

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЙЯНИЯ РАДИООПТИЧЕСКИХ УГОЛКОВЫХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ НАПРАВЛЕННОГО ДЕЙСТВИЯ В СОСТАВЕ НАВИГАЦИОННЫХ ЛИНЕЙНЫХ СТВОРОВ

© 2022 г. Н. К. Блинковский<sup>а,\*</sup>, В. Л. Гулько<sup>а</sup>, А. А. Мещеряков<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники  
Россия, 634050, Томск, просп. Ленина, 40

\*e-mail: nkblink@yandex.ru

Поступила в редакцию 11.03.2022 г.

После доработки 18.03.2022 г.

Принята к публикации 29.03.2022 г.

Описаны принцип действия и практическая конструкция радиооптического трехгранного уголкового отражателя направленного действия. Получена оценка радиолокационной заметности радиооптических трехгранных уголкового отражателей в составе линейных створов в рамках использования четырехлучевой модели распространения и отражения радиоволн над водной поверхностью. Приведены результаты натурных испытаний оптической видимости и радиолокационной заметности радиооптических трехгранных уголкового отражателей в составе линейных створов на реке Томь.

DOI: 10.31857/S0032816222050032

### ВВЕДЕНИЕ

Известно, что для создания безопасных условий плавания судов и обеспечения сохранности искусственных сооружений на внутренних водных путях используются навигационные ограждения в виде сигнальных огней и знаков. Сигнальные огни устанавливаются на береговые и плавучие навигационные знаки и работают только в ночное время суток. Они характеризуются цветом и характером огня — чередованием вспышек (проблесков) и пауз (затемнений). Кроме того, для улучшения заметности в условиях недостаточной видимости знаки навигационного ограждения оснащаются искусственными пассивными радиолокационными отражателями [1–5], которые хорошо различимы судовыми радиолокационными станциями при любых погодных условиях и в любое время суток.

Радиолокационные отражатели размещают как на плавучих буйках, так и на береговых створных знаках. При этом радиолокационные отражатели, используемые в навигационных целях, должны одновременно сочетать в себе максимальную эффективную площадь рассеяния (ЭПР)  $\sigma_m$  при небольших габаритах, а также обладать способностью отражать падающие электромагнитные волны в обратном направлении в достаточно широком диапазоне углов падения волн, т.е. должны обладать достаточно широкой диаграммой обратного рассеяния.

В радиолокационном диапазоне волн этим требованиям удовлетворяют трехгранные уголкового отражатели (УО), представляющие собой распространенный тип широкоугольных отражателей направленного действия.

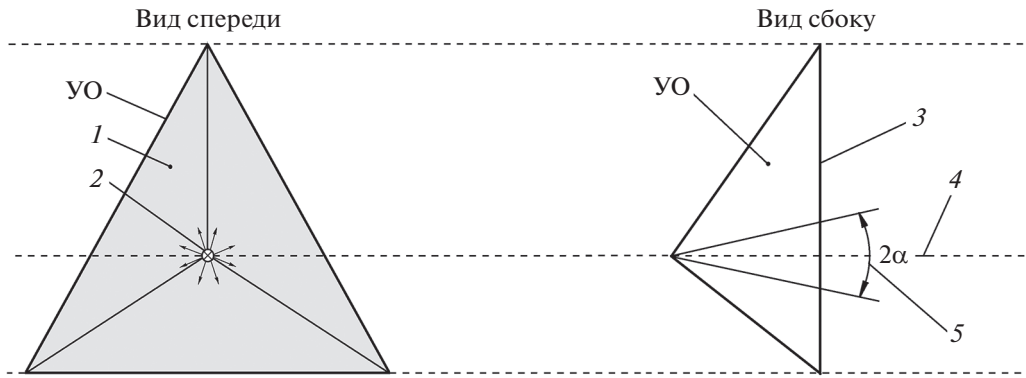
На практике широкое применение в качестве навигационных знаков нашли трехгранные УО с треугольными гранями в силу конструктивных достоинств, таких как простота изготовления, механическая жесткость, малые габариты и вес.

Для расширения их функциональных возможностей авторами были разработаны навигационные радиооптические УО направленного действия [6–8], работающие одновременно в радиолокационном и оптическом диапазонах волн, излучая светосигнальные огни в темное время суток.

Целью данной статьи является экспериментальное исследование характеристик рассеяния радиооптических трехгранных УО направленного действия в составе линейных створов на внутренних водных путях Обского бассейна.

### РАДИООПТИЧЕСКИЙ ТРЕХГРАННЫЙ УГОЛКОВЫЙ ОТРАЖАТЕЛЬ НАПРАВЛЕННОГО ДЕЙСТВИЯ

Для одновременной работы трехгранного УО направленного действия с треугольными металлизированными или металлическими гранями в радиолокационном и оптическом диапазонах



**Рис. 1.** Навигационный радиооптический трехгранный УО направленного действия. 1 – внутренняя поверхность треугольных граней УО; 2 – источник света с белым, красным, зеленым или желтым цветами свечения сигнального огня; 3 – плоскость раскрытия УО; 4 – геометрическая ось симметрии трехгранного УО; 5 – угол излучения источника света относительно оптической оси трехгранного УО.

волн в вершине трехгранного УО был установлен источник света в виде полупроводникового излучающего диода с белым, красным, зеленым или желтым цветами свечения [6]. На рис. 1 приведена конструкция радиооптического трехгранного УО с треугольными гранями.

Вершина трехгранного УО является фазовым центром рассеяния УО в радиолокационном диапазоне волн и его фокусом в оптическом диапазоне волн. В радиолокационном и оптическом диапазонах волн электрическая ось радиооптического УО, в направлении которой ЭПР  $\sigma_m$  и сила света  $I_m$  максимальны в горизонтальной и вертикальной плоскостях, совпадает с геометрической осью симметрии УО. При этом угол излучения  $2\alpha$  источника света в горизонтальной и вертикальной плоскостях составляет  $\geq 90^\circ$ .

В радиолокационном диапазоне волн радиооптический УО работает как обыкновенный пассивный трехгранный УО. Его внутренние отражающие поверхности образуют систему из трех треугольных граней. При падении на треугольные грани радиооптического УО электромагнитной волны после трехкратного отражения формируется волна, распространяющаяся в направлении, обратном направлению падения.

В оптическом диапазоне длин волн радиооптический УО направленного действия работает следующим образом.

Источник света, установленный в фокусе радиооптического УО, излучает вдоль его оптической оси в вертикальной и горизонтальной плоскостях конический световой пучок с угловой шириной  $2\alpha \geq 90^\circ$ . Световой пучок, попадая на взаимно перпендикулярные треугольные грани трехгранного УО, после трехкратного отражения концентрируется на выходе в световой пучок большей силы света  $I_m$  с угловой шириной на уровне  $0.5I_m$ , равной  $42^\circ$ , как в горизонтальной,

так и в вертикальной плоскостях. Угловая ширина светового потока, излучаемого радиооптическим УО на уровне  $0.5I_m$ , совпадает с шириной главного (основного) лепестка диаграммы обратного рассеяния на уровне  $0.5\sigma_m$  в радиолокационном диапазоне длин волн и составляет  $42^\circ$ . Цвет излучения сигнального огня – белый, красный, желтый или зеленый – светоизлучающего полупроводникового диода определяется сложившейся навигационной обстановкой на внутренних водных путях.

Для достижения максимальной силы света  $I_m$  и тем самым увеличения дальности видимости сигнального огня внутреннюю поверхность треугольных граней УО покрывают светоотражающим слоем [7, 8], что обеспечивает визуальное обнаружение створных знаков в темное время суток.

#### ОЦЕНКА РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ЗАМЕТНОСТИ ТРЕХГРАННЫХ УГОЛКОВЫХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ ВБЛИЗИ РАЗДЕЛА ДВУХ СРЕД

Безопасность плавания в условиях ограниченной видимости обеспечивается работой судовой радиолокационной станции (РЛС). При этом важным аспектом радиолокационного наблюдения является обнаружение знаков навигационного ограждения [9]. Для оценки вероятности правильного обнаружения, а также для прогнозирования дальности действия судовой РЛС при различных состояниях водной поверхности необходимо знать радиолокационную заметность навигационных знаков, которая определяется ЭПР трехгранного УО и поверхностью раздела двух сред. Характеристики радиолокационного рассеяния трехгранных УО, расположенных вблизи поверхности раздела двух сред, будут иметь интерференционный характер, зависящий от углов визирования трехгранных УО и водной поверх-

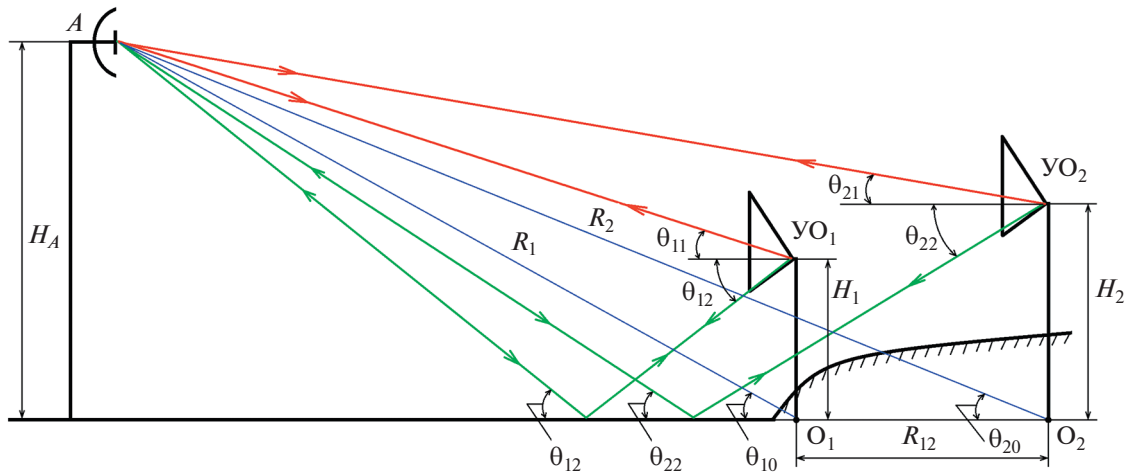


Рис. 2. Геометрия распространения радиоволн от трехгранных УО в составе линейного створа вблизи поверхности раздела двух сред. А – антенна.

ности. Это приводит к тому, что появляются зоны, в границах которых трехгранные УО в составе линейных створов одновременно не видны в радиолокационном диапазоне длин волн.

Максимальная ЭПР в свободном пространстве трехгранных УО с треугольными гранями определяется как [10]:

$$\sigma_m = \frac{4\pi a^4}{3\lambda^2}, \quad (1)$$

где  $a$  – длина ребра треугольной грани УО;  $\lambda$  – длина волны зондирующих сигналов.

Ширина их главного лепестка в горизонтальной и вертикальной плоскостях на уровне  $0.5\sigma_m$  составляет величину, равную  $\Delta\theta_{0.5} \approx 42^\circ$  [10].

Максимум диаграммы обратного рассеяния или максимум  $\sigma_m$  соответствует случаю, когда направление падающей волны совпадает с геометрической осью симметрии трехгранного УО, проходящей через его вершину перпендикулярно плоскости раскрыва. Причем фазовый центр рассеяния трехгранного УО всегда располагается в его вершине независимо от поляризации падающей волны и ракурса облучения.

Теоретически оценка ЭПР радиолокационных отражателей вблизи поверхности раздела двух сред осуществлялась на основе использования феноменологической теории рассеяния радиоволн морскими объектами [11]. Согласно феноменологической теории, отражение радиоволн от гладкой подстилающей поверхности рассматривается в приближении геометрической оптики, а от радиолокационных отражателей – в приближении физической оптики.

Радиолокационная заметность трехгранного УО в неоднородном падающем поле рассчитывалась в рамках четырехлучевой модели распро-

странения и отражения радиоволн над гладкой подстилающей поверхностью [12, 13].

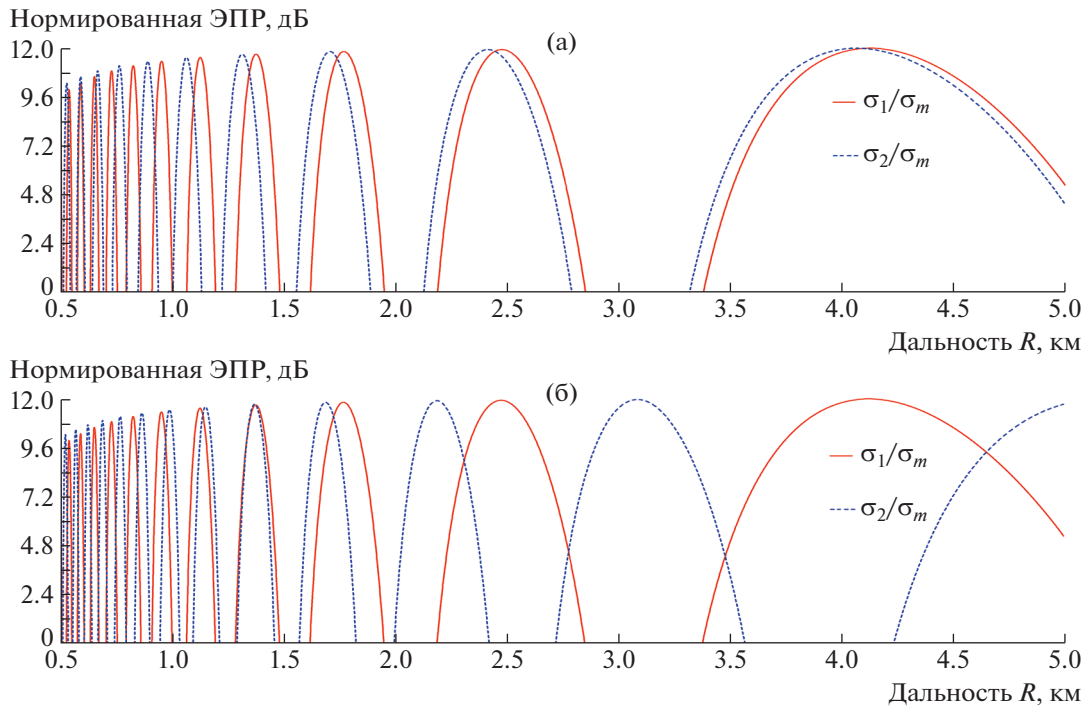
На рис. 2 приведена геометрия распространения радиоволн от двух трехгранных УО в составе линейного створа вблизи поверхности раздела двух сред.

Для каждого трехгранного УО по первому прямому лучу радиоволна распространяется по трассе “антенна РЛС–УО–антенна РЛС”; по второму лучу – по трассе “антенна РЛС–поверхность раздела–УО–антенна РЛС”; по третьему лучу – по трассе “антенна РЛС–УО–поверхность раздела–антенна РЛС”. При распространении радиоволн по второму и третьему лучам происходит однократное отражение от водной поверхности. По четвертому лучу радиоволна распространяется по трассе “антенна РЛС–поверхность раздела–УО–поверхность раздела–антенна РЛС”, на которой отражение от водной поверхности происходит дважды.

Распространение радиоволн по первому и четвертому лучам соответствует моностатическому рассеянию от трехгранного УО, а по второму и третьему лучам – бистатическому рассеянию. По сравнению с шириной главного лепестка, равной  $42^\circ$ , моностатической диаграммы обратного рассеяния трехгранного УО с треугольными гранями ширина главного лепестка бистатической диаграммы рассеяния этого же трехгранного УО весьма узкая и оценивается по уровню половинной мощности, согласно следующему эмпирическому выражению [14]:

$$\Delta\beta_{0.5} \approx \frac{10.8^\circ}{af}, \quad (2)$$

где  $a$ , м – длина ребра треугольной грани трехгранного УО;  $f$ , ГГц – рабочая частота.



**Рис. 3.** Зависимость ЭПР трехгранных УО от дальности до линейного створа при высотах расположения УО на створных знаках:  $H_1 = H_2 = 11$  м (а) и  $H_1 = 11$  м и  $H_2 = 14$  м (б).

Таким образом, известная интерференционная формула радиолокационной заметности для точечного отражателя не подходит для оценки ЭПР трехгранного УО вблизи водной поверхности при малых углах скольжения.

Фактическая ЭПР каждого трехгранного УО с треугольными гранями в составе линейного створа с учетом влияния подстилающей поверхности в рамках четырехлучевой модели распространения радиоволн при горизонтальной поляризации и малых углах скольжения определяется следующим выражением [15]:

$$\sigma = 4\sigma_m \cos^2 2\theta \left[ \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} H \sin\theta\right) - \frac{\sin\left(\frac{4\pi a}{\sqrt{6}\lambda} \sin\theta\right)}{\frac{4\pi a}{\sqrt{6}\lambda} \sin\theta} \right]^2, \quad (3)$$

где  $\sigma_m$  – максимальная ЭПР трехгранного УО с треугольными гранями в свободном пространстве;  $a$  – длина ребра треугольной грани УО;  $\lambda$  – рабочая длина волны РЛС;  $H$  – высота расположения УО над границей раздела двух сред;  $\theta$  – угол скольжения в точке  $O$ , находящейся на пересечении перпендикуляра, опущенного из вершины УО, к поверхности раздела двух сред (рис. 2). Плоскость раскрытия трехгранного УО перпендикулярна границе раздела двух сред.

Угол скольжения  $\theta$  можно выразить через наклонную дальность  $R$  до трехгранного УО и высоту  $H_A$  расположения антенны РЛС с помощью тригонометрического выражения

$$\theta = \arcsin(H_A/R). \quad (4)$$

Результаты расчета нормированной ЭПР трехгранных УО для различных высот расположения УО на створных знаках, выполненные по формуле (3), в зависимости от дальности до линейного створа приведены на рис. 3. Расчет был выполнен при следующих значениях: высота расположения антенны РЛС  $H_A = 9$  м; длина радиоволны  $\lambda = 3.2$  см; расстояние между створными знаками  $R_{12} = 62$  м. Дальность до линейного створа соответствовала дальности до его переднего знака.

Согласно графикам на рис. 3, высота расположения трехгранных УО на створных знаках влияет на местоположение интерференционных участков, в границах которых возможно совместное обнаружение трехгранных УО при судовом ходе вдоль створной линии. Очевидно, что местоположение указанных участков зависит не только от высот расположения трехгранных УО на створных знаках, но и от расстояния между ними.

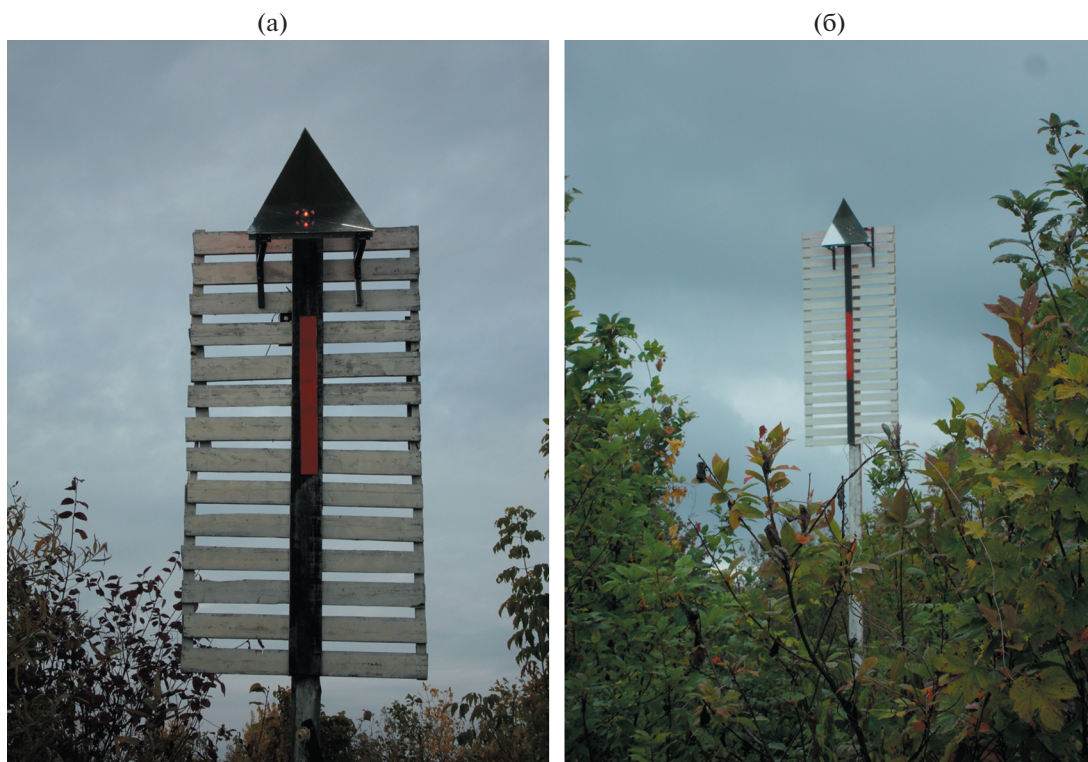


Рис. 4. Внешний вид радиооптических трехгранных УО в составе линейного створа: а – передний створный знак; б – задний створный знак.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯНИЯ РАДИООПТИЧЕСКИХ УГОЛКОВЫХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ НАПРАВЛЕННОГО ДЕЙСТВИЯ В ОПТИЧЕСКОМ И РАДИОЛОКАЦИОННОМ ДИАПАЗОНАХ ВОЛН

Экспериментальные исследования проводились на реке Томь по створным знакам, установленным на острове Чернильщиковский и оборудованным радиооптическими УО.

Внешний вид створных знаков с радиооптическими УО направленного действия приведен на рис. 4.

Высоты расположения антенны судовой навигационной РЛС и радиооптических УО на створных знаках соответствовали значениям, используемым в теоретической оценке радиолокационной заметности трехгранных УО.

Натурные испытания оптической видимости источников света проводились при коэффициенте прозрачности атмосферы от 0.7 до 0.84. При длине ребер треугольных граней УО  $a = 0.64$  м и рабочей длине волны РЛС  $\lambda = 3.2$  см максимальная ЭПР  $\sigma_m$  радиооптического УО в свободном пространстве составила  $686 \text{ м}^2$ .

Координаты расположения радиооптических УО направленного действия при их установке на створные знаки и уровень воды в реке Томь измерялись с помощью геодезического навигационного GPS/ГЛОНАСС приемника Topcon GB-1000.

Оценка оптической дальности видимости сигнальных огней радиооптических УО направленного действия

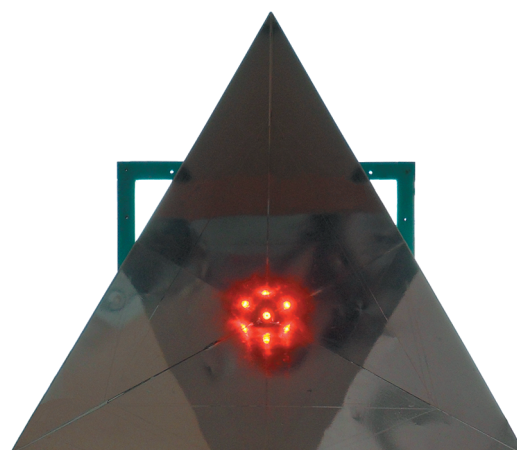
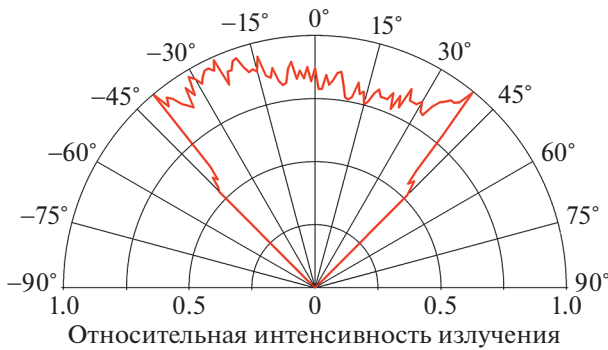


Рис. 5. Внешний вид радиооптического УО направленного действия с треугольными гранями, покрытыми алюминиевой фольгой.



**Рис. 6.** Экспериментальная диаграмма направленности излучения светового потока в горизонтальной плоскости.

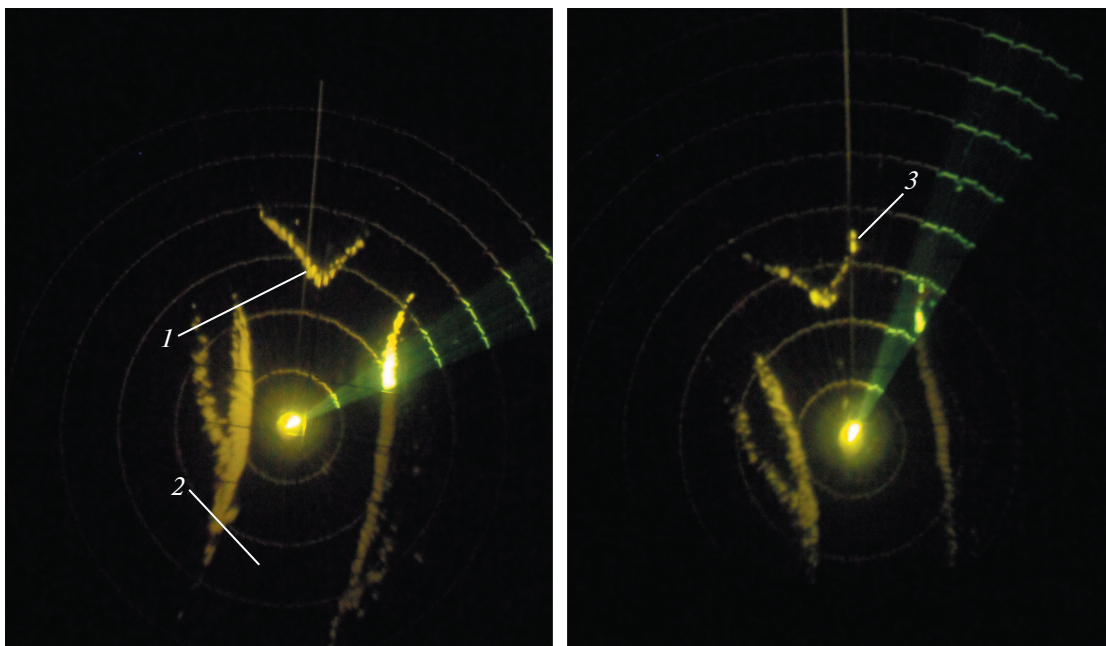
ного действия проводилась в темное время суток при судовом ходе по линейному створу.

В качестве источника света использовался радиооптический УО, внешний вид которого приведен на рис. 5.

Трехгранные УО были изготовлены из дюралюминиевых листов толщиной 3.0 мм. Зеркальное светоотражающее покрытие поверхностей треугольных граней УО с их внутренней стороны выполнено из алюминиевой фольги. Цвет излучаемого в пространство светового потока сигнального огня задавался типом светодиодных полупроводниковых ламп. В качестве излучающего источника света использовались светодиодные

полупроводниковые лампы типа ЛПРК, ЛПРЖ, ЛПРЛ, ЛПРБ со штифтовым цоколем В15s/18. Источник света был расположен на оптической оси трехгранного УО на расстоянии 4.0 см от его вершины – фокуса в оптическом диапазоне длин волн. При указанной расфокусировке источника света достигается равномерность светового потока по уровню половинной интенсивности излучения во всем угловом диапазоне  $\pm 45^\circ$  относительно оптической оси трехгранного УО. На рис. 6 приведена экспериментальная диаграмма направленности излучения светового потока в горизонтальной плоскости. Вследствие смещения источника света из фокуса в раскрытие УО появились дополнительно шесть мнимых источников света, что привело к увеличению интенсивности излучаемого светового потока.

Визуальный контроль оптической дальности видимости сигнальных огней проводился по всей длине створной линии для линейного створа, оборудованного сначала типовыми электрическими светосигнальными приборами ЭСПН-140, а затем радиооптическими УО направленного действия. Результаты испытаний показали, что дальность видимости сигнальных огней линейного створа с радиооптическими УО направленного действия в среднем на 10% выше дальности видимости сигнальных огней линейного створа с типовыми электрическими светосигнальными приборами ЭСПН-140.



**Рис. 7.** Радиолокационные изображения участка реки Томь на индикаторе кругового обзора судовой навигационной РЛС Р-722-2: **а** – без радиооптических УО, **б** – с радиооптическими УО. 1 – отражения от острова Чернильщикковский, 2 – русло реки, 3 – отражения от радиооптических УО, установленных на створных знаках.

Экспериментальная оценка радиолокационной заметности створных знаков проводилась по всей длине створной линии для линейного створа, оборудованного радиооптическими УО направленного действия.

Для оценки радиолокационной заметности створных знаков использовалась судовая навигационная РЛС Р-722-2. Измерения проводились сначала без установленных, а затем с установленными на береговые створные знаки радиооптическими УО. На рис. 7 приведены радиолокационные изображения участка реки Томь на индикаторе кругового обзора судовой навигационной РЛС. Дальность до линейного створа составляла 850 м.

Согласно рис. 7а, на фоне отражений радиоволн от береговой черты и близко расположенных местных предметов линейный створ без радиооптических УО на индикаторе кругового обзора судовой навигационной РЛС не обнаруживался. На рис. 7б створные знаки, оборудованные радиооптическими УО, отображались на индикаторе кругового обзора в виде двух яркостных отметок (позиция 3), расположенных на визирной линии, совпадающей с осью судового хода.

При изменении дистанции до створных знаков появлялись отдельные участки судового хода по створной линии, где яркостные отметки от радиооптических УО на индикаторе кругового обзора судовой навигационной РЛС отсутствовали вследствие наличия интерференционных минимумов их радиолокационной заметности. Местоположение интерференционных минимумов на створной линии определяется текущей дальностью до линейного створа и соответствует результатам расчетов, приведенным на рис. 3.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Получены экспериментальные оценки радиолокационной заметности и оптической видимости навигационных радиооптических УО направленного действия.

2. Использование радиооптических УО направленного действия описанной конструкции в составе линейных створов позволило увеличить дальность видимости сигнальных огней на 10% по сравнению с использованием штатных типовых электрических светосигнальных приборов ЭСПН-140, применяемых в настоящее время в практической навигации.

3. При обозначении судового хода по радиооптическим трехгранным УО в составе линейного створа с использованием РЛС необходимо учи-

тывать наличие интерференционных зон, в границах которых на индикаторе кругового обзора судовой навигационной РЛС яркостные отметки от трехгранных УО либо полностью отсутствуют, либо сильно ослаблены.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект № FEWM-2020-0039 от 01.03.2020.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Briggs J.N. // The Journal of Navigation. 2002. V. 55. № 2. P. 23.  
<https://doi.org/10.1017/S0373463301001564>
2. Yim J.B., Kim W.S. // International Journal of Navigation and Port Research. 2003. V. 27. № 3. P. 267.  
<https://doi.org/10.5394/KINPR.2003.27.3.267>
3. Horsmanheimo S., Backman W., Tuomimäki L., Hautio J., Hujanen A., Toivanen H., Rytönen J., Joro R. // IALA Bulletin. 2007. № 1. P. 24.
4. McGeoch Ian, Stawell W.B. // The Journal of Navigation. 1987. V. 40. № 3. P. 344.  
<https://doi.org/10.1017/S037346330000606>
5. Luke S. Performance investigation of marine radar reflectors on the market. Farnborough: QinetiQ Ltd, 2007.
6. Гулько В.Л. Патент на изобретение № 2 572 795 РФ // Опубликовано 20.01.2016. Бюл. № 2.
7. Гулько В.Л., Блинковский Н.К., Мещеряков А.А. Патент на изобретение № 2 634 550 РФ // Опубликовано 31.10.2017. Бюл. № 31.
8. Гулько В.Л., Блинковский Н.К., Мещеряков А.А., Сметанкин А.Н. Патент на изобретение № 2 709 419 РФ // Опубликовано 17.12.2019. Бюл. № 35.
9. Бородин М.А., Леонтьев В.В. // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2010. Вып. 4. С. 54.
10. Кобак В.О. Радиолокационные отражатели. М.: Сов. радио, 1975.
11. Леонтьев В.В. Феноменологическая теория рассеяния радиоволн морскими объектами. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2006.
12. Knott E.F. Radar cross section. Raleigh, NC: SciTech Publishing, 2004.  
<https://doi.org/10.1049/SBRA026E>
13. Штагер Е.А. // 17-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2007). Севастополь: Вебер, 2007. С. 9.
14. Капылов Е.Л., Неелов В.В., Самородов А.А., Самородов Б.А. // Вопросы радиоэлектроники. 2020. № 5. С. 17.  
<https://doi.org/10.21778/2218-5453-2020-5-17-27>
15. Леонтьев В.В. // Измерительная техника. 2002. № 11. С. 37.