

DOI: 10.24937/2542-2324-2019-1-387-155-166
УДК 623.62

А.Ю. Андреев, А.В. Матвеевцев, Ю.М. Патраков, А.А. Ржевский
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СРЕДСТВА СНИЖЕНИЯ ЗАМЕТНОСТИ КОРАБЛЕЙ В ВЕРХНЕЙ ПОЛУСФЕРЕ И КОНТРОЛЯ ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Объект и цель научной работы. Объектами исследования являются перспективные радиопоглощающие материалы и средства контроля эффективности мероприятий по снижению заметности по полям верхней полусферы в натуральных условиях. Целью работы является создание перспективных радиопоглощающих материалов и измерительных средств для контроля снижения заметности.

Материалы и методы. На основе современных методов конструирования специальных материалов и измерений электромагнитного излучения рассматриваются перспективные технологии изготовления радиопоглощающих материалов и основные характеристики средств контроля заметности кораблей в верхней полусфере.

Основные результаты. Определены основные тенденции развития в области создания радиопоглощающих материалов и средств контроля эффективности мероприятий по снижению заметности. Получены оценки параметров разрабатываемых средств.

Заключение. Проведённые исследования позволили определить тенденции развития средств снижения заметности кораблей в верхней полусфере и их результаты могут быть использованы при создании отечественных перспективных кораблей.

Ключевые слова: конструкционные радиопоглощающие материалы, радиопоглощающие покрытия, радары, лидары, тепловизоры.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2019-1-387-155-166
UDC 623.62

A. Andreev, A. Matveentsev, Yu. Patrakov, A. Rzhevsky
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

ADVANCED MITIGATION TOOLS FOR ABOVE-WATER SHIP SIGNATURES AND THEIR EFFICIENCY VERIFICATION

Object and purpose of research. This paper studies advanced radar-absorbing materials and efficiency control measures for mitigation of full-scale above-water signatures of ships. The purpose of this study is to develop advanced radar-absorbing materials and instrumentation for signature management efficiency control.

Materials and methods. Based on modern methods for engineering of special materials and measurement of electromagnetic signatures, this paper investigates advanced manufacturing technologies for radar-absorbing materials, as well as main parameters of control tools for above-water ship signatures.

Main results. The study identified main trends in development of radar-absorbing materials and control tools for above-water signature management, as well as estimated the parameters of the tools currently under development.

Для цитирования: Андреев А.Ю., Матвеевцев А.В., Патраков Ю.М., Ржевский А.А. Перспективные средства снижения заметности кораблей в верхней полусфере и контроля их эффективности. Труды Крыловского государственного научного центра. 2019; 1(387): 155–166.

For citations: Andreev A., Matveentsev A., Patrakov Yu., Rzhevsky A. Advanced mitigation tools for above-water ship signatures and their efficiency verification. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2019; 1(387): 155–166 (in Russian).

Conclusion. These studies enabled identification of trends in development of above-water signature management tools for ships, and their results could be used in design of Russian advanced ships.

Keywords: radar-absorbing structural materials, radar-absorbing coatings, radars, lidars, infrared imagers.

Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

Имеющиеся и разрабатываемые системы обнаружения и распознавания военных объектов, а также наведения на них высокоточного оружия, как правило, используют радиолокационный, тепловой и лазерный каналы. Поэтому большое значение приобретает снижение заметности существующих и проектируемых кораблей в широком диапазоне частот, что требует выявления наиболее отражающих («блестящих») точек в диапазонах спектра, соответствующих данным каналам. На эти «блестящие точки» наносятся поглощающие материалы, что позволяет снизить их заметность и уменьшить заметность корабля в целом.

Перспективные радиопоглощающие материалы для снижения заметности кораблей в верхней полусфере

Advanced radar-absorbing materials for mitigation of above-water ship signatures

В настоящее время работы по созданию эффективных радиопоглощающих материалов ведутся

в Крыловском государственном научном центре (КГНЦ) по нескольким направлениям:

- полимерные конструкционные радиопоглощающие материалы (КРПМ);
- радиопоглощающие материалы с использованием магнитных нанокompозитов;
- радиопоглощающие материалы на основе метаматериалов.

Основными характеристиками современных радиопоглощающих материалов являются:

- широкий диапазон частот поглощения;
- сниженные массогабаритные характеристики;
- простая технология монтажа или нанесения на корабль.

Полимерные конструкционные радиопоглощающие материалы

Radar-absorbing structural materials based on polymeric composites

В КГНЦ созданы КРПМ на основе современных композиционных стеклопластиков. Разработаны

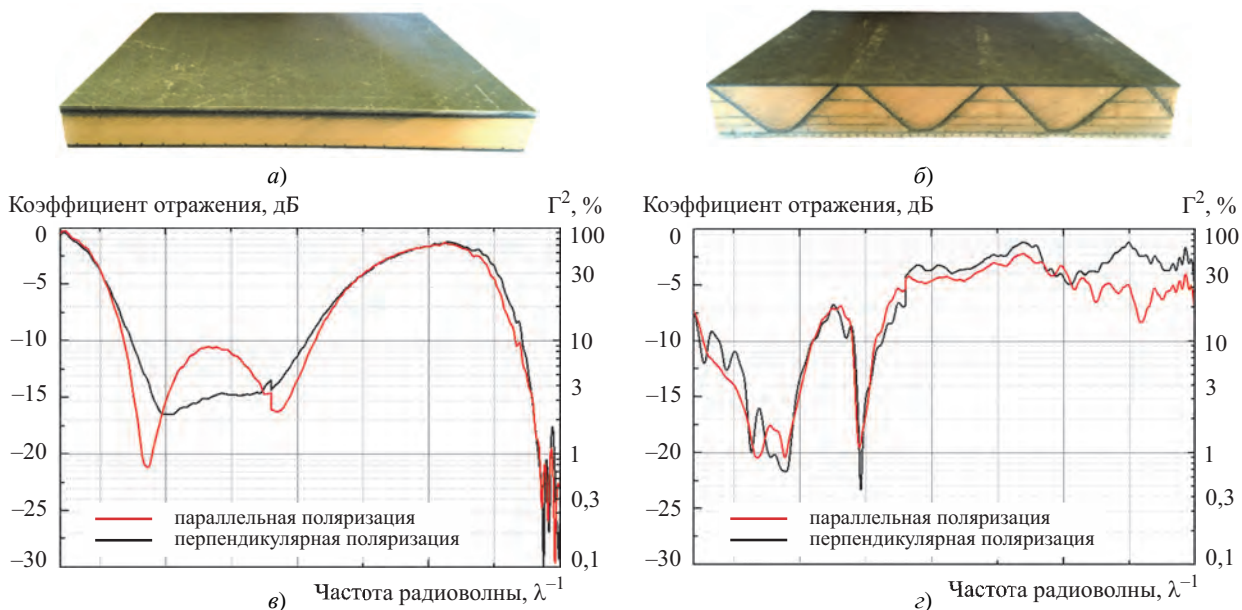


Рис. 1. Полимерные конструкционные радиопоглощающие материалы: а) плоскостлойный; б) с геометрическими неоднородностями; в, г) соответствующие спектры коэффициента отражения

Fig. 1. Composite radar-absorbing structural materials: а) plane-layered; б) with geometric non-uniformities; в, г) corresponding spectra of reflection coefficients

несколько вариантов образцов КРПМ для строительства кораблей среднего водоизмещения типа «корвет» [1]. Наилучшими радиотехническими и прочностными параметрами обладают образцы двух типов – плоскостойкие и с геометрическими неоднородностями (рис. 1).

В плоскостойком КРПМ в качестве поглотителя электромагнитной энергии использовались тонкие полупроводящие слои на основе углеродных тканей, отделенные друг от друга слоями радиопрозрачного стеклопластика. В КРПМ с геометрическими неоднородностями поглощение осуществляется за счет многократных переотражений падающей радиоволны на геометрических неоднородностях трапециевидного вида. Конструкция КРПМ включает три основных слоя: два наружных несущих слоя и внутренний средний слой с гофрированной структурой, где в качестве легковесного заполнителя использовался пенопласт, обладающий хорошими теплоизолирующими свойствами. В результате выполненных работ были созданы сверхширокополосные КРПМ, эффективно работающие в сантиметровом и дециметровом диапазонах длин волн на обеих поляризациях облучающей радиоволны (рис. 1а, з).

Как показали экспериментальные исследования прочностных характеристик разработанных КРПМ, они могут применяться при создании конструкций кораблей водоизмещением более 4000 т (классы «фрегат», «эсминец», «крейсер»), например, для изготовления из них радиопоглощающих надстроек и элементов корпуса (рис. 2), а также для стенок ангаров летательных аппаратов, кожухов систем газоотводов, ограждений систем вооружения и пр.

К настоящему времени технологии изготовления опытных образцов КРПМ апробированы в КГНЦ. Внедрение разработанных КРПМ в производство позволит существенно снизить радиолокационную эффективную площадь рассеяния (ЭПР) кораблей.

Радиопоглощающие материалы на основе нанокompозитов

Важное место на пути создания эффективных радиопоглощающих материалов в настоящее время уделяется исследованиям, связанным с возможностью получения широкодиапазонных легких и тонких радиопоглощающих материалов при использовании новых технологий. Одним из перспективных подходов получения радиопоглощающих материалов со сниженными массогабарит-



Рис. 2. Предполагаемое размещение радиопоглощающих материалов на корабле

Fig. 2. Suggested arrangement of radar-absorbing materials aboard ship

ными характеристиками является применение нанотехнологий, в частности использование магнитных нанокompозитов. В настоящее время исследованию радиочастотных свойств магнитных нанокompозитов посвящено большое количество публикаций [2–5]. Теоретически установлено, что для магнитных материалов, используемых при создании поглотителей, необходимо иметь большое значение магнитной восприимчивости и магнитные потери в высокочастотной области спектра. Данное условие может быть выполнено при использовании магнитных нанокompозитов или тонких (в субмикронном диапазоне) магнитных пленок. С целью развития новых технологий и модернизации экспериментальной базы в КГНЦ был введен в эксплуатацию участок нанотехнологий для нанесения тонкопленочных покрытий, оборудованный с необходимым технологическим и аналитическим оборудованием (рис. 3).

Оборудование участка позволяет отрабатывать технологии получения пленок магнитных композитов на гибких подложках. Пленки наносятся методом постоянного и высокочастотного магнетронного распыления. В частности, исследовать процессы получения магнитных композитов, состоящих из частиц Ni, диспергированных в диэлектрической (SiO_2) или проводящей (C – графит) матрицах с использованием в качестве подложек базальтовой, кевларовой ткани и стеклоткани, а также исследовать влияние соотношения скоростей распыления на структуру композита и кинетику распределения магнитных микро-, наночастиц в матрице. Получены пленочные образцы магнитных композитов с различной концентрацией магнитных частиц при толщине пленок 0,2–5,0 мкм. Для определения корреляции структурных и радиочастотных свойств полученных образцов с параметрами технологического процесса

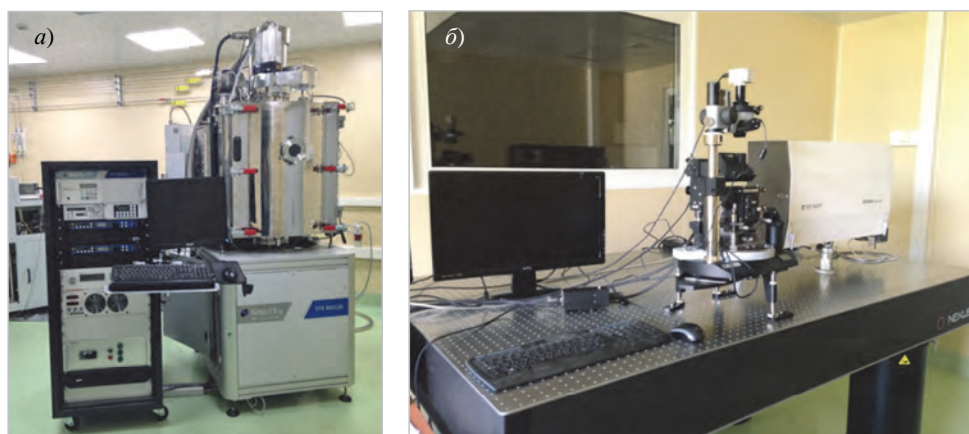


Рис. 3. Участок нанотехнологий: а) установка магнетронного напыления STE MS116; б) сканирующая зондовая станция Ntegra Spectra (NT-MDT)

Fig. 3. Nanotechnology area: a) magnetron deposition rig STE MS116; b) scanning probe station Ntegra Spectra (NT-MDT)

проведен анализ поверхностных морфологических и магнитных свойств образцов, а также радиотехнические измерения композита.

Анализ морфологических (или структурных) свойств поверхности образцов выполняется методами атомно-силовой и магнито-силовой микроскопии с использованием сканирующей зондовой станции Ntegra Spectra (NT-MDT, г. Зеленоград), показанной на рис. 3б. На рис. 4 представлены поверхностный рельеф (а) и магнитный фазовый контраст (б), измеренные на образце Ni/SiO₂ с 20-процентным содержанием Ni на подложке Si. Результаты дают возможность исследовать процесс формирования, размер и распределение магнитных наночастиц в матрице.

Радиочастотные свойства полученных пленок композитов, такие как коэффициент отражения и пропускания, исследуются на стенде радиотехнических испытаний в диапазоне частот 2–40 ГГц

(рис. 5а). На рис. 5б представлен спектр коэффициента отражения трех различных по составу и толщине пленок Ni/SiO₂, нанесенных на базальтовые подложки толщиной примерно 0,25 мм.

Из рисунка видно, что величина коэффициента отражения электромагнитного излучения в микроволновом диапазоне зависит от состава (процентного содержания магнитных частиц) и толщины пленки. Как показывают экспериментальные и теоретические исследования [2], существенное влияние на поглощающие свойства магнитных композитов оказывают также величина намагниченности насыщения пленок, наличие магнитной анизотропии, форма частиц. Для получения эффективных поглотителей необходимо учитывать и исследовать каждый из этих факторов. Важной задачей является расширение полосы частот поглощения тонкопленочных поглотителей. Решение этой задачи может быть осуществлено за счет

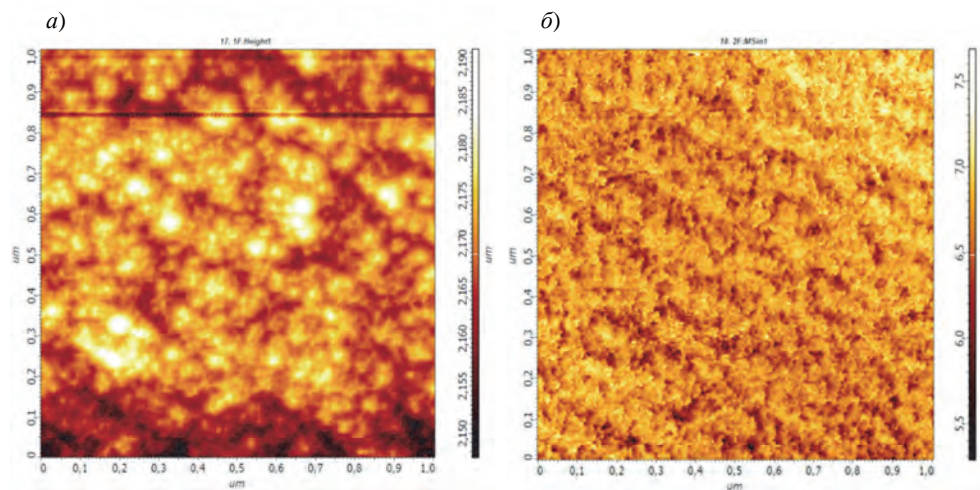


Рис. 4. Поверхностный рельеф пленки Ni/SiO₂ с 20-процентным содержанием Ni на подложке Si (а) и магнитный фазовый контраст (б), полученные с использованием сканирующей зондовой станции Ntegra Spectra

Fig. 4. Surface topography of Ni/SiO₂ tape with 20 % content of Ni on Si substrate (a) and magnetic phase contrast (b) obtained by means of Ntegra Spectra scanning probe station

использования многослойных тонкопленочных структур с требуемыми значениями толщин и электродинамических параметров слоев. Это предполагает применение сложных электродинамических расчетов материальных параметров многослойной структуры и эффективных алгоритмов оптимизации. Работа в этом направлении основана на применении методов электродинамического 3D-моделирования, реализованных в программных компьютерных пакетах, как CST Microwave Studio, ANSYS и Comsol Multiphysics.

Радиопоглощающие материалы на основе метаматериалов

Метаматериалы – это искусственные периодические структуры с необычными электродинамическими свойствами. Примером метаматериальных структур являются различные периодически расположенные на диэлектрических подложках проводящие включения, такие как разорванные спирали, кольца, двойные спиральные кольца, а также различные структуры, нагруженные пассивными или активными электронными компонентами [3].

В настоящее время интерес к исследованию и применению метаматериалов необычайно высок, такие исследования активно ведутся во многих крупных зарубежных научных центрах и лабораториях. Это связано с тем, что, оптимальным образом комбинируя материальные и геометрические параметры таких структур, можно управлять их электродинамическими свойствами. Среди наиболее интересных явлений, наблюдаемых в метаматериалах, следует отметить возможность реализации отрицательного показателя преломления и явление огибания (в зарубежной литературе термин «cloaking» – огибание, обтекание) небольших по размерам объектов в оптическом и микроволновом диапазонах частот. Явление огибания легло в основу активно развиваемого за рубежом практического направления использования метаматериалов, связанного с возможностью реализации концепции «невидимости» или «плащаневидимки» [4].

В настоящее время в КГНЦ активно ведутся теоретические и экспериментальные работы по созданию широкодиапазонного защитного радиопоглощающего материала на основе многослойных метаматериальных структур (метаповерхностей). В качестве метаматериальной поверхности единичного слоя используется высокоимпедансная поверхность, представляющая собой набор периодически

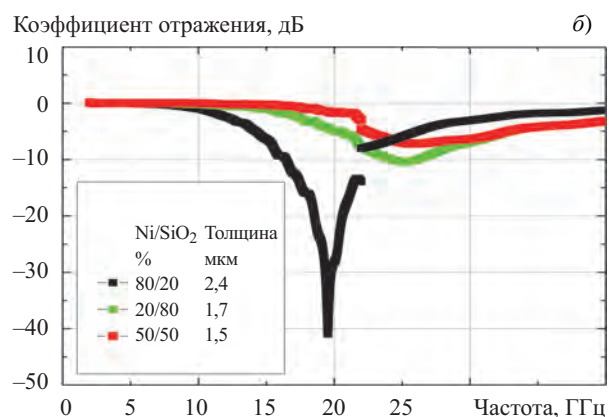


Рис. 5. Стенд измерения электродинамических параметров материалов (а), спектры коэффициента отражения пленок Ni/SiO₂, нанесенных на базальтовые подложки (б)

Fig. 5. Electrodynamic test rig for materials (a), reflection coefficient spectra for Ni/SiO₂ tapes on basalt base layers (b)

расположенных квадратных элементов определенного размера и периода, обладающих требуемым значением поверхностного сопротивления.

Определение оптимальных геометрических и электрических параметров многослойной структуры требует решения сложной многопараметрической оптимизационной задачи. Для оптимизации параметров многослойной конструкции применялся полуэмпирический подход, представляющий собой реализацию метода эквивалентной электрической цепи. Полученные с использованием этого подхода параметры сравнивались с результатами оптимизации по алгоритмам, реализованным в специализированных пакетах электродинамического 3D-моделирования.

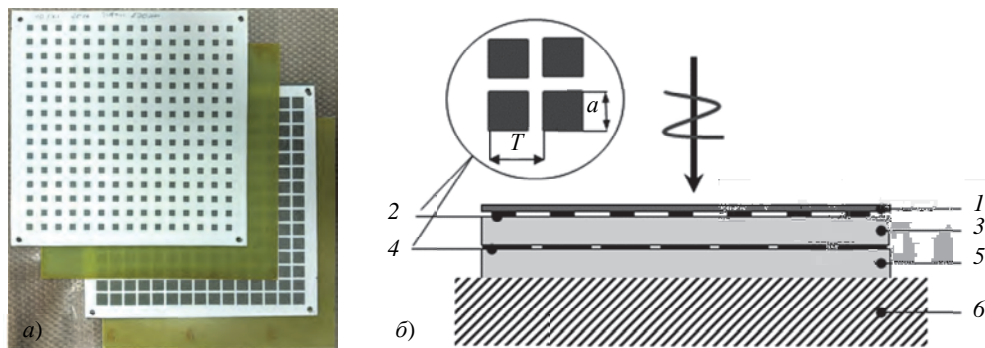


Рис. 6. Квадратные периодические структуры с различным периодом и поверхностным сопротивлением, полученные методом магнетронного распыления через маску (а), и схема реализации широкодиапазонного радиопоглощающего материала на основе многослойных метаповерхностей (б); 1 – входной слой, представляющий магнитный композит; 2, 4 – метаповерхности с заданным поверхностным сопротивлением и периодом; 3, 5 – диэлектрические подложки заданной толщины; 6 – металлический экран, имитирующий защищаемую поверхность

Fig. 6. Square periodical structure with different periods and surface resistances obtained by means of magnetron deposition through a mask (a) and implementation layout of a wide-band radar-absorbing materials based on layered meta-surfaces (b); 1 – input layer representing a magnetic composite; 2, 4 – meta-surfaces with specified surface resistance and period; 3, 5 – dielectric base layers of specified thickness; 6 – metal shield simulating protected surface

Наиболее сложной задачей с точки зрения практической реализации является выбор подходящей технологии получения периодических структур, обладающих требуемым сопротивлением. В качестве одной из возможных технологий получения таких структур опробован и реализован подход, основанный на нанесении тонких металлических или композитных пленок методом магнетронного распыления через маску. Контроль поверхностного сопротивления пленок осуществ-

лялся *in situ* в процессе напыления по сопротивлению образца свидетеля.

На рис. 6 приведены образцы тонкопленочных метаповерхностей, а также схема получения радиопоглощающего материала на их основе.

Спектр коэффициента отражения радиопоглощающего материала, составленного из двух метаповерхностей и магнитного входного слоя, представлен на рис. 7. Как видно из рисунка, материал обеспечивает коэффициент отражения менее –10 дБ в относительно широком спектральном диапазоне 5–22 ГГц. Этот результат достигается при следующих значениях параметров слоев:

- входной слой 1: магнитный композит $|\mu| \approx 1,5$;
- метаповерхность 1: $a = 5$ мм, $T = 12$ мм, $d = 300$ нм;
- метаповерхность 2: $a = 10$ мм, $T = 12$ мм, $d = 410$ нм.

Дальнейшее развитие работ по созданию легких и эффективных радиопоглощающих материалов предполагается в направлении более глубокого изучения радиопоглощающих свойств магнитных нанокompозитов, многослойных метаматериальных структур сложной геометрии, а также исследования метаматериалов, нагруженных активными или пассивными электронными компонентами. Перспективной технологией практического применения метаматериалов является использование токопроводящих красок [5]. В этом случае нанесение их на диэлектрическую основу может



Рис. 7. Спектральная зависимость коэффициента отражения двухслойной метаматериальной структуры

Fig. 7. Spectral reflection coefficient of two-layered meta-material

быть осуществлено по отработанным технологиям с использованием простого оборудования для распыления красок. К тому же применяемые в судостроительной области технологии нанесения лакокрасочных покрытий сейчас в значительной степени роботизированы.

Средства контроля полей кораблей в верхней полусфере

Tools for above-water ship signature verification

Для выявления «блестящих точек» в природных условиях разработана Система Оперативного Контроля Физических Полей (СОК-ФП) в верхней полусфере с высоким пространственным разрешением. СОК-ФП включает в себя три измерительных модуля (канала) для контроля каждого из полей – радиолокационного, теплового и лазерного. Все они размещены в специально сконструированном фургоне (рис. 8), оснащённом вспомогательными устройствами и системой жизнеобеспечения. Такая компоновка позволяет использовать измерительные модули для их совместной работы на необорудованных полигонах при температурах от -5 до $+40$ °С и при питании от собственного бензогенератора.

Пространственное разрешение каждого канала Комплекса для получения информации о местоположении «блестящей точки» должно быть не хуже 1 м. Тогда для корабля длиной 100 м на 2D-портрете может быть получено более 100 пикселей, несущих количественную информацию о заметности. Для лазерного и ИК-диапазонов данное требование выполняется сравнительно легко. Ширина луча лазера менее 0,5 мрад, что позволяет получить разрешение лучше 1 м на дальности до 2 км. Объективы ИК-тепловизоров (поле зрения до $2,5^\circ$) и матричные приемники (640×480 пикселей) позволяют получить еще более высокое разрешение.

Наиболее проблематично выявление «блестящих» точек в радиолокационном диапазоне. Высокое разрешение по дальности ~ 1 м сравнительно легко достигается в современных радарах благодаря использованию коротких импульсов с длительностью 4–6 нс (на малых дальностях) или сложных сигналов с последующим сжатием (при больших дальностях). Высокое разрешение по крессовой координате (азимуту) можно получить с использованием процедуры инверсного синтеза апертуры (ИСАР), при этом разрешение не зависит от дальности. Для СОК-ФП при измерениях на море уда-



Рис. 8. Комплекс СОК-ФП во время испытаний
Fig. 8. SOK-FP instrumentation system

лось получить разрешение лучше 1×1 м на дальности до 6 км.

Тепловизионный канал

Контроль параметров теплового поля корабля в длинноволновом ИК-диапазоне 8–13 мкм может быть осуществлен с помощью промышленно выпускаемых инфракрасных тепловизоров, например, FLIR A650 и Ti32 фирмы Fluke (рис. 9). Технические характеристики данных приборов приведены в табл. 1. По принципу действия данные приборы относятся к тепловизорам с фокальной ИК-матрицей без оптико-механического сканирования. Их разрешающая способность определяется полем зрения объектива и размером приемной матрицы.

По измеряемым тепловым портретам могут быть сделаны выводы о вкладе таких составляющих, как газовый факел, машинное отделение, кожух дымовой трубы и т.п. Основным параметром, характеризующим тепловое излучение по-

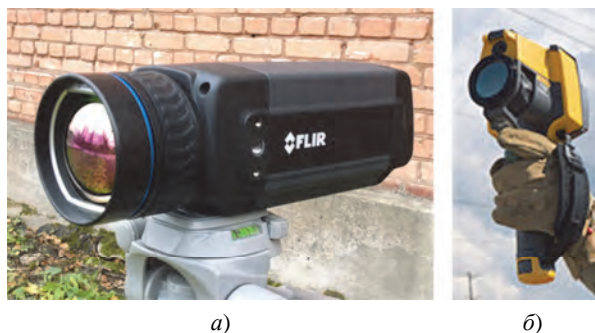


Рис. 9. Тепловизоры: а) FLIR A650; б) Fluke Ti32
Fig. 9. Infrared imagers: a) FLIR A650; b) Fluke Ti32

Таблица 1. Основные технические характеристики тепловизоров

Table 1. Main performance parameters of infrared imagers

Характеристика	FLIR A650	Fluke Ti32
Тип приемника	неохлаждаемый микроболومتر	неохлаждаемый микроболومتر
Размер матрицы, пиксели	640×480	320×240
Спектральный диапазон, мкм	7,5–13	8–14
Температурный диапазон, °С	–20...+2000	–20...+600
Чувствительность	0,05 °С при 30 °С	0,05 °С при 30 °С
Точность, °С	±1,5	±2
Поле зрения, град.	15×11	23×17

верхностей корабля, является температура. Другими параметрами, влияющими на контроль теплового поля корабля, являются:

- параметры окружающей среды: температура, относительная и абсолютная влажность приводного слоя атмосферного воздуха, скорость и направление ветра, атмосферное давление, температура поверхностного слоя воды акватории, солнечная радиация;
- дистанция измерения;
- угол места и курсовой угол на ракурсе наблюдения корабля;
- площади проекций излучающих поверхностей в рассматриваемом направлении;
- спектральные коэффициенты излучения поверхностей;
- спектральные коэффициенты излучения фонов;
- спектральные коэффициенты пропускания атмосферы;

- метеорологическая дальность видимости в атмосфере.

Для уменьшения заметности корабля по тепловому полю, в первую очередь, необходимо обеспечить снижение температурных контрастов его внешних поверхностей относительно морского фона, т.е. на фоне пригоризонтного слоя атмосферы (при наблюдении корабля при углах места, близких к 0°) или на фоне моря (при углах места, близких к 90°). На рис. 10 представлен тепловой портрет буксира.

В комплект аппаратуры для измерения уровня инфракрасного излучения входит обязательное вспомогательное оборудование – контрольный излучатель-макет «абсолютно черного тела» для оперативной экспресс-проверки тепловизионной и радиометрической аппаратуры, а также некоторых видов исследований, когда в поле зрения тепловизора рядом с объектом должно находиться абсолютно черное тело, используемое как эталонный излучатель.



Рис. 10. Тепловой портрет буксира
Fig. 10. Infrared image of a tug



Рис. 11. Лазерный измерительный модуль
Fig. 11. Laser-based instrumentation module

Лазерный канал

Оптиколокационный измерительный модуль (рис. 11) предназначен для измерений на длине волны лазерного излучения 1,06 мкм в условиях морского полигона следующих параметров:

- коэффициент габаритной яркости (КГЯ) объектов;
- 2D-лазерный яркостный портрет в картинной плоскости – распределение КГЯ по силуэту корабля в картинной плоскости (как и для тепловых портретов).

При зондировании объекта измерений импульсами лазерного излучения и двумерном сканировании (азимут × угол места) осуществляется регистрация сигналов, отраженных объектом измерений.

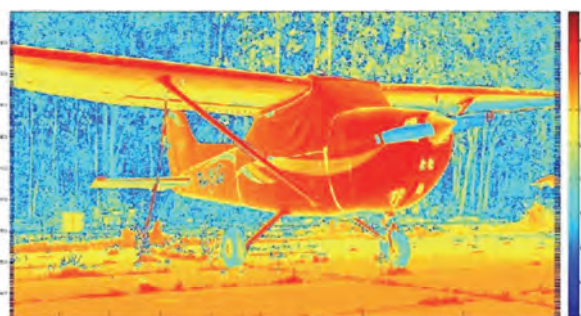
Принятые от объекта лазерные импульсы поступают через оптический сканер на фотоприемник и после преобразования в электрические импульсы попадают через аналого-цифровой преобразователь в блок обработки сигналов. После предварительной обработки и привязки к угловому положению сканера сигналы передаются по сети Ethernet в компьютер для отображения на мониторе (два кадра в секунду) и регистрации на жестком диске. Полученный в ходе измерений оптиколокационный портрет спортивного самолета показан на рис. 12. Основные технические характеристики лазерного модуля приведены в табл. 2.

Радиолокационный канал

Радиолокационный модуль (табл. 3, рис. 13) предназначен для измерения ЭПР морских объектов



а)



б)

Рис. 12. Спортивный самолет: а) фотография; б) оптиколокационный (лазерный) портрет

Fig. 12. A sports aircraft: а) photo; б) lidar image

в трехсантиметровом диапазоне длин волн. Комплекс может функционировать в двух режимах:

- измерение ЭПР с высоким разрешением при длительности зондирующего импульса 4 нс (0,6 м) и реализацией процедуры ИСАР, обес-

Таблица 2. Основные технические характеристики лазерного измерительного модуля

Table 2. Main performance parameters of laser-based instrumentation module

Характеристика	Значение
Длина волны лазера, нм	1064
Номинальная средняя выходная мощность излучения, не менее, Вт	10
Дистанция измерения, км	0,3–3
Угловое разрешение, не более, мрад	1
Размер кадра сканирования «азимут × угол места», град.	6×1,5
Частота оцифровки приемного сигнала, не менее, МГц	40
Разрядность АЦП, бит	14
Дискретизация измерения дистанции, не более, м	3,75
Частота следования импульсов, кГц	20



Рис. 13. Радиолокационный измерительный модуль:
 а) блок управления;
 б) измерительный радар

Fig. 13. Radar-based instrumentation module:
 a) control unit;
 b) instrumentation radar

Таблица 3. Основные технические характеристики радиолокационного модуля

Table 3. Main performance parameters of radar-based module

Характеристика	Значение
Рабочая частота радара, ГГц	9,7 (3,1 см)
Дистанция измерения, км	0,3–5
Поляризация	горизонтальная
Разрешение по дальности, м	0,9
Разрешение по кроссовой координате (за счет ИСАР-процедуры), м	1

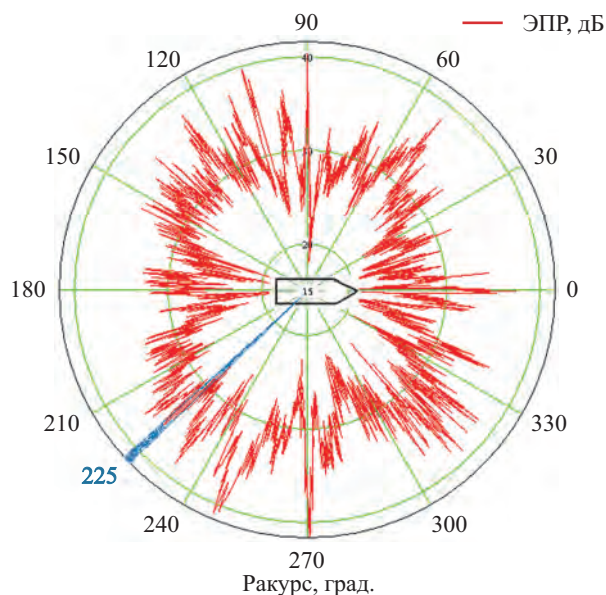


Рис. 14. Полярная диаграмма ЭПР и сектор интегрирования шириной 1° (закрашен голубым цветом), для которого получен ИСАР-портрет

Fig. 14. Polar RCS diagram and ISAR image integration sector (shown in blue) with the thickness of 1

печивающей разрешение по кроссовой координате лучше 1 м.

- измерение интегральной ЭПР при длине импульса 1 мкс (150 м) или 2,4 мкс (360 м), превышающей размеры исследуемого морского объекта.

В состав модуля входит блок управления и измерительный радар. Блок управления – корпус, в котором смонтированы управляющий и вычислительный компьютеры (ПК), блок управления поворотным устройством антенны в азимутальной плоскости, устройство видеозахвата и монитор для отображения видеопотока с камеры, установленной на радаре.

На рис. 14 приведена полярная диаграмма ЭПР корабля класса «фрегат», а на рис. 15 – его ИСАР-портрет при ракурсе около 225° и угле места около $0,1^\circ$, полученный при волнении моря 2 балла. Корабль выполнял циркуляции, и на получение интервала синтезирования по азимуту около 1° (голубой сектор на рис. 14) потребовалось около 0,5 с. ИСАР-портрет, приведенный на рис. 15, «собирается» из 1024 дальностных портретов. В результате получился квадратный элемент разрешения со стороны около 1 м.

Разработанная аппаратура позволяет получить требуемое для идентификации «блестящих точек»

разрешение на длинах волн 3 см (радиолокационный канал), 1,06 мкм (лазерный канал) и 8–12 мкм (тепловизионный канал). Дальнейшая перспектива контроля полей верхней полусферы лежит в расширении поддиапазонов каждого канала. В лазерной локации при существующей элементной базе могут быть добавлены измерительные средства с длинами волн 0,53 и 10,6 мкм. Для тепловизионного канала уже существует аппаратура диапазона 2–5 мкм и возможно дальнейшее смещение диапазона в сторону ультрафиолета.

В части радиолокации станции обнаружения (например, AEGIS) функционируют в диапазоне 2–4 ГГц, длина волны – 10 см. Перспективные противокорабельные ракеты с радиолокационными головками самонаведения «уходят» в К-диапазон (27–40 ГГц, длина волны – 8 мм) для возможности распознавания портрета с высоким разрешением. На рис. 16 показан общий вид измерительных радаров норвежской фирмы ISPAS и итальянской фирмы IDS [6, 7]. В настоящее время такой измерительной базой располагают США, Великобритания и Франция. Работы по изготовлению таких комплексов ведутся в Индии и Китае. Кроме того, новые измерительные комплексы ориентированы на получение 3D-портретов кораблей с высоким разрешением [6]. В этом случае возможно идентифицировать «блестящие точки» не только на чертеже «вид сверху» (рис. 15), но и по высоте над морем (рис. 17).



Рис. 16. Измерительные радары диапазона 2–40 ГГц норвежской фирмы ISPAS (а) и итальянской фирмы IDS (б)

Fig. 16. 2–40 GHz instrumentation radars by ISPAS (Norway, a) and IDS (Italy, b)

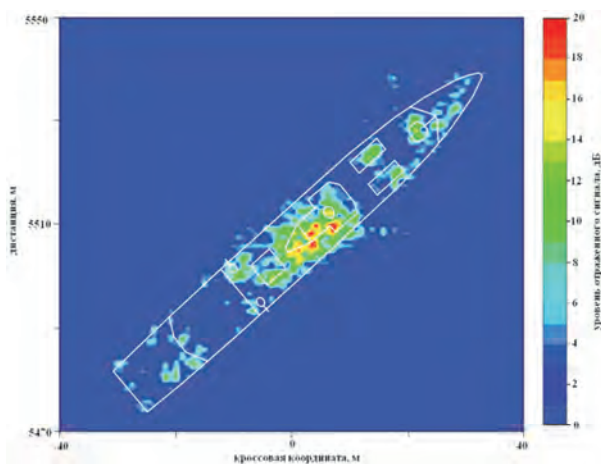


Рис. 15. ИСАР-портрет корабля класса «фрегат» при ракурсе 225°

Fig. 15. ISAR image of a frigate, heading angle 225°



Рис. 17. 3D ИСАР-портрет вспомогательного судна – распределение «блестящих точек» по длине и высоте

Fig. 17. 3D ISAR image of an auxiliary vessel: distribution of “hot spots” by length and height of ship

Библиографический список

1. *Матвеевцев А.В., Патраков Ю.М.* Оптимизация структур конструкционных радиопоглощающих материалов // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2012. № 68(352). С. 87–90.
2. *Лагарьков А.Н., Кисель В.Н., Семенов В.Н.* Радиопоглощающие материалы на основе метаматериалов // Радиотехника и электроника. 2012. Т. 57. № 10. С. 119–1127.
3. *Schurig D., Mock J.J., Justice B.J., Cummer S.A., Pendry J.B., Starr A.F., Smith D.R.* Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies // Science. 2006. Vol. 314. № 5801. P. 977–979.
4. *Щелокова А.В., Мельчакова И.В., Слобожанюк А.В., Янковская Е.А., Симовский К.Р., Белов П.А.* Экспериментальные реализации маскирующих покрытий // Успехи физических наук. 2015. Т. 185. № 2. С. 182–206.
5. *Singh P.K., Mutzel C., Mcnaughton S., Sonkusale S.* In-situ large area fabrication of metamaterials on arbitrary substrates using paint process // Progress in electromagnetic research. 2013. Vol. 141. P. 117–133.
6. *Norland R.* A Turnkey Polarimetric RCS Measurement System. ISPAS AS. URL: www.ispas.no (дата обращения: 01.11.2018).
7. *Carulli V.* Integrated top-side engineering // Sum & Sea – CSSN, 8 Giugno 2010.

References

1. *Matveentsev A., Patrakov Yu.* Structural optimization of radar-absorbing materials // Transactions of Krylov State Research Institute. 2012. No. 68(352). P. 87–90 (in Russian).
2. *Lagarkov A., Kisel V., Semenenko V.* Radar-absorbers based on metamaterials // Journal of Communications Technology and Electronics. 2012. Vol. 57. No. 10. P. 1119–1127 (in Russian).
3. *Schurig D., Mock J.J., Justice B.J., Cummer S.A., Pendry J.B., Starr A.F., Smith D.R.* Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies // Science. 2006. Vol. 314. № 5801. P. 977–979.
4. *Shchelokova A., Melchakova I., Slobozhanyuk A., Yanovskaya E., Simovski C., Belov P.* Experimental realization of invisibility cloaking // Physics – Uspekhi (Advances in Physical Sciences). 2015. Vol. 185. No. 2. P. 182–206 (in Russian).
5. *Singh P.K., Mutzel C., Mcnaughton S., Sonkusale S.* In-situ large area fabrication of metamaterials on arbitrary

substrates using paint process // Progress in electromagnetic research. 2013. Vol. 141. P. 117–133.

6. *Norland R.* A Turnkey Polarimetric RCS Measurement System. ISPAS AS. URL: www.ispas.no (01.11.2018).
7. *Carulli V.* Integrated top-side engineering // Sum & Sea – CSSN, 8 Giugno 2010.

Сведения об авторах

Андреев Александр Юрьевич, начальник сектора ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: 8 (812) 415-47-41. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Матвеевцев Антон Викторович, начальник сектора ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: 8 (812) 415-48-54. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Патраков Юрий Михайлович, к.т.н., ведущий научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: 8 (812) 415-46-73. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Ржевский Алексей Александрович, к.ф.-м.н., начальник лаборатории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: 8 (812) 415-32-60. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

About the authors

Alexandr Yu. Andreev, Head of Sector, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: 8 (812) 415-47-41. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Anton V. Matveentsev, Head of Sector, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: 8 (812) 415-48-54. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Yury M. Patrakov, Cand. Sci. (Eng.), Lead Researcher, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: 8 (812) 415-46-73. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Alexey A. Rzhovsky, Cand. Sci. (Phys.&Math.), Head of Laboratory, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: 8 (812) 415-32-60. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.