

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.9.3>

УДК: 520.874.3:656.61.052

НАВИГАЦИОННАЯ РАДИОФОТОННАЯ РЛС ДЛЯ ПОРТОВ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ

Н.К. Галкин, Н.А. Голов

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5

Статья поступила в редакцию 7 июля 2022 г.

Аннотация. В данной работе приведен обзор ключевых элементов радиолокационных станций (РЛС) построенных на основе радиофотоники (РФ). Исследованы технические решения, существующие в настоящий момент на рынке по всем ключевым узлам РФ РЛС. Исследована возможность перехода от традиционных РЛС к радиофотонным и обоснованы преимущества подобного перехода. Предложена схема построения сверхширокополосной двухдиапазонной РЛС для навигации морских судов в арктической зоне (АЗ) на основе элементов радиофотоники. Оценены потенциальные ТТХ системы, с учетом работы в сложных климатических условиях, проведен сравнительный анализ с существующими РЛС. Моделирование показало, что возможно повышение дальности обнаружения и разрешающей способности по дальности, а также повышение помехоустойчивости, что позволит повысить качество навигационного обеспечения судовождения.

Ключевые слова: радиофотоника, радиолокационная станция, фотонный аналого-цифровой преобразователь, сверхширокополосный сигнал, навигация, арктическая зона.

Автор для переписки: Галкин Никита Константинович,
selenium322@gmail.com

Введение

В связи с ростом объемов освоения шельфа нефте- и газодобычи, увеличения интенсивности движения судов в АЗ, развитием автономных морских судов и необходимостью контроля критических зон для обеспечения безопасного судовождения к характеристикам навигационным РЛС предъявляются все более высокие требования.

Одним из важнейших направлений исследований и разработок является развитие систем управления движением судов, которые обеспечивают навигацию и освещение обстановки портов и подходов к ним в АЗ. В обозримом будущем объем морских перевозок и технологических операций в акваториях Северного морского пути будет значительно нарастать [1]. В связи с этим, увеличиваются требования к информационной поддержке управления маневрированием судна в стесненных и опасных акватория АЗ [2].

Согласно положению Государственной Службы Морского Флота «О системах управления движением судов» [3] для повышения безопасности судоходства, снижения риска катастроф из-за человеческого фактора и внедрения в эксплуатацию автономных судов требуется использование локальных РЛС, которые позволят увеличить навигационную надежность в АЗ [4]. Для обеспечения вождения морских автономных и дистанционно управляемых надводных судов (МАНС) от РЛС требуется:

- визуализация обстановки сверхвысокого разрешения для проведения грузовых операций,
- информационное предупреждение во избежание столкновений при швартовых операциях, движении в портовых водах и на входе/выходе из порта,
- мониторинг состояния рельефа ледовой и водной поверхности при движении в открытом море и прохождении узких проливов.

В последние десятилетие наблюдается технологическое развитие средств информационного обеспечения в портовых зонах с применением радиофотоники. [5]. Радиофотонные технологии [6, 7] обеспечивают долговременную фазовую стабильность и частотно-фазовую когерентность

между передаваемыми и принимаемыми радиочастотными сигналами. Кроме того, передача сигнала по волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС) обеспечивает высокое качество и высокую когерентность, меньшие потери при распространении по сравнению с волноводами, а также возможность обеспечения широкополосной связи между удаленными узлами РЛС.

Ключевые узлы РЛС, построенные на принципах радиофотоники, с широкой полосой пропускания, могут стать основой многофункциональных и/или реконфигурируемых перспективных РЛС. Помимо этого, широкополосные РЛС позволят уменьшить «слепую зону» на близких расстояниях как, реализовано в настоящее время, например, при применении сверхкоротких импульсов [8].

Для решения вопросов управления маневрированием судна в стесненных и опасных акватория АЗ, в подходах к портам и при портовых операциях необходимо предложить подход к построению сверхширокополосной навигационной РФ РЛС, позволяющей обеспечивать информационную поддержку навигации в акватории с характерными размерами порядка 40 на 40 км с точностью определения координат при навигации на подходах к портам и прибрежных водах 10 м, при маневрировании в порту 1 м, при автоматической швартовке 0,1 м.

1. Структурная схема РЛС на основе радиофотоники

В положении Российского Морского Судоходства «Требования к МАНС и его системам» [9] предъявляются требования к системе обеспечения ситуационной осведомленности для МАНС, которые должны получать информацию как минимум от двух судовых РЛС с системой автоматической радиолокационной прокладки и функцией обнаружения малоразмерных надводных целей, рекомендуется использование четырех РЛС (две X-диапазона и две S-диапазона). К локальным береговым РЛС требований не обозначено, но очевидно, что они должны иметь характеристики как минимум не уступающие соответствующим корабельным РЛС.

Для реализации предъявляемых требований предлагается рассмотреть вариант сверхширокополосной двухдиапазонной навигационной РЛС, построенной на принципах радиофотоники [10, 11]. Для построения радиоизображения важны два параметра. Это разрешение по скорости и разрешение по дальности. Разрешение по скорости является функцией доплеровского сдвига частоты, увеличиваясь с увеличением частоты, тогда как разрешение по дальности связано с шириной полосы сигнала. Увеличенная ширина полосы сигнала увеличивает разрешение по дальности. Применение радиофотоники позволит увеличить полосу сигнала, для увеличения разрешающей способности предлагаемой РЛС, рисунок 1, по дальности, и фазовую когерентность между передатчиком и приемником для контроля изменения частоты. Работа в двух диапазонах частот позволит увеличить дальность работы РЛС и повысить надежность при работе в сложных климатических условиях АЗ.

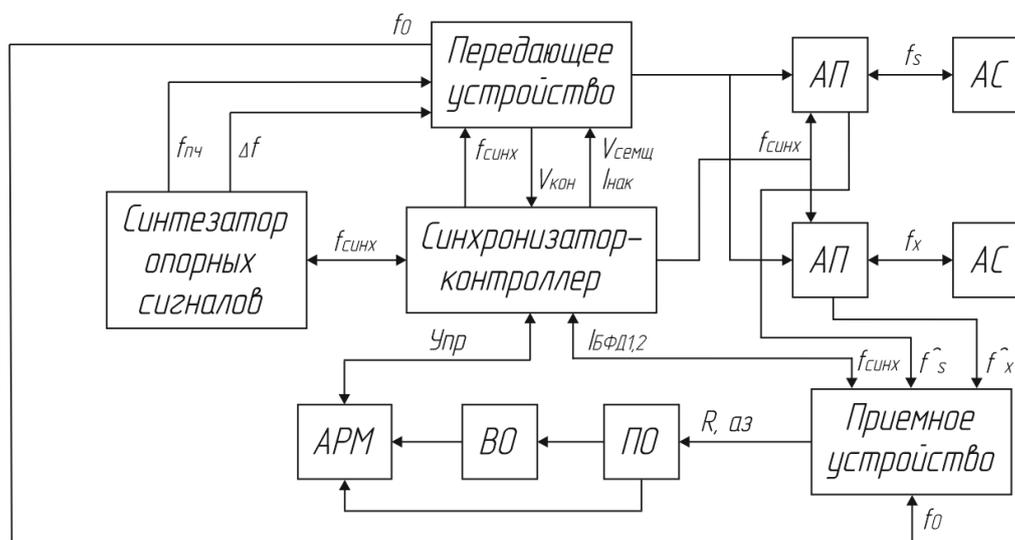


Рис. 1. Структурная схема навигационной РФ РЛС

Предлагаемая навигационная РФ РЛС включает в состав следующие основные блоки: синтезатор опорных сигналов (СОС), синхронизатор-контроллер, передающее устройство (ПРДУ), антенную систему (АС) с антенными переключателями (АП), приемное устройство (ПРМУ), устройства первичной (ПО) и вторичной (ВО) обработки и автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора.

Синхронизатор-контроллер задает начальные значения точек смещения и ток накачки ($I_{нак}$, $V_{смещ}$) ПРДУ, контролирует положение АП (S- или X-) для выбранного диапазона частот и обеспечивает временную синхронизацию системы.

СОС вырабатывает основную сетку частот ($f_{нч}$, Δf), необходимых для работы РФ РЛС, и обеспечивает синхронизатор опорной частотой ($f_{синх}$) для выработки тактовых импульсов и синфазной работы всей системы. Синтезаторы, построенные на основе технологий радиофотоники, имеют низкий уровень фазовых шумов, более стабильны и требуют меньшего потребления электроэнергии [12] по сравнению с существующими решениями.

1.1 Передающее устройство

ПРДУ генерирует зондирующие сигналы (ЗС) на оптической несущей, которые поступают на АС по волоконно-оптической линии (ВОЛС). Структурная схема ПРДУ представлена на рисунке 2.

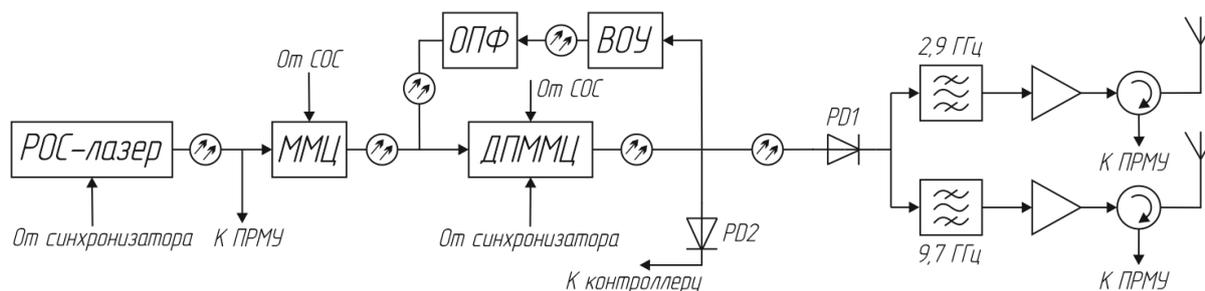


Рис. 2. Структурная схема ПРДУ

Импульсный сигнал промежуточной частоты (ПЧ) $f_{нч}$ от СОС поступает на электрооптический модулятор, в качестве которого служит модулятор Маха-Цендера (ММЦ). На радиочастотные порты двухпараллельного модулятора Маха-Цендера (ДПММЦ) от СОС поступает сигнал шага изменения частоты Δf . Выходной сигнал ДПММЦ на оптической несущей f_0 от лазера распределенной обратной связью (РОС) направляется в оптическую схему формирования («петлю»). Волоконно-оптический усилитель (ВОУ) необходим для компенсации оптических потерь, а оптический полосовой фильтр (ОПФ) используется для управления полосой пропускания оптической схемы

формирования сигнала, ограничивая полосу частот, связанную с длиной импульса ПЧ, и уменьшения спонтанного излучения от ВОУ. При подаче радиочастотного сигнала с частотой Δf , частота оптического сигнала в «петле» будет смещаться по сравнению с предыдущим значением на Δf в каждом цикле. Фотодиод (ФД) преобразует оптический сигнал в электрический, который после фильтрации и усиления излучается в пространство АС. Иллюстрация принципа действия предлагаемой оптической системы формирования сигнала представлена на рисунке 3.

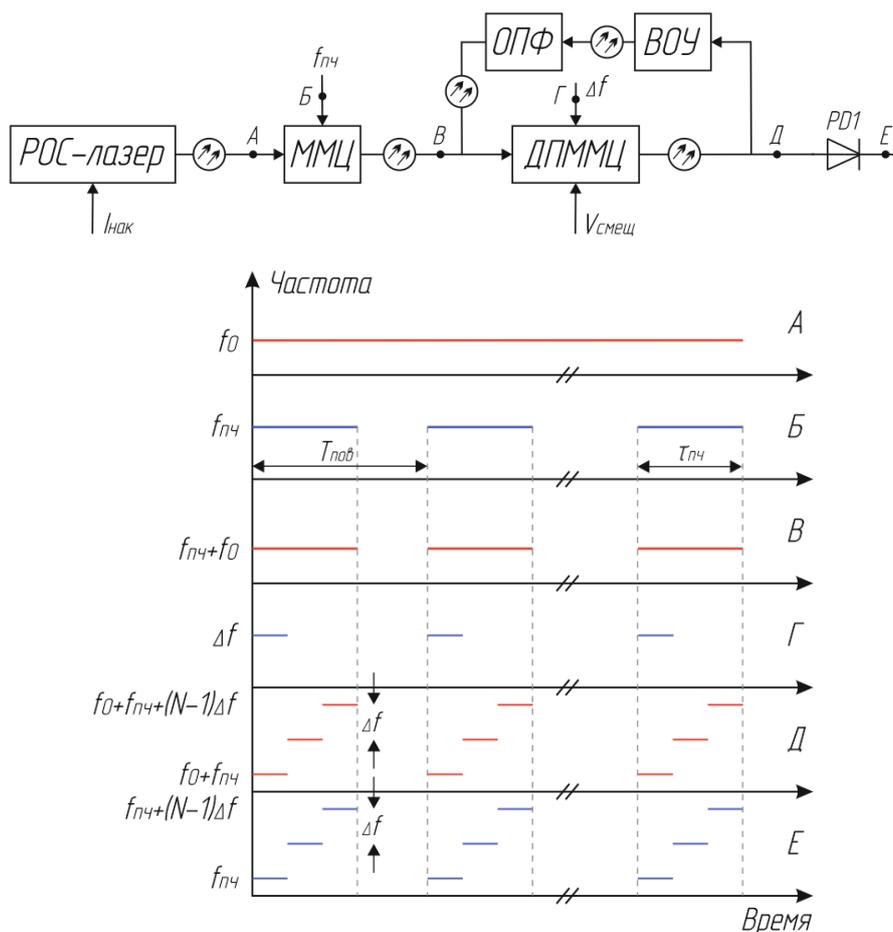


Рис. 3. Иллюстрация принципа действия оптической системы формирования сигнала

Так как максимальное количество импульсов со ступенчатым изменением частоты частотным N_{max} за один период сигнала ПЧ в основном ограничено шириной полосы B_{VOU} , можно записать: $N_{max} = floor(B_{VOU} / \Delta f) + 1$, округляется в меньшую сторону. Критическим моментом схемы является необходимость обеспечить, чтобы задний фронт предыдущего оптического импульсного

сигнала покинул ВОЛС до того, как в контур будет введен передний фронт следующего оптического импульсного сигнала, поэтому $T_{нов} > N_{max} T_{нетли}$ и $T_{нетли} > \tau_{ПЧ}$.

1.2 Антенная система

Исходя из условий работы в порту и обеспечения высоких требований к разрешению по азимуту к АС навигационной РФ РЛС предъявляются требования по узкому лучу диаграммы направленности (ДН) в азимутальной плоскости (1 градус). Возможным решением будет использование цилиндрической зеркальной антенны двойной кривизны с прямоугольным рупорным облучателем, расположенным в фокусе, рисунок 4.

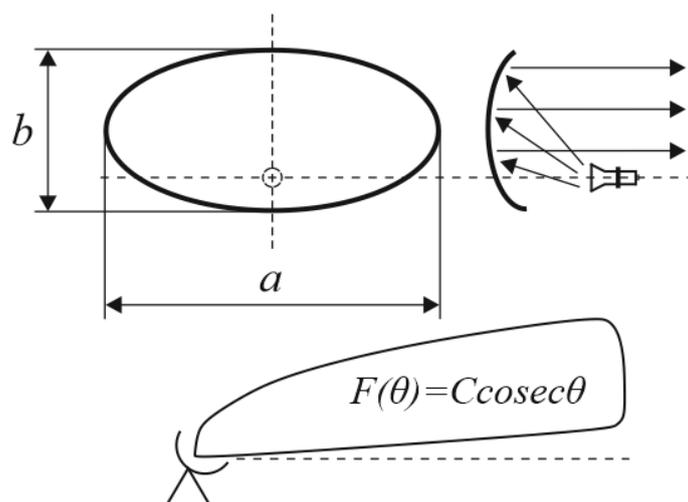


Рис. 4. Косекасная антенна с зеркалом специальной формы и ее диаграмма направленности

Верхняя часть специального зеркала имеет форму, близкую к параболической, и создает почти параллельный пучок отраженных лучей. Нижняя часть имеет форму, близкую к круговому цилиндру, и создает расходящиеся отраженные лучи.

Для работы в двух диапазонах частот (S и X) применяются две АС предложенного типа, разнесенные на расстояние $B = 15$ м, 30 м или 50 м, отличие которых заключается в геометрических размерах полотна и рупорных облучателей, рассчитанных на соответствующие диапазоны частот.

Считая, что в горизонтальной плоскости облучатель создает равноамплитудное распределение поля и пренебрегая затеканием тока на обратную поверхность зеркала, ширина ДН в горизонтальной плоскости (H) будет может быть определена по формуле 1:

$$2\theta_{0,707}^H = 50,8^\circ \cdot \frac{\lambda}{a}. \quad (1)$$

В вертикальной плоскости (E) ширина ДН определяется по формуле 2:

$$2\theta_{0,707}^E = 80^\circ \cdot \frac{\lambda}{b}. \quad (2)$$

Таким образом геометрические размеры для антенны S-диапазона равны: $a = 5,232$ м, $b = 0,412$, для X-диапазона: $a = 1,575$ м, $b = 0,125$.

Поскольку использование S-диапазона целесообразно для наблюдения удаленных целей, то из конструктивных соображений целесообразно уменьшить размер a антенного полотна до стандартных 3,658 м, при этом ширина ДН в азимутальной плоскости составит приблизительно $1,43^\circ$.

Такое разнесение также позволяет реализовать интерферометрический метод обработки информации, рисунок 5, который позволяет проводить улучшенное измерение угловых координат при маневрировании в порту и автоматической швартовке. Дальность действия ограничивается базой интерферометра и длиной волны излучения $R_{инт} = B^2 / \lambda$, что для предложенной конфигурации составляет 2,2 км, 8,7 км или 24,3 км соответственно.

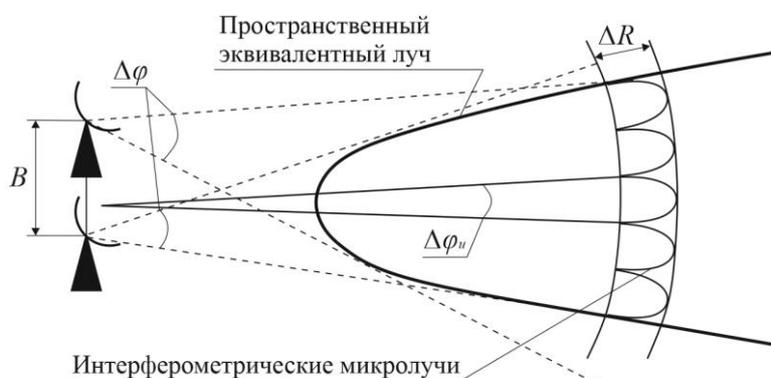


Рис. 5. Элемент разрешения интерферометра

Работа по цели обычно ведется вдоль центрального перпендикуляра к базе системы, формула 3:

$$\Delta\varphi_u = k_{\text{расширения луча}}^{\text{инт}} \cdot \frac{\lambda}{B}. \quad (3)$$

Разрешающая способность по азимуту в данном случае равняется 0,59°, 0,35°, или 0,21°.

За счет применения РОС-лазера, работающего в режиме с синхронизацией мод, легче бороться с неоднозначностью измерения угловых координат, порождаемых схожим набегом фазы для заданной дальности и набора угловых направлений. Форма и размеры элемента разрешения определяются не только расположением позиций и ДН отдельных позиций, а также критерием обнаружения цели. Различие микролучей за одно измерение отдельная задача, которую обычно не решают, а используют череспериодную компенсацию, однако в оптическом диапазоне различение фаз возможно.

1.3 Приемное устройство

ПРМУ, структурная схема которого приведена на рисунке 6, принимает эхо-сигнал от цели и модулирует оптическую несущую РОС-лазера, работающего в режиме с синхронизацией мод.

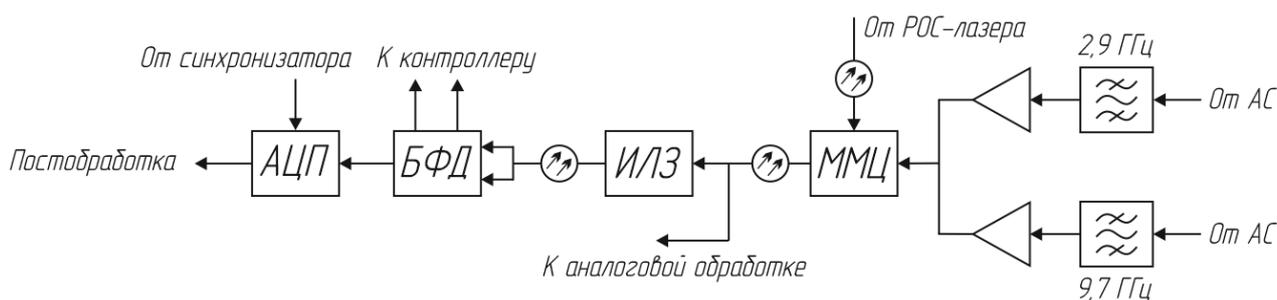


Рис. 6. Структурная схема ПРМУ

Отфильтрованный и усиленный в ВЧ-каскадах эхо-сигнал передается на ММЦ, на который также поступает не модулированный сигнал от РОС-лазера. Таким образом фаза выходного сигнала РОС-лазера модулируется отраженным сигналом. Сигнал с фазовой модуляцией подается на интерферометр с линией задержки (ИЛЗ), где он разделяется поровну. Выходной сигнал ИЛЗ передается

в балансный фотодетектор (БФД) для устранения синфазных помех и увеличения амплитуды сигнала. После БФД сигнал преобразуется в цифровой вид с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и обрабатывается для измерения координат цели и визуализации ее движения. ПРМУ разнесено с АС, что позволяет оптимизировать массогабаритные характеристики системы и повысить помехоустойчивость системы за счет ВОЛС.

Использование БФД, вместо традиционного ФД, позволяет удвоить амплитуду сигнала и устранить фазовый шум относительной интенсивности (eng. RIN) лазерного источника, таким образом улучшая отношение сигнал/шум [13].

После ММЦ предусмотрен оптический разветвитель (выход) для аналоговой обработки оптических сигналов, например, на основе оптоэлектронного аналогового сигнального процессора [14]. Такая обработка потенциально позволяет получить принципиально новые РЛС с оптическим сверхразрешением и РЛС радиовидения. На основе сигнатурного анализа возможно выделить дополнительные признаки для распознавания цели, например, в [5] приведены характерные спектры отраженного сигнала, рисунок 7.

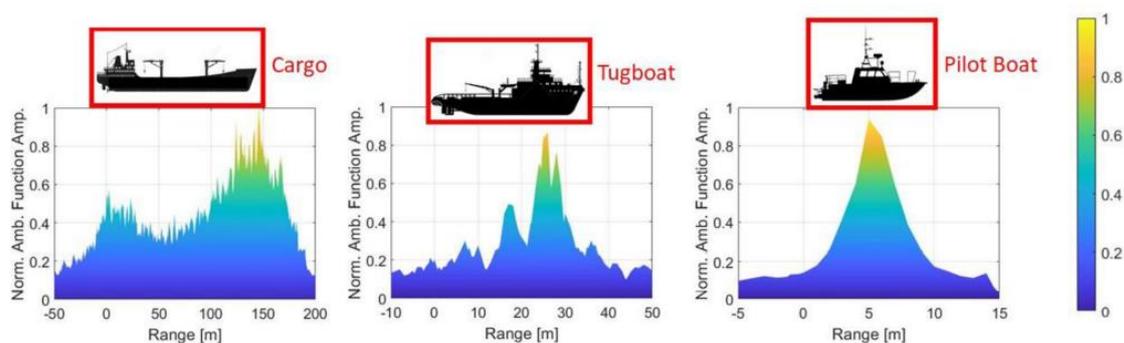


Рис. 7. Характерные спектры отраженного сигнала от различных судов [5]

2. Предложения по технической реализации ключевых узлов радиопотонной РЛС

Оптическая несущая выбирается из соображения наименьшего затухания в оптических волокнах прозрачности, рисунок 8.

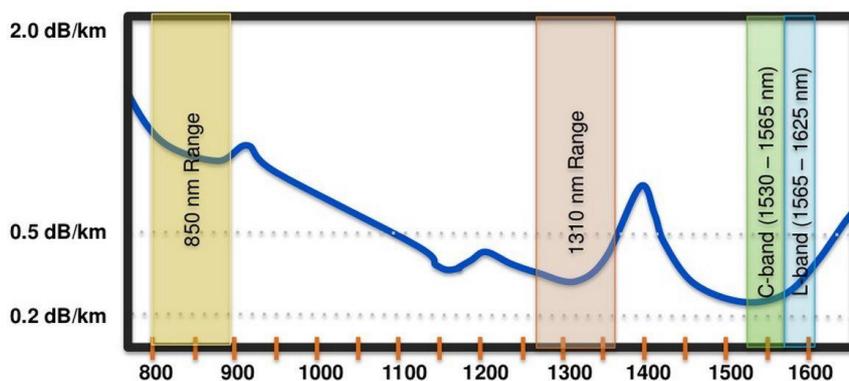


Рис. 8. Окна прозрачности оптических волокон [15]

На рисунке 8 показаны четыре окна прозрачности, именно под эти диапазоны длин волн разработаны устройства излучения, преобразования и обработки оптического сигнала.

В предлагаемой структурной схеме навигационной РФ РЛС рассматривается элементная база диапазона 1550 нм, выбор которой обусловлен наиболее развитой компонентной радиопотонной базой и наименьшим затуханием.

ПРДУ содержит в своем составе источник оптического когерентного излучения, в качестве которого хорошо применимы РОС-лазеры. В таблице 1 приведены характеристики РОС-лазеров и лазерных диодов различных производителей.

Таблица 1. Характеристики РОС-лазеров

Производитель (страна) / наименование	Длина волны, нм	Выходная оптическая мощность, мВт	Ширина спектральной линии	RIN, дБ/Гц	Тип волокна	Диапазон рабочих температур, °С
LD-PD INC (Сингапур) / PL-DFB-1550-TO39 лазерный диод	1530-1610	20	< 2 МГц	- 140	ОМ	-5...+70
Gooch & Housego (Великобритания, США) / EM650 РОС-лазер	1550	до 100	170 кГц	- 150	ОМ	-40...+85
EMCORE (США) / 1751A DFB РОС-лазер	1526-1563	до 16	до 1 МГц	- 155	ММ	-40...+85
НПФ ДИЛАЗ (Россия) / ДМПО155-14 лазерный диод	1550	5	3 нм	-	ОМ	-40...+60
CNI LASER (КНР) / MLDP-1550-8 лазерный диод	1550	8	до 150 кГц	- 150	ММ	-10...+85
PRINCETON LIGHTWAVE (США) / PSL-450 лазерный диод высокой мощности	1530-1570	400	12 нм	-	ОМ	-0...+65

RIN – относительный фазовый шум, ОМ – одномодовое волокно, ММ – многомодовое волокно.

Для работы в сложных климатических условиях могут применяться изделия компаний EMCORE, Gooch & Housego и НПФ ДИЛАЗ, поскольку производимые ими РОС-лазеры способны работать при достаточно низких температурах.

Для задания параметров сигнала на оптической несущей создаются интерферометры ММЦ и ДПММЦ с использованием электрооптических эффектов. В качестве материала для изготовления применяют кристаллы ниобата лития (LiNbO_3) или танталата лития (LiTaO_3), а также полупроводниковые материалы $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$. В таблице 2 представлены характеристики электрооптических модуляторов (ЭОМ) различных производителей.

Таблица 2. Характеристики ЭОМ

Производитель (страна) / наименование	Длина волны, нм	Полоса модуляции, ГГц	Вносимые потери, дБ	Полуволновое напряжение, Вт	Диапазон рабочих температур, °С
ROFEA PHOTONICS (КНР) / SSP-A-15-20 ММЦ	1530-1565	до 20	4	4,5	-10...+60
IXBLUE PHOTONICS (Франция) / MXAN-LN-20 ММЦ	1530-1625	до 25	2,7	5	0...+70
IXBLUE PHOTONICS (Франция) / MXIQ-LN-30 ДПММЦ	1530-1580	до 30	5	5,5	0...+70
Jenoptik (Германия) / AM1550b ММЦ	1500-1600	до 10	4,5	5	0...+70
Thorlab (США) / LN82S-FC ММЦ	1525-1605	до 10	4	5,2	0...+70
Thorlab (США) / LN86S-FC ДПММЦ	1525-1575	до 14	5	3,5	0...+70
ЛЛС (Россия) / IMODUL AM-20-1-PM-PM-FC/APC ММЦ	1520-1600	до 20	3-5	5	-10...+50

Существующая база ЭОМ позволяет использовать любые модуляторы, включая отечественные разработки, но требует дополнительного термостатирования.

В радиофотонике используются оптические усилители различных видов. Наиболее широко применяются волоконные оптические усилители, легированные ионами эрбия (Er^{3+}). Данный ион редкоземельного элемента эрбия имеет широкий спектр излучения с малыми потерями на длине волны 1550 нм [16]. В таблице 3 приведены характеристики ВОУ отечественно и зарубежного производства.

Таблица 3. Характеристики ВОУ

Производитель (страна) / наименование	Длина волны, нм	Коэффициент усиления	Выходная мощность, мВт	Диапазон рабочих температур, °С
Специальные системы фотоника (Россия) / SSP-EFA-V	1528-1564	26	125	-40...+85
RTM (Россия) / EFA-1550-33	1540-1563	-	до 5000	-0...+40
Keopsys (Франция) / PEFA-LP-C	1535 – 1565	30	до 2200	-35...+65
ЗАО НОЛАТЕХ (Россия) / SOA-1550-14BF	1510-1550	28	10	-20...+70
EMCORE (США) / OTS-20	1530-1562	20	25	-0...+50

В качестве ВОУ может применяться продукция, производимая «Специальные системы фотоника» и Keopsys, последняя обеспечивает достаточно большую выходную мощность.

В настоящее время исследуются возможности создания фотонных аналого-цифровых преобразователей (ФАЦП). В работе [17] представлен обзор работ по применению фотоники для высокоточного аналого-цифрового преобразования широкополосных СВЧ-сигналов, приведших к созданию современных ФАЦП.

Автор [18] отмечает преимущества ФАЦП на фотонной интегральной схеме по сравнению с АЦП на транзисторной электронике. Рассматриваются некоторые схемы реализации ФАЦП, их сравнение, а также варианты проектирования, моделирования и реализации на существующей в России технологической базе, тем не менее пока говорить о возможности практического применения таких изделий в создаваемых РЛС преждевременно.

3. Оценка потенциально достижимых характеристик навигационной РФ РЛС

Потенциально достижимые тактико-технические характеристики (ТТХ) предлагаемой навигационной РФ РЛС, работающей в двух диапазонах, приведены в таблице 4.

Таблица 4. Расчетные ТТХ системы

Параметр	Значение		Значение для РЛС Furuno				
			М-1835	М-1935	М-1945	FR-2135S	FR-2165DS
Несущая частота (S- и X-диапазон)	2,9 ГГц	9,7 ГГц	9,4 ГГц			3,05 ГГц	
Модуляция сигнала	Ступенчатое изменение частоты		Линейно-частотная				
Инструментальная дальность по цели с ЭПР 2000м ²	65 км	35 км	46 км	68 км	98 км	107 км	175 км
Шаг промежуточный частоты ПРДУ	до 10 ГГц		-				
Длительность импульса	100 нс...5 мкс		-			0,08 мкс	1,2 мкс
Период повторения	50 мкс		-			450 мкс	
Выходная мощность	2 кВт		4 кВт	6 кВт		30 кВт	60 кВт
Радиочастотный усилитель мощности	30...40 дБ		-				
Чувствительность приемника	1,5·10 ⁻¹⁰ Вт		-				
Разрешающая способность по дальности/азимуту	15 м / 0,7°	0,15 м / 0,5°	25 м		35 м	150 м	
Точность измерения дальности/азимута	3,5 м / 0,321°	0,05 м / 0,162°	-				
Интерферометрический режим, база 15/30/50 м	Дальность	Разреш. способность по азимуту	-				
	2,2 / 8,7 / 24,3 км	0,59° / 0,35° / 0,21°					

Рассчитанные ТТХ навигационной РФ РЛС в целом сравнимы с коммерчески доступной РЛС Furuno-M-1835/1935/1945 и Furuno-FR-2135S/2165DS [19, 20]. Увеличилась расчетная дальность по цели с ЭПР 2000 м², за счет применения методов оптической обработки. При работе в заданном секторе 40 на 40 км требуется в 2 раза меньшая потребляемая и излучаемая мощность, за счет уменьшения суммарных потерь. Разрешающая способность по дальности повысилась до дециметров за счет расширения полосы сигнала до 10 ГГц. Применение ВОЛС вместо коаксиальных линий позволит уменьшить массу антенно-фидерной системы и повысить помехоустойчивость.

Заключение

В работе представлены результаты предварительной проработки РФ РЛС для навигации морских судов в критически важных акваториях АЗ. По своим ТТХ предложенная структурная схема РЛС обеспечивает инструментальную дальность обнаружения судов 35 и 65 км, а в интерферометрическом режиме 2,2 км, 8,7 км или 24,3 км в зависимости от разнесения АС ($B = 15$ м, 30 м или 50 м). Разрешающая способность по дальности и азимуту составляет $0,015 \dots 15$ м / $0,5^\circ \dots 0,7^\circ$, соответственно, а в интерферометрическом режиме разрешающая способность по азимуту составляет $0,59^\circ$, $0,5^\circ$, или $0,21^\circ$. Излучаемая мощность каждой антенны 2 кВт. Методы оптической обработки, потенциально позволяющие реализовать режим высокодетального радиовидения, в данной статье подробно не рассматривались и являются предметом дальнейшего исследования.

В результате сравнительного анализа с навигационной РЛС Furuno-M-1835/1935/1945 и Furuno-FR-2135S/2165DS показано повышение разрешающей способности, увеличение дальности обнаружения и повышение помехоустойчивости.

Результаты расчетов и моделирования разработанной структурной схемы РФ РЛС для навигации морских судов позволяют говорить о возможности применения такой РЛС в качестве системы обеспечения ситуационной осведомленности для информационной поддержки управления маневрированием судов в стесненных и опасных акваториях АЗ. Предложенные решения позволят использовать их в дальнейшем при создании перспективных РЛС на основе радиофотоники.

Литература

1. Куранова А.А., Пономарев С.В. Северный морской путь: вчера, сегодня и завтра. *XVII Международной научно-практической конференции «Научные исследования молодых ученых»*. Пенза. 2022. С.39-44.
2. Скосырев В.Н. и др. Комплексный подход к информационному обеспечению судовождения в Арктической зоне РФ на основе современных радиолокационных и навигационных технологий. *Научные технологии*. 2021. Т.22. №3. С.10-21. <https://doi.org/10.18127/j19998465-202103-02>
3. Положение Государственной Службы Морского Флота «О системах управления движением судов» [web]. *Rosmorport*. Дата обращения: 10.04.2022. URL: https://www.rosmorport.ru/media/File/filials/Saint-Petersburgsky/VTS_Statutes_2002.pdf
4. Бермишев А.А., Лапшин В.Л., Ревнивых С.Г. ГЛОНАСС в Арктике: результаты комплексного исследования навигационной обстановки при переходе по Северному морскому пути в августе-сентябре 2011 г. *Арктика: экология и экономика*. 2012. №4. С.55-65.
5. Serafino G., et al. A photonics-assisted multi-band MIMO radar network for the port of the future. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2021. V.27. №6. P.1-13. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2021.3092880>
6. Panda S.S.S., et al. Recent Advances and Future Directions of Microwave Photonic Radars: A Review. *IEEE Sensors Journal*. 2021. V.21. №19. P.21144-21158. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3099533>
7. Pan S., Zhang Y. Microwave photonic radars. *Journal of Lightwave technology*. 2020. V.38. №19. P.5450-5484. <https://doi.org/10.1109/JLT.2020.2993166>
8. Ананенков А.Е., Скосырев В.Н., Усачев В.А. Концепция создания современной радиолокационной станции контроля прибрежной зоны. *Вестник МГТУ им. НЭ Баумана. Сер. Приборостроение. Спец. выпуск*. 2012. №7. С.217-225.

9. Положения по классификации морских автономных и дистанционно управляемых надводных судов (МАНС). Раздел 9: «Требования к МАНС и его системам» [web]. *Российский морской регистр судоходства*. Дата обращения: 10.04.2022. URL: <https://lk.rs-class.org/regbook/getDocument2>
10. Scheer J., Holm W.A. Principles of modern radar: Basic Principles. Volume 1. *Institution of Engineering and Technology*. 2010. 962 с.
11. Melvin W.L., Scheer J.A. Principles of Modern Radar: Radar Applications. Volume 3. *Institution of Engineering and Technology*. 2013. 820 с.
12. Capmany J., Novak D. Microwave photonics combines two worlds. *Nature photonics*. 2007. V.1. №6. P.319-330. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2007.89>
13. Albert C.B., Huang C., Chan E.H.W. Intensity noise suppression using dual-polarization dual-parallel modulator and balanced detector. *IEEE Photonics Journal*. 2017. V.10. №2. P.1-8. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2017.2778266>
14. Marpaung D., et al. Nonlinear integrated microwave photonics. *Journal of Lightwave Technology*. 2014. V.32. №20. P.3421-3427. <https://doi.org/10.1109/JLT.2014.2306676>
15. Окна прозрачности оптического волокна [web]. *Laser-portal*. Дата обращения: 21.12.2021. URL: http://laser-portal.ru/content_838
16. Mears R.J., et al. Low-noise erbium-doped fibre amplifier operating at 1.54 μm . *Electronics Letters*. 1987. V.23. №19. P.1026-1028. <http://doi.org/10.1049/el:19870719>
17. Свидзинский К.К. Фотонные АЦП (обзор последних достижений). *Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника*. 2016. №3. С.41-52.
18. Якушенков П.О. Фотонный АЦП. *Фотон-экспресс*. 2021. №6. С.186. <https://doi.org/10.24412/2308-6920-2021-6-186>
19. РЛС Furuno-M-1835/1935/1945 [web]. *Furuno в России*. Дата обращения: 15.05.2021. URL: https://furuno.ru/Brochure_rus.pdf
20. РЛС Furuno-FR-2135S/2165DS [web]. *Furuno*. Дата обращения: 15.05.2021. URL: https://www.furunousa.com/fr2135s_brochure.pdf

Для цитирования:

Галкин Н.К., Голов Н.А. Навигационная радиофотонная РЛС для портов Арктической зоны. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2022. №9. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.9.3>