

УДК 621.396.96

РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ НАВИГАЦИОННОЙ СУДОХОДНОЙ ОБСТАНОВКИ

Е. Л. Шошин

Сургутский государственный университет, shoshin6@mail.ru

В работе рассматриваются характеристики рассеяния и светового излучения радиооптических отражателей. Приведены результаты натурных испытаний радиооптических отражателей направленного и кругового действия. Описаны перспективные конструкции искусственных радиолокационных отражателей, обладающие поляризационно-анизотропными характеристиками и пригодные для развертывания в качестве навигационных знаков судоходной обстановки. Рассматривается техническая реализация поляриметра, способного осуществить селекцию радиолокационных объектов с использованием группы поляризационных параметров. Приведены примеры построения радиолокационного изображения реки и береговых навигационных знаков с использованием поляризационной обработки сигналов.

Ключевые слова: радиолокационный отражатель, поляризационные характеристики, матрица обратного рассеяния, поляриметр, навигационный знак.

RADAR METHODS FOR MONITORING NAVIGATIONAL ENVIRONMENT

E. L. Shoshin

Surgut State University, shoshin6@mail.ru

The characteristics of the scattering and light radiation of radio-optical reflectors are considered. The results of full-scale tests of radio-optical direct and spherical reflectors are presented. The advanced constructions of artificial radar reflectors with polarization-anisotropic characteristics, and that are suitable for deployment as navigating marks of the shipping environment are described. The technical implementation of a polarimeter capable of selecting radar objects using a group of polarization properties is considered. Examples of construction of radar images of a river and coastal navigating marks using polarization signal processing are given.

Keywords: radar reflector, polarization characteristics, inverse scattering matrix, polarimeter, navigating mark.

Безопасность речного судоходства зависит от факторов, связанных с используемым на борту судна навигационным оборудованием, квалификацией экипажа, сложившейся ограждающей и указательной судоходной обстановкой – плавучей (бакены, буи, вехи) и береговой (створные, перевальные, ходовые, весенние знаки). Как плавучая, так и береговая обстановка выставляется в зависимости от необходимости и сложности судового хода на том или ином участке реки, канала, водохранилища. Чтобы улучшить оптическую видимость речных буев и береговых навигационных знаков, их оснащают светоизлучающими приборами. Вместе с тем, наличие судового радиолокатора позволяет обнаруживать навигационные знаки в радиолокационном диапазоне длин волн. Современные судовые радиолокаторы такие, как «Река» производства НПФ «Микран», обладают высоким разрешением по азимуту (не хуже 1°), по дальности (не хуже 3 м), что позволяет обнаруживать малоразмерные объекты и осуществлять непрерывный мониторинг навигационной обстановки в различных метеорологических условиях (дождь, туман, снег). Использование искусственных радиолокационных отражателей в составе навигационных знаков актуально при осуществлении судоходства в условиях недостаточной видимости, а также при резком изменении береговой линии и русла реки, когда опасность для судна выйти из фарватера существенно возрастает.

В настоящее время в качестве искусственных радиолокационных отражателей используют биконические отражатели, трехгранные уголкового отражатели, линзы Лüneберга [1]. Биконические отражатели обладают круговой *индикатрисой обратного рассеяния* (ИОР) в азимутальной плоскости, что выгодно отличает их от других отражателей, вместе с тем их *эффективная поверхность рассеяния* (ЭПР) сильно зависит от направления прихода падающих электромагнитных волн в угломестной плоскости, что приводит к снижению вероятности обнаружения отражателя в условиях качки. Трехгранные уголкового отражатели демонстрируют направленный характер ИОР и имеют значительную ЭПР, что позволяет их использовать в составе береговых знаков, задающих транспортный коридор движения судов. В то же время невозможность визуального обнаружения экипажем судна уголкового отражателей в темное время суток ограничивает их практическое применение. Также применяют конструкции, составленные из трехгранных уголкового отражателей. Широкое распространение получил групповой радиолокационный отражатель в форме октаэдра, образованный из восьми трехгранных отражателей [1]. Такой групповой отражатель эффективно отражает радиолокационные сигналы, приходящие с произвольного азимутального направления. Волнение и сильный ветер оказывают слабое влияние на механизм обратного рассеяния падающих на групповой отражатель электромагнитных волн. Благодаря своим характеристикам, групповые уголкового отражатели применяют в составе плавучих бакенов, буюв и вех. Линзы Лüneберга имеют значительную ЭПР и круговую ИОР, но сложны в изготовлении и дорогостоящи, при рассеянии демонстрируют большое затухание в линзе и высокий уровень боковых лепестков ИОР. Все используемые в речной навигации радиолокационные отражатели обладают поляризационными характеристиками, позволяющими эффективно рассеивать излученные *судовой радиолокационной станцией* (РЛС) сигналы с линейной вертикальной поляризацией. В случае размещения искусственных отражателей в составе береговых знаков, характеристики их радиолокационного обнаружения будут зависеть не только от параметров отражателя, но и от расположенных вблизи местных объектов – зданий, деревьев, кустарников и др. Таким образом, к недостаткам применяемых в настоящее время в речном судоходстве радиолокационных методов контроля навигационной обстановки относятся:

- ограничения по визуальному обнаружению радиолокационных отражателей в темное время суток;
- ограничение по использованию поляризационной сигнатуры зондирующих сигналов;
- влияние расположенных вблизи местных предметов на характеристики радиолокационного обнаружения навигационных знаков.

Радиооптические отражатели. При судоходстве уголкового отражатели (далее – УО) используют для радиолокационного обозначения плавучих и береговых навигационных знаков. В 3-сантиметровом диапазоне длин волн для контроля за навигационной обстановкой применяются судовые лоаторы с мощностью излучения 5–10 кВт, длительностью зондирующего импульса 100–300 нс и приемно-передающими антеннами, имеющими веерную диаграмму направленности [2]. В темное время суток для обозначения навигационных знаков используются светосильные фонари, такие как ЭСПН-140, ЭСПН-90 и др., улучшающие оптическую видимость судового хода [3, 4]. Навигационные знаки часто покрывают светоотражающей пленкой, что в условиях недостаточной видимости, когда экипаж судна применяет прожекторное освещение, облегчает их визуальное обнаружение.

Комплексирование характеристик радиолокационного отражателя с функциями световых излучающих и светоотражающих приборов улучшает вероятностные характеристики обнаружения навигационных знаков в течение всего периода речной навигации.

Рассмотрим конструкции *радиооптических отражателей* (РОО). На рис. 1 представлен уголкового РОО направленного действия [5].

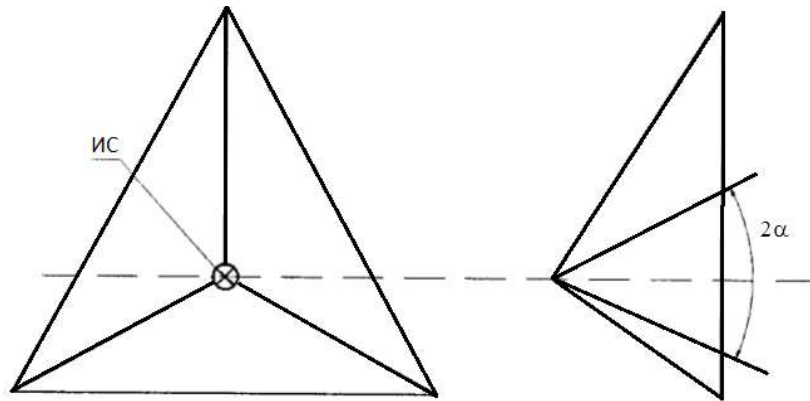


Рис. 1. Радиооптический уголкового отражатель направленного действия

В радиолокационном диапазоне длин волн ширина ИОР трехгранных УО в азимутальной и угломестной плоскостях составляет величину 42° [1]. ЭПР УО с треугольными гранями в направлении главного максимума равна [1, 6]:

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

где α – размер ребра;
 λ – длина волны.

Установленный в вершине УО в качестве *источника света* (ИС) светоизлучающий диод при помощи встроенной оптической линзы излучает конический световой пучок с угловой шириной $2\alpha \geq 90^\circ$. После трехкратного отражения от граней световой пучок приобретает ширину углового светорассеяния, равную ширине основного лепестка ИОР в радиолокационном диапазоне длин волн. В конструкции радиооптического УО направленного действия можно дополнительно предусмотреть наличие радиопрозрачного светоотражающего покрытия с белым, красным, зеленым или желтым цветами свечения [7]. В этом случае цвет излучения ИС будет соответствовать характеристикам светоотражающего покрытия граней. Технический результат заключается в обеспечении возможности подачи сигналов в пассивном режиме при освещении отражателя световым потоком судового прожектора и увеличении интенсивности свечения РОО в активном режиме при формировании диаграммы светоизлучения.

Другой перспективной конструкцией является групповой РОО кругового действия [8], приведенный на рис. 2, в состав которого входят восемь равных трехгранных радиолокационных уголкового отражателей, шесть из которых расположены вокруг вертикальной оси, проходящей через их общую вершину в угломестной плоскости. В вершинах установлены источники света в виде светоизлучающих диодов, формирующих круговую диаграмму светоизлучения. ИС питаются от источника постоянного тока и регулируются фотоавтоматом управления сигнальным огнем. Основной режим работы светоизлучающих диодов заключается в формировании проблескового огня.

С целью исследования эффективности применения РОО силами сотрудников производителя путевых работ Томского района водных путей и судоходства и Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники в период речной навигации 2013 г. на участке водного пути реки Томь протяженностью 6 км были проведены натурные испытания РОО направленного и кругового действия.

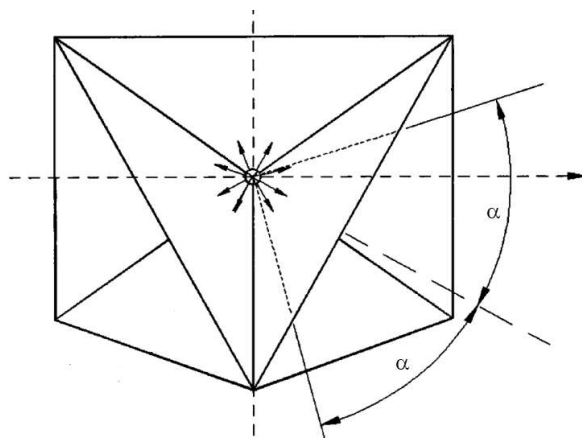
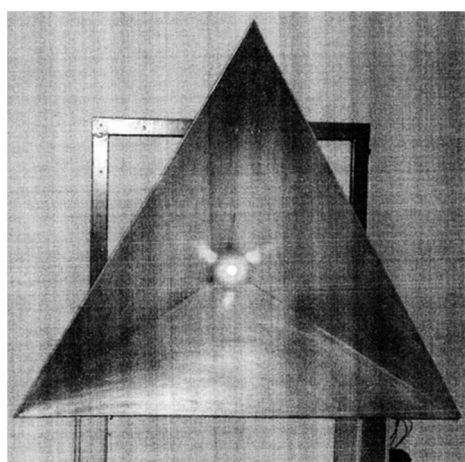


Рис. 2. Радиооптический групповой отражатель кругового действия



а



б

Рис. 3. Фотография радиооптического отражателя направленного действия:

а – в помещении; б – на испытаниях.

Для проведения испытаний был изготовлен образец РОО направленного действия, который представлен на рис. 3а. Характеристики РОО направленного действия в радиолокационном диапазоне длин волн:

- рабочая длина волны, см: 3,2;
- длина ребра отражателя, см: 53;
- эффективная площадь рассеяния, м²: 320;
- ширина индикатрисы обратного рассеяния в горизонтальной плоскости, град: 40;
- ширина индикатрисы обратного рассеяния в вертикальной плоскости, град: 40.

Характеристики РОО направленного действия в оптическом диапазоне длин волн:

- цвет сигнального огня: красный;
- ширина диаграммы светоизлучения в горизонтальной и вертикальной плоскости, град: 40;

- тип светоизлучающего диода: LED 001-W 01-C-0,25LM.

Характеристики светоизлучающего диода:

- длина волны, нм: 660;
- яркость свечения, кд: 4;
- диаметр вторичной линзы, мм: 22;
- угол свечения диода, град: 120;
- угол свечения диода с установленной вторичной линзой, град: 15.

РОО направленного действия испытывался в составе линейных створ, установленных на острове Чернильщикковский (рис. 3б): передний створ в форме деревянного щита высотой 6 м, задний створ в форме деревянного щита высотой 10 м, расстояние между ними 60 м. Оценка дальности оптической видимости линейных створ производилась в светлое время суток при движении теплохода с привязкой его местоположения к навигационной карте судовой обстановки при помощи системы ГЛОНАСС. Состояние прозрачности атмосферы на период испытаний составило 0,7–0,84. Оценка дальности видимости проблескового огня РОО производилась в темное время суток. Оценка радиолокационной дальности до РОО выполнялась судовым локатором Р722-2 со следующими техническими характеристиками: импульсная мощность – 6 кВт, длительность зондирующего импульса 200 нс, несущая частота – 9430 МГц, частота повторения импульса – 4 кГц, ширина диаграммы направленности $1,2^{\circ}$ в горизонтальной плоскости и 25° в вертикальной плоскости, высота расположения антенны над водной поверхностью – 12 м. Результаты испытаний приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Результаты испытаний радиооптических отражателей
направленного действия**

Исследуемый навигационный объект	Источник света	Радиолокационная дальность, м	Дальность оптической видимости, м	Дальность видимости проблескового огня, м
Линейный створ с РОО направленного действия	Светоизлучающий диод LED-011W-01C-0,25LM с углом свечения 120°	2	4–4,5	3,9–4,3
	Светоизлучающий диод LED-011W-01C-0,25LM с углом свечения 15°	2	4–4,5	>4,5
Линейный створ со светосильными фонарями ЭСПН-140 направленного действия	Полупроводниковая лампа ЛПРК02-2,5	–	4–4,5	3,8–4,2

Результаты испытаний показали большее значение дальности видимости проблескового огня (более 4,5 км) линейного створа, оборудованного РОО направленного действия, в сравнении с дальностью видимости проблескового огня (3,9–4,3 км) линейного створа, оборудованного типовым световым прибором ЭСПН-140 направленного действия. Дальность оптической видимости линейных створ в светлое время суток составила 4–4,5 км: полученный результат связан с размерами щитов линейного створа и состоянием прозрачности атмосферы. Радиолокационная дальность обнаружения линейного створа, оборудованного РОО направленного действия, составила 2 км при любом состоянии атмосферы, в то время как линейный створ, оборудованный ЭСПН-140, на фоне отражений от расположенных вблизи местных объектов судовым локатором не выделялся.

Использованный в испытаниях образец РОО кругового действия представлен на рис. 4а. Характеристики РОО кругового действия в радиолокационном диапазоне длин волн:

- рабочая длина волны, см: 3,2;
- количество трехгранных угловых отражателей в группе: 6;
- длина ребра одного отражателя, см: 30;
- эффективная площадь рассеяния одного отражателя, м^2 : 33;
- ширина индикатрисы обратного рассеяния в горизонтальной плоскости, град: 360;
- ширина индикатрисы обратного рассеяния в вертикальной плоскости, град: 40.

Характеристики РОО кругового действия в оптическом диапазоне длин волн:

- цвет сигнального огня: красный;
- ширина диаграммы светозлучения в горизонтальной плоскости, град: 360;

- ширина диаграммы светозлучения в вертикальной плоскости, град: 40;
- количество светозлучающих диодов: 6;
- тип светозлучающего диода: LED 001-W 01-C-0,25M.

Характеристики светозлучающего диода:

- длина волны, нм: 660;
- яркость свечения, кд: 2;
- диаметр вторичной линзы, мм: 22;
- угол свечения диода с установленной вторичной линзой, град: 15.



а



б

Рис. 4. Фотография радиооптического группового отражателя кругового действия:

а – в помещении; б – на испытаниях

РОО кругового действия испытывался в составе плавучего буйа № 34 (рис. 4б), расположенного на участке судового хода реки Томь между перекатами Нижний Иглаковский и Верхний Поросский, при этом высота размещения РОО относительно водной поверхности составила 1,9 м. При испытаниях теплоход двигался со скоростью 10–12 км/ч, фиксировалась температура, скорость ветра, влажность и прозрачность воздуха. Оценка дальности оптической видимости плавучего буйа производилась в светлое время суток с привязкой местоположения движущегося теплохода к навигационной карте судоходной обстановки. Дальность видимости проблескового огня РОО фиксировалась в темное время суток. Оценка радиолокационной дальности до РОО выполнялась судовым локатором Р722-2. Результаты испытаний приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты испытаний радиооптического группового отражателя
кругового действия

Исследуемый навигационный объект	Время суток	Радиолокационная дальность, м	Дальность оптической видимости, м	Дальность видимости проблескового огня, м
Плавучий буй с РОО кругового действия	светлое	750–800	2,2–2,4	–
	темное	750–800	–	1,9–2,1
Плавучий буй с РОО кругового действия и светоотражающими гранями	светлое	750–800	2,2–2,4	–
	темное	750–800	–	2,6–3,0
Плавучий буй со светосильным фонарем ЭСПН-90 кругового действия	светлое	480–500	2,2–2,4	–
	темное	480–500	–	2,0–2,2

Результаты испытаний показали большее значение дальности видимости проблескового огня (2,6–3,0 км) плавучего буйа, оборудованного РОО кругового действия со светоотражающими гранями, в сравнении с дальностью видимости проблескового огня (2,0–2,2 км) плавучего буйа, оборудованного типовым световым прибором ЭСПН-90 кругового действия. Радиолокационная дальность действия обнаружения буйа, оборудованного РОО кругового действия, составила 750–800 м при любом состоянии атмосферы, в то время как буй, оборудованный ЭСПН-900, судовым локатором обнаруживался на расстоянии 500 м.

Поляризационные характеристики радиолокационных объектов

При оценке поляризационных характеристик цели в радиолокации используют понятие *матрицы обратного рассеяния* (МОР):

$$\dot{S} = \begin{bmatrix} \dot{S}_{11} & \dot{S}_{12} \\ \dot{S}_{21} & \dot{S}_{22} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Для симметричных МОР конгруэнтное преобразование позволяет получить диагональную форму ее представления и ввести группу четко интерпретируемых параметров: ε – угол эллиптичности собственного базиса МОР, α – угол ориентации собственного базиса относительно измерительной системы координат, $\dot{\lambda}_1, \dot{\lambda}_2$ – собственные числа МОР [9]:

$$\dot{S} = \tilde{Q} \begin{bmatrix} \dot{\lambda}_1 & 0 \\ 0 & \dot{\lambda}_2 \end{bmatrix} Q, \quad (3)$$

где Q – унитарная матрица преобразования поляризационного базиса:

$$Q = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \varepsilon & j \cdot \sin \varepsilon \\ j \cdot \sin \varepsilon & \cos \varepsilon \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Разложение МОР невзаимной среды по ортогональной системе матриц Паули приводит к виду [9]:

$$\dot{S} = \tilde{Q} \cdot S_d^c \cdot Q + \dot{\Delta} \cdot \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где матрица S_d^c – симметрическая, характеризует взаимные свойства радиолокационного объекта и имеет вид:

$$S_d^c = \begin{bmatrix} \dot{S}_{11} & 0,5 \cdot (\dot{S}_{12} + \dot{S}_{21}) \\ 0,5 \cdot (\dot{S}_{12} + \dot{S}_{21}) & \dot{S}_{22} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

а слагаемое $\dot{\Delta} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}$ представляет собой антисимметричный оператор с весовым коэффициентом $\dot{\Delta}$, равным:

$$\dot{\Delta} = 0,5 \cdot (\dot{S}_{12} - \dot{S}_{21}). \quad (7)$$

Величина $\dot{\Delta}$ инвариантна к выбору поляризационного базиса МОР и обусловлена только невязимными свойствами среды [10].

Другим инвариантом МОР является полная эффективная поверхность рассеяния (ЭПР), определяемая как:

$$\sigma = |\dot{S}_{11}|^2 + |\dot{S}_{12}|^2 + |\dot{S}_{21}|^2 + |\dot{S}_{22}|^2. \quad (8)$$

Коэффициент невязимности может быть получен из (7) и (8):

$$|\xi|^2 = \frac{2|\dot{\Delta}|^2}{\sigma}. \quad (9)$$

С физической точки зрения величина $|\xi|^2$ несет информацию о соотношении ЭПР невязимной части радиолокационного объекта к ее полной ЭПР, что позволяет провести классификацию радиолокационных отражателей на:

- взаимные отражатели, для которых $|\xi|^2 = 0$;
- абсолютно невязимные отражатели, для которых $|\xi|^2 = 1$;
- частично-невязимные отражатели, для которых величина модуля коэффициента невязимности принадлежит интервалу $0 < |\xi|^2 < 1$.

Селекция радиолокационных навигационных знаков с использованием параметров λ_1 , λ_2 , ε , α , σ , $\dot{\Delta}$ и $|\xi|^2$ на фоне отражений от местных предметов создает условия для осуществления навигации судна по радиолокационной карте местности.

Искусственные радиолокационные отражатели с поляризационно-анизотропными характеристиками

Известно [6], что трехгранный УО, составленный из взаимно перпендикулярных металлических (или металлизированных) треугольных граней, является поляризационно-изотропным объектом, МОР которого имеет вид:

$$\dot{S} = \sqrt{\sigma} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где σ – полная ЭПР отражателя, определяемая его линейными размерами и длиной волны зондирующего сигнала. Такой УО эффективно отражает электромагнитные волны линейной поляризации. Поляризациями нулевого сигнала для такого УО выступает круговая правого и левого направления вращения [6].

Бакены, буи, местные предметы береговой линии в 3-сантиметровом диапазоне длин волн демонстрируют рассеивающие свойства, близкие к поляризационно-изотропным объектам, что создает дополнительные трудности при радиолокационном обнаружении УО. Придать трехгранному УО рассеивающие свойства поляризационно-анизотропных объектов можно, поместив поляризационный трансформатор в форме решетки в раскрыв отражателя [1]. В зависимости от вертикальной либо горизонтальной ориентации линейных проводников решетки МОР УО приобретает вид:

$$\dot{S} = \sqrt{\sigma} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

или

$$\dot{S} = \sqrt{\sigma} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Физически это означает, что УО, оборудованный поляризационным трансформатором, способен отражать электромагнитные волны, линейно-поляризованные в плоскости, ортогональной структуре проводников решетки. Поляризациями нулевого сигнала для такого УО будут электромагнитные волны, линейно-поляризованные в плоскости, согласованной со структурой проводников решетки. Благодаря таким свойствам УО, оборудованный поляризационной решеткой, можно обнаружить по результатам поляризационной обработки отраженных сигналов. На практике для этого применяют поляризационную модуляцию зондирующих сигналов [11]. В [12] приведены результаты натурных испытаний трехгранных УО, оборудованных поляризационными трансформаторами с шагом между проводниками 3–5 мм, которые свидетельствуют о достижении параметром фактора формы УО $\rho = |\lambda_1|/|\lambda_2|$ значений в интервале 17–19 дБ в 3-сантиметровом диапазоне длин волн.

Другой интересной конструкцией является система из двух трехгранных УО, фазовые центры которых разнесены в азимутальной плоскости на некоторое расстояние D (рис. 5).

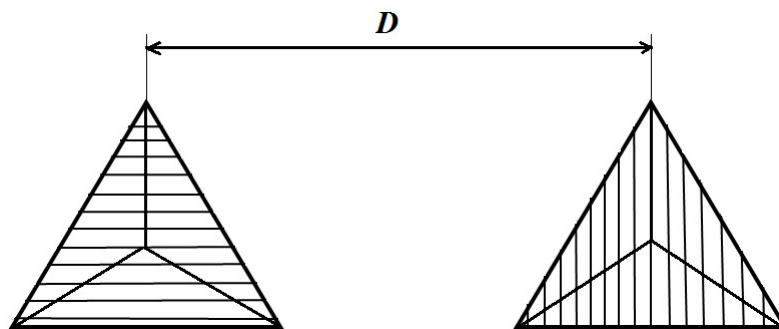


Рис. 5. Система из уголковых поляризационно-анизотропных отражателей

Каждый из УО оборудован поляризационным трансформатором в виде решетки, при этом ориентация одной решетки – горизонтальная, другой – вертикальная. МОР такой системы из двух трехгранных УО имеет вид:

$$\dot{S} = \sqrt{\sigma} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{j\Delta\varphi} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

где $\Delta\varphi$ – разность фаз собственных чисел λ_1 и λ_2 .

Благодаря возможности смещать фазовые центры путем произвольного размещения УО относительно друг друга с сохранением рабочего сектора углов обратного рассеяния, такой групповой отражатель демонстрирует способность его обнаружения и селекции на фоне мешающих отражений с использованием параметра $\Delta\varphi$. Приведенные в [12] результаты испытаний свидетельствуют, что два трехгранных УО с размером ребра 53 см, разнесенные

между собой на 1,5 м и оборудованные решетками вертикальной и горизонтальной ориентации с шагом между проводниками 5 мм, демонстрируют в 3-сантиметровом диапазоне длин волн достижение значения фактора формы $\rho = 0,5 \text{ дБ}$ и параметра $\Delta\varphi = 0^\circ \dots 180^\circ$ в угловом секторе обратного рассеяния $\pm 20^\circ$. Использование поляризационных параметров ρ и $\Delta\varphi$ улучшает характеристики обнаружения УО на фоне отражений от местных предметов [12].

Недостатком применения в качестве навигационных знаков УО является их принадлежность к радиолокационным объектам взаимного типа, что затрудняет их выделение на фоне отражений от водной поверхности, местных предметов, также относящихся к рассеивающим объектам взаимного типа. Использование невзаимных радиолокационных отражателей расширяет возможности по созданию навигационных знаков, обладающих поляризационно-анизотропными характеристиками обратного рассеяния и создающих значительный радиолокационный контраст при формировании навигационной карты судовой обстановки. Практическая реализация невзаимных характеристик обратного рассеяния предполагает использование в составе искусственных отражателей ферритовых СВЧ-приборов – намагниченных ферритовых стержней, Y-циркуляторов, вентилях и гираторов.

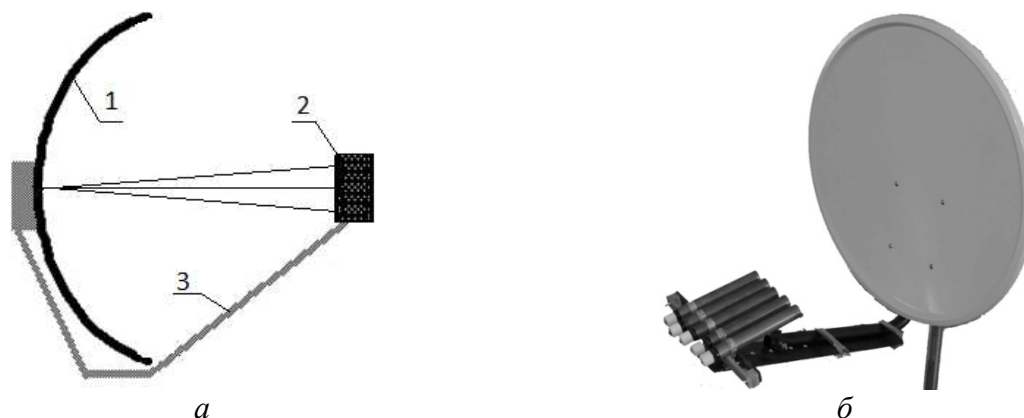


Рис. 6. Переизлучающая параболическая антенна:
а – чертеж; б – лабораторный образец

На рис. 6а приведена конструкция невзаимного радиолокационного отражателя (РО) в виде переизлучающей параболической антенны [13]. Такой отражатель пригоден для задания линейного створа реки. Переизлучающая антенна выполнена в виде параболоида вращения 1, в фокальной плоскости которого симметрично расположены короткозамкнутые облучатели 2, удерживаемые штангой 3. Фазовый центр одного из облучателей находится в фокусе параболоида, а остальные облучатели смещены в фокальной плоскости в направлениях, перпендикулярных оси параболоида. Облучатели представляют собой конические рупорные антенны с отрезками круглых закороченных волноводов с размещенными внутри продольными СВЧ-ферритовыми стержнями, степень намагниченности которых можно менять в широких пределах с помощью тока, протекающего через соленоидальный электромагнит.

Поляризационные характеристики рассматриваемой антенны-отражателя определяются свойствами облучателей. МОР короткозамкнутого облучателя с встроенным продольно-намагниченным ферритовым стержнем имеет вид [9]:

$$\dot{S} = \sqrt{\sigma} \begin{bmatrix} \cos(2\delta) & -\sin(2\delta) \\ \sin(2\delta) & \cos(2\delta) \end{bmatrix}, \quad (14)$$

где δ – угол поворота плоскости поляризации электромагнитной волны при ее прохождении ферритового стержня.

При регулировке замагниченного состояния ферритовых стержней угол δ изменяется в пределах $\delta = -90^\circ \dots 90^\circ$. Антенна-отражатель при этом приобретает свойства невзаимного отражателя, коэффициент невзаимности $|\xi|^2$ которого задается в пределах 0–1. При $|\xi|^2 = 1$ (соответствует углу поворота $\delta = -45^\circ, 45^\circ$) поляризацией нулевого приема выступает любая возможная, задаваемая пространством состояний сферы Пуанкаре [14]. Физически это означает, что антенна-отражатель формирует рассеянный сигнал с поляризацией, ортогональной поляризации падающего сигнала.

Эффективная апертура зеркальной параболической антенны определяется [15]:

$$S_g = \nu \pi d^2, \quad (15)$$

где ν – коэффициент использования апертуры;
 d – диаметр зеркала.

Коэффициент направленного действия (далее – КНД) зеркальной параболической антенны определяется [15]:

$$D_m = \frac{4 \pi S_g}{\lambda^2}. \quad (16)$$

ИОР рассматриваемой антенны-отражателя носит колебательный характер, связанный с формированием рассеянных сигналов для каждого из направлений падающих лучей своим короткозамкнутым облучателем. Угол наклона фокусируемых зеркалом электромагнитных волн в соседние близрасположенные облучатели отвечает условию:

$$\beta \leq 0,8 \Theta_{0,5} \quad (17)$$

где $\Theta_{0,5}$ – ширина ИОР антенны-отражателя с одним облучателем.

ИОР антенны-отражателя, в произвольном сечении фокальной плоскости которой расположены n (симметричных относительно оптической оси) облучателей, при облучении под углом θ определяется [14]:

$$\sigma(\theta) = S_g \cdot D_m \cdot \sum_{i=1}^n \Phi^4(\theta - ((n+1)/2 - i) \cdot \beta), \quad (18)$$

где $\Phi(\theta)$ – диаграмма направленности приемной параболической антенны с размещенным в фокусе облучателем.

Ширина главного лепестка ИОР $\Delta \Theta_{0,5}$ зависит от количества короткозамкнутых облучателей в фокальной плоскости:

$$\Delta \Theta_{0,5} \approx \beta n \quad (19)$$

Лабораторный образец антенны-отражателя с диаметром зеркала 76 см (рис. 6 б) демонстрирует параметры, рассчитанные согласно (15–19) для 3-сантиметрового диапазона длин волн:

- эффективная апертура при использовании с коэффициентом 0,6, м²: 1,09;
- КНД, дБ: 41,8;

- ЭПР в направлении главного максимума, м^2 : 16 590;
- ширина главного лепестка ИОР, град: 15.

На рис. 7 приведена нормированная ИОР, рассчитанная для лабораторного образца антенны-отражателя с количеством облучателей в сечении фокальной плоскости $n = 7$ и углом наклона $\beta = 0,75\Theta_{0,5}$.

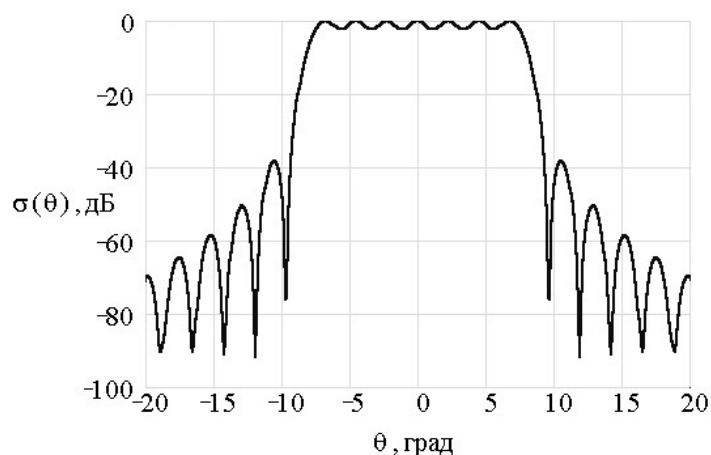


Рис. 7. Нормированная индикатриса обратного рассеяния

При практическом изготовлении конструкции параболической антенны-отражателя необходимо выполнить согласование облучателей с волновым сопротивлением окружающей среды и принять меры симметрирования диаграммы обратного рассеяния в Е и Н-плоскостях [6].

Еще одной перспективной конструкцией невзаимного радиолокационного отражателя является переизлучающая линейная или плоская решетка Ван-Атта (рис. 8), состоящая из парно соединенных с помощью волноводов конических рупорных антенн [16]. Такой отражатель пригоден для задания линейного створа реки. С целью придания решетке Ван-Атта невзаимных на прием и передачу свойств в волноводном тракте 2, присоединенном к рупорной антенне 1, расположено устройство преобразования поляризационного состояния проходящих электромагнитных волн 3, в состав которого включены взаимный и невзаимный элементы одновременно. Функцию невзаимного элемента выполняет фарадеевский вращатель, осуществляющий поворот плоскости поляризации на угол δ , а функцию взаимного элемента выполняет фазовая пластина, ориентированная под углом α и вносящая фазовую задержку φ пропускаемых электромагнитных волн.

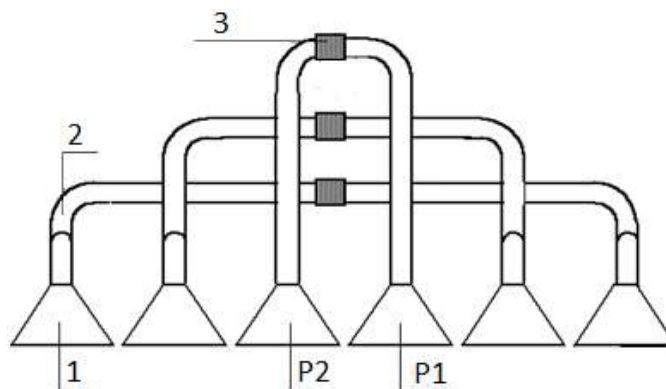


Рис. 8. Переизлучающая решетка Ван-Атта

МОР такой решетки Ван-Атта носит несимметричный вид, а реализуемый при этом коэффициент невязности определяется выражением [17]:

$$|\xi|^2 = \frac{\sin(\delta)(\cos^2(\alpha) - \sin^2(\alpha))^2(1 - \cos \varphi)}{2(\cos^2(\alpha) - \sin^2(\alpha))^2 + (\sin(\delta) - 4\cos^2(\alpha)\sin^2(\alpha))(1 - \cos \varphi)}. \quad (20)$$

Из (20) следует, что невязные свойства переизлучающей решетки определяются параметрами δ , α и φ . На рис. 9 показана зависимость $|\xi|^2$ от α для одной из пар рупорных антенн P1 и P2, связанных соединительным трактом, в состав которого включена четвертьволновая фазовая пластина ($\varphi=90^\circ$) и замагниченный ферритовый стержень, осуществляющий поворот плоскости поляризации пропускаемых электромагнитных волн (1. $\delta=30^\circ$, 2. $\delta=45^\circ$, 3. $\delta=60^\circ$, 4. $\delta=75^\circ$). В случае $\delta=90^\circ$ связанные рупорные антенны P1 и P2 демонстрируют характеристики рассеяния абсолютно невязного радиолокационного объекта: $|\xi|^2=1$.

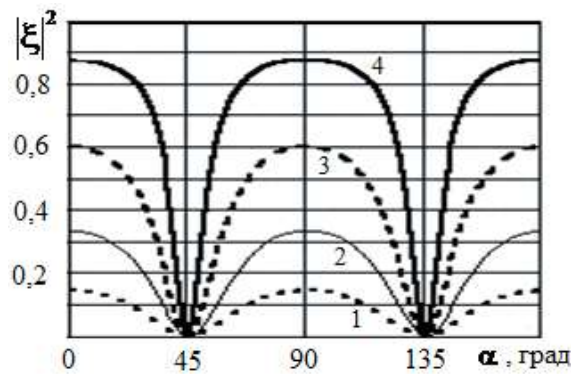


Рис. 9. Зависимость коэффициента невязности связанных рупорных антенн решетки Ван-Атта от угла ориентации четвертьволновой фазовой пластины

Эффективная апертура приемной рупорной антенны P1 определяется согласно (15). КНД излучающей конусной рупорной антенны P2 с оптимальным раскрывом определяется [15]:

$$D_m = 5 \cdot \left(\frac{2a}{\lambda} \right)^2, \quad (21)$$

где a — диаметр рупора.

ЭПР одной из связанных пар рупорных антенн в пределах главного лепестка ИОР равна:

$$\sigma_1 = S_g \cdot D_m. \quad (22)$$

ЭПР решетки Ван-Атта определяется общим количеством пар рупорных антенн N :

$$\sigma_m = N \cdot \sigma_1. \quad (23)$$

Ширина ИОР переизлучающей решетки Ван-Атта по уровню половинной мощности равна:

$$\Theta_{0,5} = 42,5^\circ \cdot \frac{\lambda}{2a}. \quad (24)$$

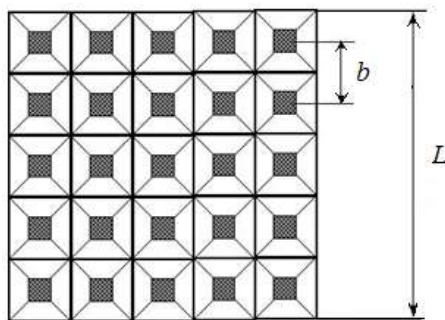
В табл. 3 приведены рассчитанные в соответствии с (21–23) значения ЭПР линейной решетки, состоящей из различного количества пар рупоров N , с диаметром рупора $a = 4,8$ см при работе в 3-сантиметровом диапазоне длин волн. При этом ширина ИОР по уровню половинной мощности в соответствии с (24) составляет $\Theta_{0,5} = 15^\circ$.

Таблица 3

Значения эффективной поверхности рассеяния линейной решетки Ван-Атта

N	3	5	10	30	100
$\sigma_m, \text{м}^2$	6.76	18.8	75.1	676	7510

Невзаимные радиолокационные отражатели, построенные из одной или нескольких переизлучающих рупорных антенн, не обладают ЭПР, достаточной для их эффективного обнаружения на фоне мешающих отражений. Для достижения требуемых энергетических характеристик рассеяния целесообразно использовать линейную или плоскую решетку из антенных элементов. На рис. 10 приведена плоская решетка, составленная из переизлучающих антенных элементов невзаимного рассеяния сигналов.

**Рис. 10. Переизлучающая плоская решетка**

КНД переизлучающей решетки определяется соотношением [17]:

$$D_m = S_g \cdot N \cdot \frac{4\pi}{\lambda^2}, \quad (25)$$

где $N = \left(\frac{L}{b}\right)^2$ – количество элементов решетки;

S_g – эффективная апертура решетки, зависящая от угла облучения θ :

$$S_g = \nu L^2 \cos \theta. \quad (26)$$

ЭПР переизлучающей решетки в направлении главного максимума определяется:

$$\sigma_m = S_g \cdot D_m. \quad (27)$$

Выбор достаточно большого числа переизлучающих антенных элементов позволяет реализовать высокий КНД решетки и, как следствие, достигнуть значительную ЭПР. С тем,

чтобы получить относительно широкий основной лепесток ИОР решетки, необходимо выполнить условие внесения дополнительного фазового сдвига, возникающего при обратном рассеянии от любой пары примыкающих друг к другу элементов решетки [18]:

$$\Psi_{\text{доп}} = \frac{4\pi b}{\lambda} \cdot \quad (28)$$

Данное условие можно реализовать, выбирая различную электрическую длину волноводных трактов, которая для соседней пары элементов решетки составляет $\lambda_g/8$ (λ_g - длина волны в волноводе). При этом, каждый из переизлучающих элементов обладает невзаимными свойствами, которыми, в свою очередь, наделяется решетка.

Рассмотрим выбор конструкций переизлучающих элементов решетки:

1. Переизлучающая пирамидальная рупорная антенна с продольно намагниченным ферритом [14] приведена на рис. 11.

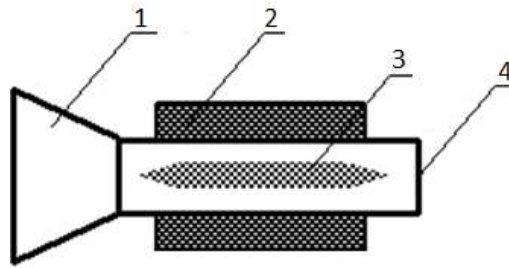


Рис. 11. Переизлучающая пирамидальная рупорная антенна

Переизлучающая антенна выполнена в виде пирамидального рупора 1 с раскрывом в форме квадрата и соединенного с ним отрезка закороченного квадратного волновода 4 с находящимся внутри СВЧ ферритовым продольным стержнем 3, степень намагниченности которого можно менять в широких пределах, изменяя ток через соленоидальную катушку 2. МОР переизлучающей антенны имеет вид (14). Антенна-отражатель выполняет поляризационное преобразование, заключающееся в повороте плоскости поляризации падающей электромагнитной волны на угол 2δ с последующим переизлучением в обратном направлении сигнала с такой же плотностью потока мощности, какую имеет падающая электромагнитная волна. При $\delta = 45^\circ$ антенна-отражатель обладает свойствами абсолютно-невзаимного рассеяния.

Эффективная апертура рупора равна [15]:

$$S_s = \nu b^2, \quad (29)$$

где ν - коэффициент использования апертуры;

b - размер стенки раскрыва рупора.

КНД рупора в направлении основной передачи равен:

$$D_m = \frac{2\pi b^2}{\lambda^2} \cdot \quad (30)$$

ЭПР отражателя в пределах основного лепестка ИОР равна:

$$\sigma_m = S_s \cdot D_m \cdot \quad (31)$$

Ширина основного лепестка ИОР равна:

$$\Delta\Theta_{0,5} = 48^\circ \frac{\lambda}{b} . \quad (32)$$

Численные расчеты показывают, что пирамидальная рупорная антенна с раскрывом в форме квадрата шириной 6 см в 3-сантиметровом диапазоне длин обладает параметрами, рассчитанными согласно (29–32):

- эффективная апертура при использовании с коэффициентом 0.81, м²: 0.00292;
- КНД, у.е.: 25;
- ЭПР в направлении главного максимума, м²: 0.071;
- ширина главного лепестка ИОР, град: 24.

2. Переизлучающая пирамидальная рупорная антенна с ферритовым вентилем [19] приведена на рис. 12.

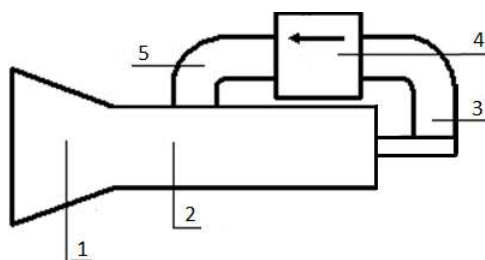


Рис. 12. Переизлучающая пирамидальная рупорная антенна

В конструкцию переизлучающей рупорной антенны входит пирамидальный рупор 1 с раскрывом в форме квадрата, конструктивно объединенный с поляризационным преобразователем, представляющим собой отрезок квадратного волновода 2 с двумя встроенными волноводами 3 и 5, при этом в прямоугольном волноводе 5 выделяется линейная горизонтально поляризованная электромагнитная волна, а в прямоугольном волноводе 3 выделяется линейная вертикально поляризованная электромагнитная волна; волноводы 3 и 5 соединяются друг с другом с помощью прямоугольного волноводного тракта со скруткой на 90°, в состав которого включен ферритовый резонансный вентиль 4.

В случае идеального ферритового вентиля МОР переизлучающей рупорной антенны соответствует виду:

$$\dot{S} = \sqrt{\sigma} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} . \quad (33)$$

Переизлучающая антенна подвергает поляризационному преобразованию падающую электромагнитную волну, заключающемуся в поглощении горизонтально поляризованной компоненты падающей электромагнитной волны и преобразовании вертикально поляризованной компоненты падающей электромагнитной волны в ортогонально поляризованную с последующим переизлучением сигнала в обратном направлении. Плотность потока мощности обратно рассеянного сигнала оказывается меньше плотности потока мощности падающей электромагнитной волны. Эффективная апертура, КНД, ЭПР и ширина ИОР переизлучающей антенны определяется согласно (29–32).

3. Переизлучающая пирамидальная рупорная антенна с фазовращателем [20], приведена на рис. 13.

В конструкцию переизлучающей рупорной антенны входит пирамидальный рупор 1 с раскрывом в форме квадрата, конструктивно объединенный с поляризационным преобразователем, представляющим собой отрезок квадратного волновода 2 с двумя встроенными волноводами 3 и 5, при этом в прямоугольном волноводе 5 выделяется линейная горизонтально поляризованная электромагнитная волна, а в прямоугольном волноводе 3 выделяется линейная

вертикально поляризованная электромагнитная волна; волноводы 3 и 5 соединяются друг с другом с помощью прямоугольного волноводного тракта со скруткой на 90° , в состав которого включен фазовращатель 4.

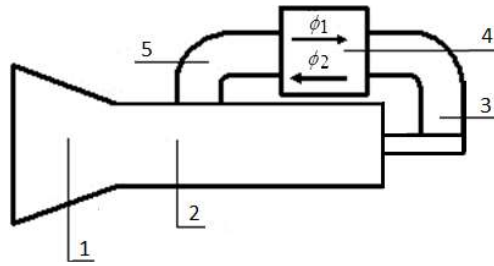


Рис. 13. Переизлучающая пирамидальная рупорная антенна

В случае идеального фазовращателя ($\phi_1 = \pi$, $\phi_2 = 0$) МОР переизлучающей рупорной антенны соответствует виду:

$$\dot{S} = \sqrt{\sigma} \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (34)$$

Переизлучающая антенна подвергает поляризационному преобразованию падающую электромагнитную волну, поляризация которой при этом меняется на ортогональную с последующим переизлучением сигнала в обратном направлении. Плотность потока мощности обратно переизлученного сигнала оказывается равной плотности потока мощности падающей электромагнитной волны. Эффективная апертура, КНД, ЭПР и ширина ИОР переизлучающей рупорной антенны определяется согласно (29–32).

Рассмотренные конструкции переизлучающих рупорных антенн могут быть использованы в составе переизлучающей решетки (рис. 10). Численные расчеты показывают, что плоская решетка в форме квадрата шириной 60 см, состоящая из рупорных пирамидальных переизлучающих антенн с раскрывом в форме квадрата шириной 6 см, в 3-сантиметровом диапазоне длин обладает параметрами, рассчитанными согласно (25–27):

- количество антенных элементов: 100;
- КНД, дБ: 50;
- ЭПР в направлении главного максимума, м^2 : 29 720;
- ширина главного лепестка ИОР, град: 15,2.

Относительно широкая ИОР и значительная ЭПР переизлучающей решетки позволяют ее использовать в качестве маркерного навигационного знака.

Формирование радиолокационных изображений реки и судоходных навигационных знаков с использованием поляризационной обработки сигналов

Для измерения поляризационных параметров отраженных сигналов и реализации селекции объектов, обладающих требуемыми характеристиками обратного рассеяния, применяют радиолокационные поляриметры [21]. Радиолокационный контроль за судоходной обстановкой при помощи поляриметра оправдан в случаях использования поляризационно-анизотропных искусственных отражателей в составе навигационных знаков. Поляриметры при формировании и обработке сигналов выполняют операцию их разложения на ортогональные составляющие электромагнитных волн. Для этого в состав поляриметра вводят векторный формирователь излученных сигналов и многоканальный приемник, способный с помощью поляризационного расщепителя выделять ортогонально-поляризованные сигнальные компоненты и измерять их амплитудные и фазовые значения.

Рассмотрим техническую реализацию поляриметра, способного к «мгновенному» измерению значений элементов МОР и селекции радиолокационного объекта по поляризационным признакам. На рис. 14 приведена структурная схема устройства селекции целей с невязными свойствами обратного рассеяния радиоволн [22].

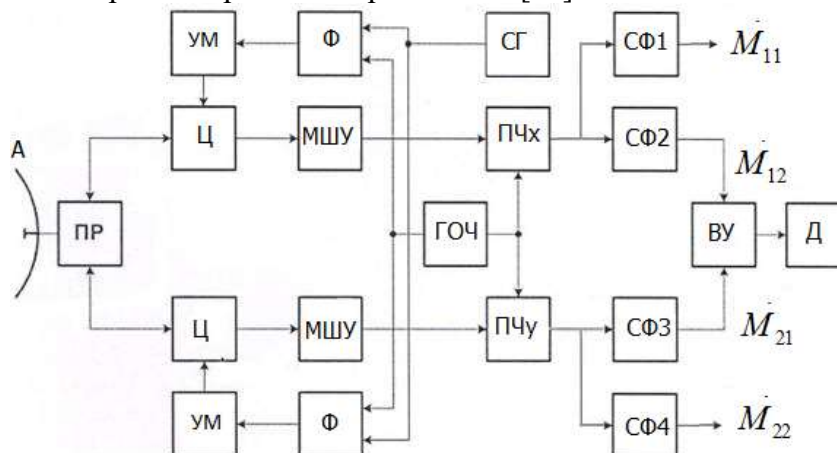


Рис. 14. Устройство селекции радиолокационных объектов по поляризационным признакам:

А – прямо-передающая антенна полного поляризационного приема-передачи сигнала;

ПР – поляризационный разделитель; Ц – циркуляторы; УМ – усилители мощности;

ГОЧ – генератор опорных частот; Ф – формирователи сложных сигналов; МШУ – малошумящие усилители; ПЧх,

ПЧу – преобразователи частоты; СФ1,2,3,4 – согласованные фильтры; ВУ – вычитающее устройство;

Д – детектор огибающей радиосигнала; СГ – синхронизирующий генератор

Устройство работает следующим образом. Формирователи сложных сигналов по запускающему сигналу синхронизирующего генератора формируют на несущей частоте ω_0 два ортогонально поляризованных радиосигнала $\dot{S}_1(t)$ и $\dot{S}_2(t)$, когерентно связанные по времени и частоте (такие, например, как ортогональные линейно частотно-модулированные сигналы). Выходные сигналы формирователей сложных сигналов усиливаются усилителями мощности и возбуждают ортогональные плечи поляризационного разделителя. При этом в пространство излучается электромагнитная волна, описываемая как вектор:

$$e_0(t) = \begin{pmatrix} \dot{S}_1(t) \\ \dot{S}_2(t) \end{pmatrix}. \quad (35)$$

Прием отраженной волны осуществляется антенной в поляризационном базисе облучения:

$$e_p(t) = \begin{pmatrix} \dot{S}_{p1}(t) \\ \dot{S}_{p2}(t) \end{pmatrix}. \quad (36)$$

Поляризационным разделителем выделяются два ортогональных сигнала $\dot{S}_{p1}(t)$ и $\dot{S}_{p2}(t)$, которые через циркуляторы поступают последовательно в МШУ и преобразователи частоты ПЧх и ПЧу, на выходе которых формируются радиосигналы промежуточной частоты:

$$\left. \begin{aligned} S_{P1}^{ПЧ}(t) &= \dot{k} \cdot \dot{S}_{P1}(t) \cdot e^{-j(\omega_0 + \omega_{ПЧ}) \cdot t} \\ S_{P2}^{ПЧ}(t) &= \dot{k} \cdot \dot{S}_{P2}(t) \cdot e^{-j(\omega_0 + \omega_{ПЧ}) \cdot t} \end{aligned} \right\}, \quad (37)$$

где $\omega_{\Gamma} = \omega_0 + \omega_{ПЧ}$ – частота сигнала гетеродина, вырабатываемого генератором опорных частот; $\dot{k}$ – коэффициент передачи сигналов $\dot{S}_{P1}(t)$ и $\dot{S}_{P2}(t)$ с выходов поляризационного разделителя антенны на входы согласованных фильтров.

При этом фильтр СФ₂ согласован с сигналом $\dot{S}_1(t)$, а фильтр СФ₃ согласован с сигналом $\dot{S}_2(t)$. На выходе согласованных фильтров СФ₂ и СФ₃ формируются выходные радиосигналы $\dot{U}_2$ и $\dot{U}_3$, определяемые значениями внедиагональных элементов матрицы взаимной когерентности излученного $e_0(t)$ и рассеянного $e_p(t)$ сигналов ($\dot{M}_{12}$ и $\dot{M}_{21}$ соответственно), которые в момент времени $t = \tau_i$ с точностью до модуля и фазы пропорциональны значениям внедиагональных элементов МОР объекта, находящегося в i -ом строке дальности:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_2(\tau_i) &= \dot{M}_{12}^i \sim \dot{S}_{12}^i \\ \dot{U}_3(\tau_i) &= \dot{M}_{21}^i \sim \dot{S}_{21}^i \end{aligned} \right\}. \quad (38)$$

Сигналы $\dot{U}_2$ и $\dot{U}_3$ поступают в вычитающее устройство, последовательно соединенное с детектором, на выходе которого формируется сигнал:

$$\Delta U = |\dot{U}_2 - \dot{U}_3|. \quad (39)$$

Отличие выходного сигнала от нуля представляет собой признак наличия рассеивающего объекта с невязимыми свойствами. В результате устройством селекции формируются сигналы, пропорциональные параметру ΔU , в форме развертки по дальности. При круговом сканировании антенной поляриметра и реализации в каждом из азимутальном направлений развертки отраженных сигналов по дальности формируется радиолокационное изображение с использованием поляризационного параметра $|\dot{\Delta}|$. В случае реализации речных и береговых навигационных знаков в виде невязимых отражателей на радиолокационной карте местности будут присутствовать их отметки.

Заметим, что благодаря измерению элементов МОР радиолокационных объектов, рассмотренное выше устройство позволяет выделять объекты, используя не только параметр $|\dot{\Delta}|$, но и любой другой параметр, входящий в группу $\dot{\lambda}_1, \dot{\lambda}_2, \varepsilon, \alpha, \sigma, \dot{\Delta}$ и $|\dot{\xi}|^2$. Для этого достаточно измеренные значения элементов МОР объекта пересчитать в требуемый параметр или группу параметров, используя соотношения (3–9). Техническая реализация устройства, реализующего селекцию объектов с расширенной группой поляризационных параметров, требует дополнительного введения в состав поляриметра согласованных фильтров СФ₁ и СФ₄, при этом, фильтр СФ₁ будет согласован с сигналом $\dot{S}_2(t)$, а фильтр СФ₄ будет согласован с сигналом $\dot{S}_1(t)$. На выходе согласованных фильтров СФ₁ и СФ₄ будут сформированы выходные радиосигналы $\dot{U}_1$ и $\dot{U}_4$, которые в момент времени $t = \tau_i$ с точностью до модуля и фазы будут

пропорциональны значениям элементов главной диагонали МОР объекта, находящегося в i -ом строке дальности:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1(\tau_i) &= \dot{M}_{11}^i \sim \dot{S}_{11}^i \\ \dot{U}_4(\tau_i) &= \dot{M}_{22}^i \sim \dot{S}_{22}^i \end{aligned} \right\}. \quad (40)$$

Расширенные функциональные возможности работы поляриметра создают основу для проведения контроля за навигационной судоходной обстановкой с использованием широкого класса радиолокационных отражателей взаимного и невзаимного типа рассеяния.

На рис. 15 в качестве примера приведены радиолокационные изображения береговой зоны водного бассейна, включающей в себя остров, разделяющий реку на два рукава и два противоположных берега. На острове оборудованы передний и задний створные знаки, в состав которых входят невзаимные искусственные отражатели, задающие линию судового хода. Расстояние между створными знаками – 60 м. Радиолокационные изображения получены поляриметром в обзорном режиме работы при проведении измерений уровней отраженных сигналов, связанных со значениями $|\dot{S}_{11}|$ (рис. 15а) и $|\dot{S}_{12}|$ (рис. 15б). Оба изображения демонстрируют фрагментарный характер береговых линий, что обусловлено зависимостью элементов МОР от выбора поляризационного измерительного базиса радиолокационной системы. Присутствующие в изображении на рис. 15б отметки от невзаимных отражателей не обладают радиолокационным контрастом, необходимым для их уверенного выделения на фоне отражений от местных объектов.



Рис. 15. Радиолокационные изображения:

a – с использованием параметра $|\dot{S}_{11}|$; b – с использованием параметра $|\dot{S}_{12}|$



Рис. 16. Радиолокационные изображения:

a – с использованием параметра σ ; b – с использованием параметра $|\Delta|$

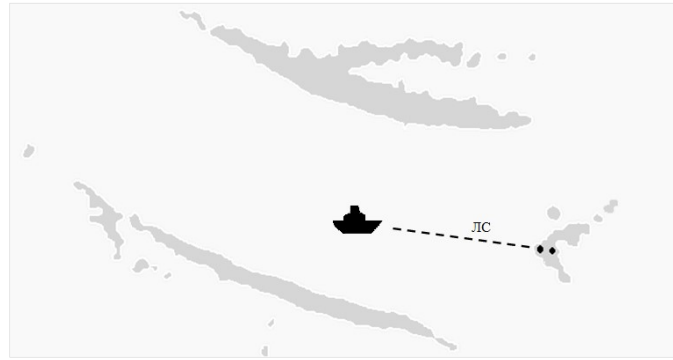


Рис. 17. Реконструкция радиолокационной карты реки и береговой зоны

На рис. 16а приведено радиолокационное изображение, полученное поляриметром в режиме измерения в каждом пикселе полной ЭПР σ матрицы S_d^C , характеризующей рассеивающие объекты взаимного типа. В полученном изображении береговых линий в виде сплошных образований исключено влияние поляризационного базиса радиолокатора на формирование яркостных отметок точечных целей. При этом в изображении на рис. 16а отсутствуют отметки от невзаимных отражателей. На рис. 16б приведено радиолокационное изображение, полученное поляриметром в режиме селекции объектов с использованием параметра $|\Delta|$ матрицы S . На изображении присутствуют точечные отметки от невзаимных отражателей и отсутствуют отражения от местных предметов. На рис. 17 представлена реконструкция карты судового хода реки с выделением береговых линий и навигационных знаков, определяющих *линейный створ* (ЛС) транспортного коридора.

Литература

1. Кобак В. О. Радиолокационные отражатели. М. : Совет. радио, 1975. 248 с.
2. Дуров А. А., Кан В. С., Ничипоренко Н. Т., Устинов Ю. М. Судовая радиолокация. Судовые радиолокационные системы и САРП : учеб. для вузов. 2-е изд., перераб. и испр. Петропавловск-Камчатский : КамчатГТУ, 2005. 280 с.
3. Шмерлинг И. Е. Монтер судоводной обстановки. М. : Транспорт, 1977. 173 с.
4. Шмерлинг И. Е., Белова Л. Т. Инструкция по содержанию судоводной обстановки на внутренних водных путях. М. : Транспорт, 1974. 160 с.
5. Пат. 2572795 Российской Федерации Ф 7 Н 01 Q 15/00. Навигационный радиооптический уголкового отражатель направленного действия / Гулько В. Л. / ФГОУ ВПО «Томск. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники»; заявл. 01.09.2014; опубл. 20.01.2016. Бюл. № 2.
6. Канарейкин Д. Б., Потехин В. А., Шишкин И. Ф. Морская поляриметрия. Л. : Судостроение, 1968. 328 с.
7. Пат. 2634550 Рос. Федерации Н 01 Q 15/18, B63B 22/02. Навигационный радиооптический уголкового отражатель направленного действия со светоотражающими гранями / Гулько В. Л., Блинковский Н. П., Мещеряков А. А. / ФГОУ ВПО «Томск. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники»; заявл. 15.04.2016; опубл. 31.10.2017. Бюл. № 31.
8. Пат. 2617799 Рос. Федерации Н 01 Q 15/18, B63B 22/16, G01S 1/70. Навигационный радиооптический групповой отражатель кругового действия со светоотражающими гранями / Блинковский Н. К., Гулько В. Л., Крутиков М. В., Мещеряков А. А. / ФГОУ ВПО «Томск. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники»; заявл. 29.10.2015; опубл. 26.04.2017, Бюл. № 12.

9. Хлусов В. А., Лигхарт Л. П., Шарыгин Г. С., Воробьев П. В. Поляризационные аспекты механизма обратного рассеяния электромагнитных волн частично-невзаимными средами (Теория. Экспериментальное моделирование) // СИБПОЛ – 2002: сибир. поляризацион. Семинара : сб. докл. Томск, 2002. С. 22–31.
10. Хлусов В. А. Параметризация матрицы обратного рассеяния невзаимных сред // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. № 10. С. 1441–1445 с.
11. А. с. 1309758 СССР, М. кл. G01S. Способ измерения коэффициента анизотропии радиолокационной цели / Хлусов В. А., Карнышев В. И., Татаринцов В. Н., Масалов Е. В., Потехин В. А., Деревянченко С. С., Рудман Э. А. 1987.
12. Бадулин Н. Н., Былина В. В., Гулько В. Л., Петров А. Ф., Соколов К. Г., Шошин Е. Л. Обнаружение искусственных радиолокационных целей по поляризационным признакам на фоне подстилающей поверхности // Изв. вузов СССР. Радиоэлектроника. 1991. № 8. С. 29–32.
13. Пат. 2225059 Рос. Федерации Н 01 Q 19/17. Радиолокационный отражатель / Шошин Е. Л., Суханюк А. М., Рыжаков В. В. / СурГУ; заявл. 13.05.2002; опубл. 27.02.2004. Бюл. № 6.
14. Шошин Е. Л., Кузьмичев В. Д. Характеристики рассеяния невзаимных искусственных радиолокационных отражателей // Радиолокация, навигация, связь : материалы VIII междунар. научн.-техн. конф. Воронеж, 2002. Т. 3. С. 1636–1647.
15. Белоцерковский Г. Б. Основы радиотехники и антенны. Ч. 2. Антенны. М. : Радио и связь, 1983.
16. Пат. 34258 РФ Рос. Федерации G 01 S 13/95 Радиолокационный отражатель / Шошин Е. Л., Суханюк А. М. / СурГУ; заявл. 02.07.2003; опубл. 27.11.2003. Бюл. № 33.
17. Антенны и устройства СВЧ. Проектирование фазированных антенных решеток : учеб. пособие для вузов / под ред. Д. И. Воскресенского. М. : Радио и связь, 1981.
18. Шошин Е. Л., Суханюк А. М. Применение ферритовых СВЧ-приборов в конструкциях искусственных радиолокационных отражателей // Радиолокация, навигация, связь : материалы IX Междунар. научн.-техн. конф. Воронеж, 2003. Т. 3. С. 1745–1755.
19. Пат. 36533 Рос. Федерации G 01 S 13/95. Радиолокационный отражатель / Шошин Е. Л., Суханюк А. М., Суханюк А. М. / СурГУ; заявл. 05.11.2003; опубл. 10.03.2004. Бюл. № 7.
20. Пат. 36532 Рос. Федерации G 01 S 13/95. Радиолокационный отражатель / Шошин Е. Л., Суханюк А. М., Суханюк А. М. / СурГУ; заявл. 05.11.2003, опубл. 10.03.2004. Бюл. № 7.
21. Татаринцов В. Н., Татаринцов С. В., Лигтхарт Л. П. Введение в современную теорию поляризации радиолокационных сигналов. Поляризация плоских электромагнитных волн и ее преобразования : моногр. Т. 1. Томск : Изд-во ТГУ, 2006. 380 с.
22. Пат. 2413185 Рос. Федерации G01G 13/02. Способ селекции невзаимных радиолокационных объектов и устройство для его реализации / Бутко В. А., Доценко В. В., Гюнтер В. Я., Носов Д. М., Осипов М. В., Ровкин М. Е., Сурков А. С., Хлусов В. А. / ЗАО «Научно-производственная фирма Микран»; заявл. 27.08.2009; опубл. 27.02.2011. Бюл. № 6.