$

Эффективная поверхность рассеяния РЛОИ вычисляется как произведение его эффективной апертуры и коэффициента усиления:

$$\sigma = \frac{4\pi^3 a^4 e^{-400 \operatorname{tg} \delta \cdot a}}{\lambda^2} \left(1 - w \frac{4 + 2\gamma(\pi - 2) + \gamma^2}{a\pi(2 + \gamma)} \right)^2. \quad (9)$$

Для достижения условий безопасности речного и морского судоходства радиолокационный отражатель должен соответствовать минимальным требованиям к характеристикам рассеяния в X-диапазоне (9,300...9,500 ГГц) и S-диапазоне (2,900...3100 ГГц) рабочих частот. Согласно имеющимся данным наблюдения за водной поверхностью, для обнаружения радиолокационной цели в X-диапазоне при волнении около 4 баллов площадь ее средней эффективной отражающей поверхности должна составлять 1—3 м² [7]. Согласно требованиям ГОСТ Р ИСО 8729-1, искусственный радиолокационный отражатель в случае его размещения на маломерном судне должен обеспечивать заявленный уровень ЭПР не менее 7,5 м² в X-диапазоне и 0,5 м² в S-диапазоне. Суммарный диапазон значений углов в азимутальной плоскости, в пределах которого обеспечиваются указанные значения ЭПР, должен быть не менее 280° (рис. 3), при этом в индикатрисе обратного рассеяния не должно быть участков с нулевыми значениями отраженного сигнала угловой протяженностью более 10° и угловых расстояний между участками с нулевыми значениями ЭПР менее 20°. Материалы, используемые при изготовлении отражателя, должны обладать достаточной прочностью и высокой коррозионной стойкостью для выполнения функций отражения в условиях нагрузок, проявляющихся вследствие волнения, вибраций, влажности и изменений температуры.

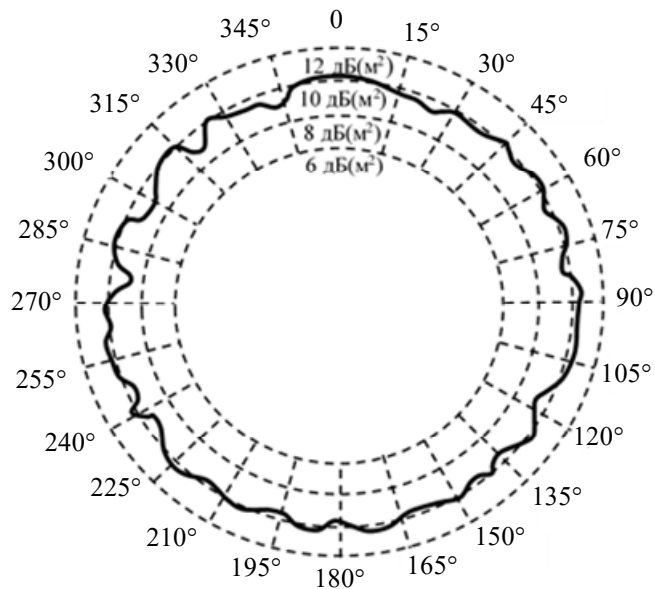


Рис. 3

Обоснуем выбор конструктивных параметров РЛОИ. Учитывая, что $\sigma \sim a^4/\lambda^2$ согласно (9), требуемые значения ЭПР линзы могут быть получены в X-диапазоне при $2a/\lambda = 8...10$ и в S-диапазоне при $2a/\lambda = 2,3...2,8$. Выберем РЛОИ диаметром 0,25 м, для которого выполним разбиение линзы на шесть слоев и процедуру равношагового приближения диэлектрической проницаемости каждого из слоев путем замены непрерывного закона (1) ступенчатым. В табл. 1 приведены рассчитанные значения параметров слоев линзы.

Таблица 1

Параметр	Номер слоя					
	1	2	3	4	5	6
Диаметр слоя, м	0,098	0,14	0,17	0,195	0,22	0,25
Диэлектрическая проницаемость слоя ϵ	1,93	1,77	1,6	1,46	1,31	1,16

Используя (9), рассчитаем ЭПР линзы при $\gamma = 0$, задавая различные величины омических потерь материалов, из которых может быть изготовлен РЛОИ. Результаты расчета σ приведены в табл. 2.

Таблица 2

Рабочая частота, МГц	$\sigma, \text{ м}^2, \text{ при}$		
	$\text{tg}\delta = 3 \cdot 10^{-3}$	$\text{tg}\delta = 10^{-2}$	$\text{tg}\delta = 3 \cdot 10^{-2}$
9400	17,06	12,02	4,42
3000	1,74	1,22	0,45

Приведенные данные свидетельствуют, что омические потери материалов, используемых при изготовлении радиооптической линзы, оказывают сильное влияние на энергетические характеристики рассеяния.

При выборе типа светоизлучающих диодов должны быть учтены требования Международных правил предупреждения столкновений судов в море (МППСС-72), согласно которым минимальная сила света огней рассчитывается по формуле [13]

$$I = 3,43 \cdot 10^6 \cdot T D^2 K^{-D}, \quad (10)$$

где I — сила света в эксплуатационных условиях, кд; T — световой порог, равный $2 \cdot 10^{-7}$ лк; D — дальность видимости огня, морская миля; K — коэффициент пропускания атмосферы, принимаемый равным 0,8. Задавая $D=1,4$ мили (2,5 км), можем получить силу света $I=1,84$ кд. Данному требованию отвечают промышленно выпускаемые светоизлучающие диоды с мощностью рассеяния 1 Вт, способные формировать световой поток 110...130 лм.

Для создания равномерной диаграммы углового распределения силы света в азимутальной плоскости количество диодов должно быть выбрано из условия

$$N \geq \frac{360^\circ}{\theta_{50\%}}, \quad (11)$$

где $\theta_{50\%}$ — угловая ширина светового пучка диода по уровню 50 % от максимального значения силы света; выбрав диод LED 001-W 01-C-0,25M с установленной на нем вторичной линзой ($\theta_{50\%} = 15^\circ$), получим $N=24$.

Экспериментальные результаты. В целях проверки эффективности применения радиооптических методов судовой навигации был выбран опытный образец РЛОИ (см. табл. 1), изготовленный из пенополистерола, к основным свойствам которого относятся малый вес, высокая коррозионная стойкость и низкие омические потери [14]. Экран РЛОИ имеет форму выполненного из алюминия обруча шириной 65 мм, покрывающего рассеивающую линзу вдоль ее экваториальной линии. С внешней стороны экрана размещены светоизлучающие диоды, оборудованные вторичной линзой и создающие направленное оптическое излучение в азимутальной плоскости.

Характеристики радиооптического отражателя-излучателя

Рабочая длина волны, см	3,2
Радиус линзы, мм	125
Количество слоев линзы	6
Вес конструкции, кг	2,1
Ширина ИОР, ...°	
в азимутальной плоскости	360
в угломестной плоскости	30
Количество светоизлучающих диодов	24
Угловой разнос размещения светоизлучающих диодов, ...°	15
Ширина диаграммы углового распределения силы света, ...°	
в азимутальной плоскости	360
в угломестной плоскости	15
Тип светоизлучающих диодов	LED 001-W 01-C-0,25M
Длина волны, нм	660
Яркость свечения, кд	2
Диаметр вторичной линзы, мм	22

Цель лабораторных испытаний — исследование диаграммы рассеяния РЛОИ на частоте облучения 9410 МГц. Для этого отражатель был помещен в микроволновую безэховую камеру, а в качестве измерительного прибора использовался векторный анализатор цепей Keysight серии PNA-X. Методика испытаний включала измерение значений ЭПР при усреднении данных, свободных от наложения сигналов, в течение 5-секундных интервалов времени для различных направлений облучения РЛОИ в азимутальной плоскости, задаваемых с помощью управляемого привода. Диаграмма обратного рассеяния РЛОИ (рис. 3) свидетельствует о неравномерности значений ЭПР в круговом секторе углов обратного рассеяния радиоволн, составляющей 1,7 дБ. Максимальное значение ЭПР — 11,1 м², среднее значение — 9,3 м², участки с нулевым значением ЭПР отсутствуют.

Для оценки эксплуатационных характеристик РЛОИ были проведены натурные испытания в период речной навигации на участке водного пути реки Обь. РЛОИ был размещен на борту моторной лодки из ПВХ, удаляющейся на малом ходу от маломерного судна с действующим судовым локатором типа Furuno M-1715.

Характеристики судового радиолокатора

Рабочая частота, МГц	9410
Длительность импульса, мкс	0,08
Частота повторения, Гц	3000
Выходная мощность, кВт	2,2
Ширина антенного луча, ...°	
в азимутальной плоскости	5,2
в угломестной плоскости	25

Высота размещения РЛОИ составила 1,5 м относительно уровня воды; дальность удаления от судового радиолокатора определялась с помощью ГЛОНАСС-приемника. Оценка дальности видимости проблескового огня РЛОИ производилась в темное время суток и составила 2,3—2,4 км, что оказалось несколько больше дальности видимости проблескового огня прибора ЭСПК-90, с которым проводилось сравнение. Радиолокационная дальность обнаружения РЛОИ при приближении к судовому радиолокатору составила 0,8 км.

Заключение. Представлен линзовый отражатель-излучатель, реализующий функции рассеяния радиолокационных сигналов и оптического излучения, что позволяет повысить безопасность судового движения в темное время суток и в условиях недостаточной видимости. Радиооптический линзовый отражатель-излучатель кругового действия обладает равномерной диаграммой углового распределения силы света в азимутальной плоскости, а в диаграмме рассеяния радиолокационных сигналов, приходящих с произвольного азимутального направления, отсутствуют участки с нулевым уровнем отраженного сигнала. Неравномерность значений ЭПР отражателя-излучателя в X-диапазоне рабочих частот не превышает 1,7 дБ в секторе углов обратного рассеяния радиоволн. Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют об эффективности применения радиооптических линзовых отражателей-излучателей в качестве навигационных знаков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ухов Г. А. Судходная обстановка и навигационное оборудование внутренних водных путей: Учеб. пособие. Новосибирск: НГАВТ, 2004. 170 с.
2. Удачин В. С., Шереметьев Ю. Н. Навигационные знаки и огни, судовая сигнализация: справ. пособие. М.: Транспорт, 1993. 255 с.
3. Дуров А. А., Кан В. С., Ничипоренко Н. Т., Устинов Ю. М. Судовая радиолокация. Судовые радиолокационные системы и САРП: Учебник для вузов. Петропавловск-Камчатский, КамчатГТУ, 2005. 280 с.
4. Zekavat R., Buehrer R. Handbook of Position Location: Theory, Practice and Advances. Wiley-IEEE Press, 2012. 1376 p.

5. Vinogradov S. S., Smith P. D., Kot J. S., Nikolic N. Radar cross-section studies of spherical lens reflectors // Progress in Electromagnetics Research. 2007. Vol. 72. P. 325—337.
6. Pfeiffer C., Grbic A. A printed broadband Luneburg lens antenna // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 2010. Vol. 58, N 9. P. 3055—3059.
7. Report on the investigation of the loss of the sailing yacht „Ouzo“ and her three crew South of the Isle of Wight during the night of 20/21 August 2006 / Marine Accident Investigation Branch, Southampton, UK; Rep. N 7/2007, Apr. 2007. 49 p.
8. Guo J., Yin H., Jia Q. An empirical formula RSC of bistatic Luneburg lens reflector // Proc. Computer Science. 2019. Vol. 147. P. 97—101.
9. Руководство по навигационному оборудованию / Международная ассоциация морских средств навигационного оборудования и маячных служб (МАМС). 2006. 190 с.
10. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Квантовая механика (нерелятивистская теория). М.: Наука, 1989. 768 с.
11. Кузьмин С. В. Математическая модель многослойной линзы Лüneберга: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. СПб, 2004.
12. Панченко Б. А., Лебедева Е. В., Екимовских Е. А. Коэффициент направленного действия и усиления линзы Лüneберга // Антенны. 2011. № 6. С. 67—69.
13. МППСС — 1972. Международные правила предупреждения столкновений судов в море. М.: Моркнига, 2013. 156 с.
14. Pillai P. K. C., Rashmi R. Dielectric properties of polystyrene and some related polymers // Intern. Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials. 1980. Vol. 8, N 4. P. 255—263.

Сведения об авторе

Евгений Леонидович Шошин

— канд. техн. наук, доцент; Сургутский государственный университет, кафедра экспериментальной физики; доцент;
E-mail: shoshin6@mail.ru

Поступила в редакцию
25.12.2020 г.

Ссылка для цитирования: Шошин Е. Л. Радиооптический линзовый отражатель-излучатель // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 3. С. 226—233.

RADIO-OPTICAL LENS REFLECTOR-EMITTER

E. L. Shoshin

Surgut State University, 628400, Surgut, Russia
E-mail: shoshin6@mail.ru

A scattering lens performing in the radar wave range the functions of radiation emission and reflection is designed. A technique for calculating the design parameters and energy characteristics of scattering for the radio-optical lens reflector-emitter is proposed. Results of experimental studies of the reflector-emitter prototype are presented.

Keywords: Luneburg lens, ohmic losses, effective scattering surface, light-emitting diode, navigation sign

REFERENCES

1. Ukhov G.A. *Sudokhodnaya obstanovka i navigatsionnoye oborudovaniye vnutrennikh vodnykh putey* (Navigational Situation and Navigational Equipment of Inland Waterways), Novosibirsk, 2004, 170 p. (in Russ.)
2. Udachin V.S., Sheremet'yev Yu.N. *Navigatsionnyye znaki i ogni, sudovaya signalizatsiya* (Navigation Signs and Lights, Ship Signaling), Moscow, 1993, 255 p. (in Russ.)
3. Durov A.A., Kan V.S., Nichiporenko N.T., Ustinov Yu.M. *Sudovaya radiolokatsiya. Sudovyye radiolokatsionnyye sistemy i SARP* (Ship Radar. Marine Radar Systems and ARPA's), Petropavlovsk-Kamchatskiy, 2005, 280 p. (in Russ.)
4. Zekavat R., Buehrer R. *Handbook of Position Location: Theory, Practice and Advances*, Wiley-IEEE Press, 2012, 1376 p.

5. Vinogradov S.S., Smith P.D., Kot J.S., Nikolic N. *Progress in Electromagnetics Research*, 2007, vol. 72, pp. 325–337.
6. Pfeiffer C. and Grbic A. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, no. 9(58), pp. 3055–3059.
7. *Report on the investigation of the loss of the sailing yacht «Ouzo» and her three crew South of the Isle of Wight during the night of 20/21 August 2006*. Marine Accident Investigation Branch, Carlton House, Carlton Place, Southampton, Report No 7/2007, April 2007, 49 p.
8. Guo J., Yin H., Jia Q. *Procedia Computer Science*, 2019, vol. 147, pp. 97–101.
9. *Rukovodstvo po navigatsionnomu oborudovaniyu. Izdaniye Mezhdunarodnoy Assotsiatsii Morskikh Sredstv Navigatsionnogo Oborudovaniya i Mayachnykh Sluzhb (MAMS) (Navigation Equipment Manual. Published by the International Association of Maritime Aids to Navigation Equipment and Lighthouse Services (IALA)), MAMS, 2006, 190 p. (in Russ.)*
10. Landau L.D., Lifshits E.M. *Kvantovaya mekhanika (nerelyativistskaya teoriya) (Quantum Mechanics (Non-Relativistic Theory))*, Moscow, 1989, 768 p. (in Russ.)
11. Kuz'min S.V. *Matematicheskaya model' mnogosloynoy linzy Lyuneberga (Mathematical Model of a Multilayer Luneberg Lens)*, Extended abstract of candidate's thesis, St. Petersburg, 2004, 114 p. (in Russ.)
12. Panchenko B.A., Lebedeva E.V., Ekimovskikh E.A. *Antenny*, 2011, no. 6, pp. 67–69. (in Russ.)
13. *MPPSS - 1972. Mezhdunarodnyye pravila preduprezhdeniya stolknoveniy sudov v more (COLREGs - 1972. International Regulations for the Prevention of Collisions at Sea)*, Moscow, 2013, 156 p. (in Russ.)
14. Pillai P.K.C., Rashmi R. *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, 1980, no. 4(8), pp. 255–263.

Data on author**Evgeny L. Shoshin**

— PhD, Associate Professor; Surgut State University, Department of Experimental Physics; E-mail: shoshin6@mail.ru

For citation: Shoshin E. L. Radio-optical lens reflector-emitter. *Journal of Instrument Engineering*. 2021. Vol. 64, N 3. P. 226—233 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-3-226-233