

УДК 621.371.029.65

В. П. Дзюба¹, В. Д. Еремка², А. Ф. Зыков³, И. М. Мыщенко²,
О. И. Прокопенко⁴, А. Н. Роечко², Д. В. Роскошный⁵

¹ГП завод «Генератор»

18, ул. Новоконстантиновская, Киев, 04080, Украина

²Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины

12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина

E-mail yeryomka@ire.kharkov.ua

³Отделение гибридных моделирующих и управляющих систем в энергетике

Институт проблем моделирования в энергетике НАН Украины им. Г. Е. Пухова

15, ул. Генерала Наумова, Киев, 03164, Украина

⁴ГП завод «Буревестник»

2, ул. Здолбуновская, Киев, 02081, Украина

⁵Институт телекоммуникаций НТУ «КПИ»

30, пер. Индустриальный 2, Киев, 03056, Украина

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РЛС «БУРЕВЕСТИК» ДЛЯ НАВИГАЦИИ В РАЙОНАХ МИРОВОГО ОКЕАНА С ИНТЕНСИВНЫМ СУДОХОДСТВОМ

Одной из проблем в области распространения радиоволн и радиолокационной техники является создание средств радиолокации для решения навигационных задач в районах Мирового океана с интенсивным судоходством. Украинская радиоэлектронная промышленность имеет большой опыт в разработке радиолокационных систем различного назначения, одной из которых, например, является радиолокационная станция (РЛС) «Буревестник». Эта РЛС применяется для контроля надводной обстановки на постах наблюдения военно-морских и пограничных служб Украины. Другим возможным применением упомянутой РЛС может быть ее использование в районах Мирового океана для навигации. Целью данной работы является оценка и иллюстрация возможности эффективного применения РЛС «Буревестник» для навигации в этих районах, определение статистических функций распределения дальности действия РЛС при различных эффективных площадях рассеивания (ЭПР) надводных объектов и различных условиях распространения радиоволн сантиметрового (см) диапазона. Для решения этой проблемы использована база данных множителя ослабления радиоволн см диапазона, созданная ИРЭ НАН Украины по результатам экспериментальных радиофизических исследований. Определены статистические функции распределения дальности действия РЛС «Буревестник» при ЭПР надводных объектов $\sigma = 100, 1\,000, 10\,000\text{ м}^2$ в различных по метеорологическому режиму районах Мирового океана. Проведено сопоставление с экспериментальными исследованиями, в которых использовались стационарные навигационные РЛС «Дон», «Наяда», «МРЛ-5». Сделан вывод, что созданная в Украине современная РЛС может служить базовой моделью при разработке ряда новых модификаций навигационных РЛС.

Ключевые слова: распространение радиоволн, множитель ослабления, дальность действия РЛС, статистические функции распределения.

Расширение районов действия ВМС привело к необходимости исследования особенностей распространения радиоволн над поверхностью океанов [1]. Стимулом к проведению исследований послужили также эффекты сильных аномалий распространения радиоволн над обширными водными поверхностями, обнаруженные еще в период Второй мировой войны. Отмечалось, что в случае распространения электромагнитных волн в приводном волноводе уровень принимаемых сигналов был близок к уровню сигналов в свободном пространстве. Причем волноводные эффекты проявлялись сильнее на более высоких частотах сантиметрового (см) диапазона. Следует отметить, что исследованию распространения радиоволн над морской водной поверхностью в Украине уделяется большое внимание и к настоящему времени создан банк данных по результатам исследований в районах Мирового океана [2]. Украинская радиоэлектронная промышленность имеет большой опыт в разработке радиолокационных систем различного назначения.

В 2002–2004 гг. инженерно-технический состав Киевского государственного завода «Буре-

вестник» принимал активное участие в разработке отечественной современной радиолокационной станции (РЛС) «Буревестник-1» [3]. Разработку и создание серийного магнетронного источника электромагнитного излучения X-диапазона для передатчика станции осуществили Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАНУ (ИРЭ НАНУ), СКБ «Спектр» и завод «Генератор» Министерства промышленной политики Украины [4]. В разработке системы управления РЛС и программного продукта активное участие принимали сотрудники отделения гибридных моделирующих и управляющих систем в энергетике Института проблем моделирования в энергетике НАНУ им. Г. Е. Пухова и НИИ телекоммуникаций НТУ «КПИ». Разработка завершилась созданием и изготовлением опытного образца, приобретен опыт создания современных конкурентоспособных РЛС различного назначения.

В 2004 г. опытный образец РЛС прошел начальную стадию войсковых испытаний на базе Севастопольского отряда морской охраны Украины. В 2004–2005 гг. проведены войсковые испытания РЛС «Буревестник-1» на базе постов

технического наблюдения Одесского и Симферопольского пограничных отрядов. Подтверждено, что технико-экономические показатели РЛС «Буревестник-1» находятся на уровне поставленных требований и лучших зарубежных аналогов. С 2007 г. РЛС «Буревестник-1» помогает осуществлять контроль надводной обстановки на постах наблюдения военно-морских и пограничных служб Украины [5].

РЛС «Буревестник-1» предназначена для установки на постах технического наблюдения за надводной обстановкой. По своим тактико-техническим характеристикам она может работать в единой системе радиолокационного и оптико-электронного контроля и наблюдения за надводной обстановкой. Другим возможным применением упомянутой РЛС может быть ее использование при решении навигационных задач в районах Мирового океана с интенсивным судоходством.

Целью данной работы является оценка и иллюстрация возможности эффективного применения РЛС «Буревестник» для навигации в районах Мирового океана с интенсивным судоходством, определение статистических функций распределения дальности действия РЛС при различных эффективных площадях рассеяния (ЭПР) надводных объектов и различных условиях распространения радиоволн см диапазона.

1. О предельной дальности действия РЛС. Увеличение интенсивности судоходства, а также необходимость решения прикладных задач радиолокации требовало продолжения упомянутых исследований. В период с 1976 по 1992 гг. ИРЭ НАНУ и СКТБ ИРЭ НАНУ проводили регулярные экспериментальные исследования распространения радиоволн в ряде районов Мирового океана. Результаты этих радиофизических исследований, использованные в данной статье, получены в пяти отличающихся метеорологических условиях районах Мирового океана (рис. 1). Были получены важнейшие характеристики трасс распространения радиоволн – дистанционные зависимости множителя ослабления сигналов.

Как известно [2], множитель ослабления радиоволн определяется соотношением

$$V(r) = 10 \log \frac{P(r)}{P_0(r)}, \quad (1)$$

где P – мощность сигнала на входе приемника, принимаемого в реальных условиях; P_0 – мощность сигнала, который был бы принят приемником в свободном пространстве; r – расстояние.

Результаты проведенных экспериментальных радиофизических исследований позволили создать базу данных дистанционных зависимостей множителя ослабления радиоволн и пакет прикладных программ [3]. Пакет прикладных программ

обеспечивает поиск в базе данных массивов информации с заданными параметрами. Для ускорения процесса поиска созданы вспомогательные индексные файлы. Они содержат сведения о дате проведения исследований в определенном районе Мирового океана, а также о числе массивов, записанных в течение этого времени. Существует режим работы программы, позволяющий рассчитать дальность обнаружения надводных объектов с заданной ЭПР при определенных метеорологических условиях и параметрах радиолокационной системы (мощности передатчика, чувствительности приемника, длине волны, коэффициенте усиления антенны).

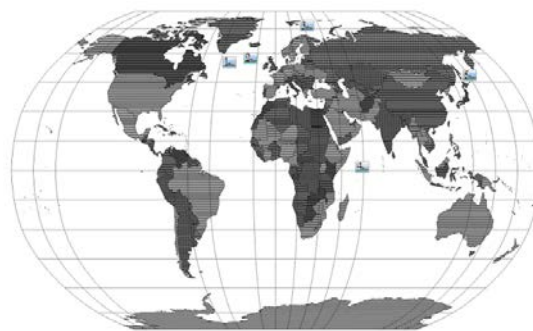


Рис. 1. Районы радиофизических исследований

Для определения предельных дальностей $r_{\text{пред}}$ действия РЛС необходимо решить систему уравнений (2)

$$\begin{cases} V(r) = 10 \log \frac{P(r)}{P_0(r)} \\ V_{\text{пред}}(r) = \sqrt{\frac{r_{\text{пред}}^4 (4\pi)^3 P_{\text{ш}}}{P_{\text{изл}} G^2 \lambda^2 \sigma}} \end{cases} \quad (2)$$

где первое уравнение представляет собой экспериментальные зависимости множителя ослабления поля прямого сигнала от расстояния и содержится в базе данных для каждого из исследованных районов, а второе – зависимость предельного значения множителя ослабления $V_{\text{пред}}$, при котором возможно обнаружение цели на данном расстоянии $r_{\text{пред}}$ и заданной ЭПР; $P_{\text{изл}}$ – мощность, излучаемая передатчиком; G – коэффициент усиления антенны; λ – рабочая длина волны; $P_{\text{ш}}$ – мощность собственных шумов приемника; σ – ЭПР надводного объекта.

Предельным расстоянием $r_{\text{пред}}$ считают расстояние, на котором отраженный от объекта сигнал $P_{\text{отр}}$ становится равным мощности $P_{\text{ш}}$ собственных шумов приемника. Зная параметры РЛС «Буревестник» и используя базу данных

множителей ослабления радиоволн см диапазона, можно определить дальность действия указанной станции для всех исследованных районов Мирового океана при различных условиях распространения радиоволн и различных ЭПР объектов. Кроме этого, можно определить статистические функции распределения, характерные для каждого района.

Следует отметить, что РЛС «Буревестник-1» послужила базовой моделью, которая после незначительных доработок позволила создать ряд ее модификаций – РЛС «Буревестник-2», РЛС «Буревестник-3», а также РЛС «Буревест-

ник-4» – с электронно- картографической информационной системой (ЭКИС).

2. РЛС «Буревестник-2». Блок-схема РЛС «Буревестник-2», предназначенной для решения навигационных задач, представлена на рис. 2. В состав РЛС входят:

– антенная система под радиопрозрачным обтекателем (антенный пост), совмещенная с приемопередатчиком, представляет собой единый СВЧ-модуль – прибор 1П-132 (рис. 3);

– индикатор с пультом управления и спецвычислителем, системой питания, запуска синхронизации и контроля – прибор 1П-54 (рис. 4).

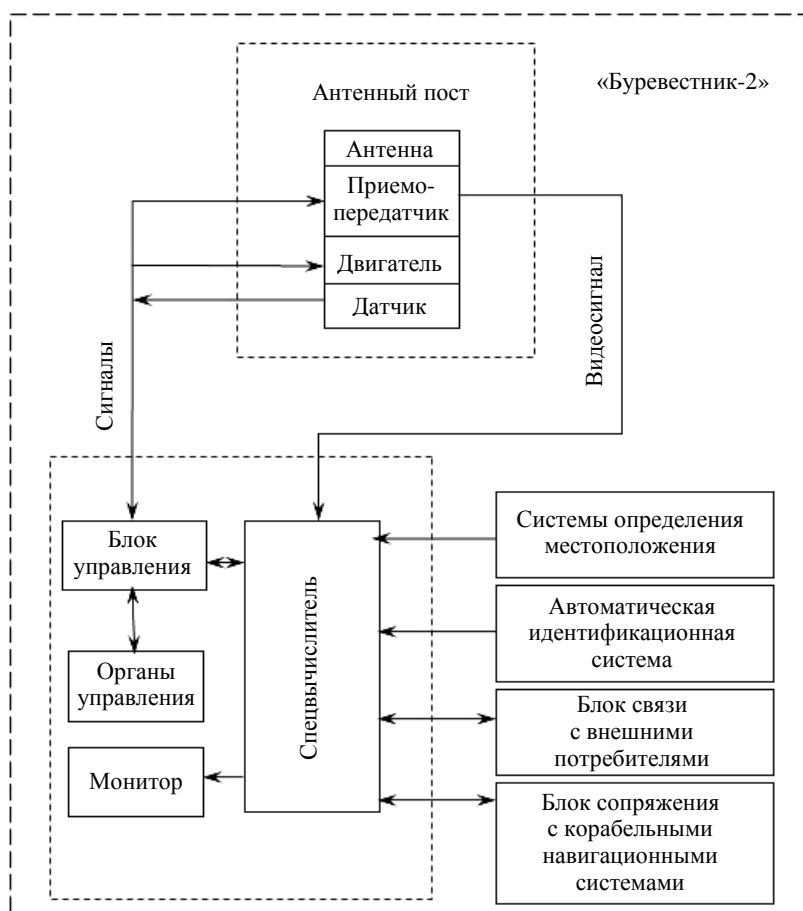


Рис. 2. Блок-схема РЛС «Буревестник-2»



Рис. 3. Прибор 1П-132



Рис. 4. Прибор 1П-54

Сердцем передатчика РЛС «Буревестник-2» является магнетрон «Буто́н» [4]. Его успешная разработка, выполненная учеными ИРЭ НАНУ совместно с инженерно-техническими работниками СКБ «Спектр» Министерства промышленной политики Украины, доведена до серийного производства на Киевском государственном предприятии – заводе «Генератор».

Магнетрон «Буто́н» (рис. 5) имеет холодный катод, содержащий два эмиттера – основной вторично-электронный эмиттер (ВЭЭ) – источник рабочего тока, и дополнительный лезвийный полевой эмиттер (ПЭ) – источник первичных электронов [6, 7].

Отметим особенности генерации первичных и вторичных электронов с помощью представленной схемы холодного катода (ХК). В схеме конструкции ХК (рис. 6) полевая эмиссия (автоэмиссия) реализуется при подаче импульсов высоковольтного рабочего напряжения между анодом и катодом магнетрона.

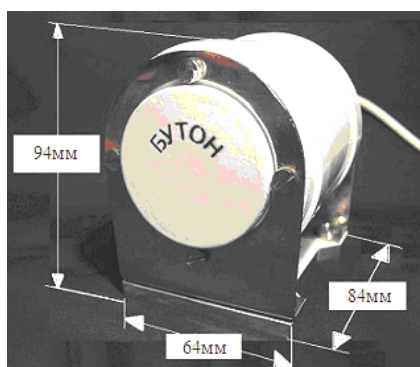


Рис. 5. Внешний вид пакетированного коаксиального магнетрона X-диапазона «Буто́н» с холодным катодом

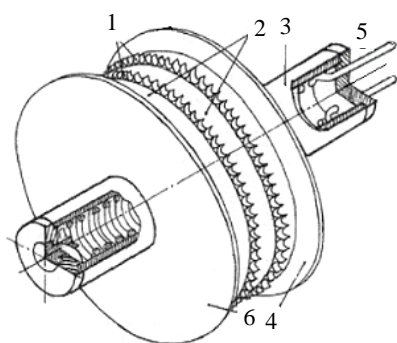


Рис. 6. Схема узла холодного катода: 1 – лезвийные элементы ПЭ; 2 – шайбы ВЭЭ; 3 – керн катода; 4, 6 – фланцы-экраны; 5 – технологический подогреватель

При достижении величины напряженности электрического поля на рабочей поверхности ПЭ значения $(3 \div 5) \cdot 10^7$ В/см начинается процесс туннелирования (автоэмиссии) первичных электронов. Выделим причины, определяющие нестабильный запуск процесса генерации электромаг-

нитных колебаний магнетроном при использовании ХК, конструкция которого выполнена по указанной схеме. Одной из важных причин является отсутствие на кромках дисков 1 ПЭ напряженности электрического поля, которая была бы достаточной для обеспечения стабильной полевой эмиссии электронов. Другая важная причина обусловлена тем, что кинетическая энергия первичных электронов $E_{кин} = eV$ (e – заряд электрона, V – разность потенциалов между анодом и катодом) недостаточна для запуска эффективного процесса вторично-электронного размножения (ВЭР), если учесть тот факт, что элементы 1, 2 ПЭ и ВЭЭ находятся под одним потенциалом. В скрещенных статических электрическом и магнитном полях вылетевшие с поверхности ВЭЭ частицы совершают циклоидальное движение. При этом электроны, возвращающиеся на поверхность ВЭЭ, бомбардируют ее с той энергией, с которой они покинули эту поверхность. Энергия электронов, покидающих поверхность эмиттера, составляет:

- для термокатодов – до 5 эВ;
- для вторично-эмиссионных катодов – до 10 эВ;
- для полевых эмиттеров – меньше 5 эВ.

Схема ХК магнетрона «Буто́н» обеспечивает энергию первичных электронов, достаточную для запуска процессов ВЭР, в частности, при подаче тандема импульсов. Первый вспомогательный импульс имеет длительность в 3 раза большую, чем 70-нс импульс рабочего напряжения, и амплитуду меньшую, чем амплитуда рабочего напряжения. Можно предположить, что в этом случае автоэмиссионный процесс (туннелирование электронов) с рабочих поверхностей лезвийных элементов ПЭ обеспечивает создание в пространстве между анодом и катодом «начальной» плотности пространственного заряда (ППЗ), которая запускает процесс ВЭР при спаде вспомогательного импульса. Процесс ВЭР электронов в таких эмиссионных системах при возрастании величины ППЗ до значения 3...5 % плотности рабочего тока запускается также под действием сил Кулона. При возбуждении автоколебаний процесс ВЭР лавинообразно нарастает под действием ВЧ-поля. В упомянутой схеме конструкции ХК элементы 1 ПЭ, расположенные в пространстве взаимодействия, постоянно находятся под действием факторов, которые уменьшают срок службы пленочных ПЭ (электрокоррозия, пондеромоторные силы), следовательно, и магнетрона в целом. Таким образом, для успешного запуска процесса ВЭР, электроны должны получить некоторую «добавку» кинетической энергии. Эту «добавку» энергии можно обеспечить за счет дополнительного источника или при движении частиц в неоднородном электрическом поле.

Анодный блок коаксиального магнетрона «Буто́н» X-диапазона содержит резонаторную

систему из 30 лопаточных резонаторов, связанных традиционным способом со стабилизирующим резонатором, и волноводный вывод высокочастотной энергии в нагрузку. На керне 3 ХК закреплены элементы ПЭ 1 и ВЭЭ 2. Подогреватель 5 предназначен для технологических операций – удаления газов, поглощенных керном и элементами ВЭЭ и ПЭ, а также активации элементов упомянутых эмиттеров. Магнетрон пакетирован с магнитной системой постоянных магнитов из сплава самария и кобальта.

Рабочее напряжение магнетрона в передатчике обеспечивает модулятор, построенный на твердотельных элементах.

В передатчиках РЛС «Буревестник» («Буревестник-1», «Буревестник-2», «Буревестник-4») магнетрон импульсный (МИ) «Бутон» продемонстрировал свои высокие эксплуатационные характеристики. В настоящее время наработка импульсных магнетронов до отказа составляет более 20 000 ч.

Основные энергетические параметры импульсных магнетронов коаксиальной конструкции с ХК (МИ «Бутон») приведены в табл. 1.

Таблица 1
Энергетические параметры МИ «Бутон»

Энергетические параметры	МИ «Бутон»
Выходная мощность, кВт	25
Напряжение анода, кВ	8
Ток анода в импульсе, А	7,5
Длительности импульса, мкс	0,05...6,0
Минимальная скважность	500
Длительность переднего фронта модулирующего импульса, мкс	0,02...0,2
Гарантируемый срок службы, ч	5 000

Отметим также следующие параметры РЛС «Буревестник-2». Несущая частота передатчика 9 430 МГц, излучаемая импульсная мощность 18 кВт. Антенна длиной 1 500 мм (рис. 7) – щелевая, обеспечивает горизонтальную поляризацию. Коэффициент усиления антенны 900. Для изготовления обтекателя антенны применены новые технологии и материалы.

Приемный модуль «Океан» в гибридно-интегральном исполнении является приемником супергетеродинного типа с улучшенной линейно-логарифмической характеристикой коэффициента усиления с цифровым управлением режимами работы. В зависимости от длительности зондирующего импульса 0,07; 0,25; 0,8 мкс применяется три полосы пропускания. При этом чувствительность составляет:

- при полосе 18 МГц – не менее 128 дБ/Вт;
- при полосе 6 МГц – не менее 132 дБ/Вт;
- при полосе 3 МГц – не менее 136 дБ/Вт.



Рис. 7. Щелевая антенна РЛС «Буревестник-2»

Зная параметры станции, определим ее энергетический потенциал C

$$C = \frac{P_{\text{изл}} G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 P_i} = 176 \text{ дБ} \cdot \text{м}^2. \quad (3)$$

Индикаторный блок состоит из 19" ЖК монитора, пульта управления, устройства питания, устройства синхронизации и запуска.

Спецвычислитель РЛС «Буревестник-2» представляет собой совокупность аппаратно-программных средств, обеспечивающих прием и дальнейшую обработку сигналов, поступающих с приемного модуля, а также отображение результатов обработки на экране монитора. Управление режимами работы вычислителя и РЛС осуществляет оператор с помощью блока управления. Первичная и вторичная обработка радиолокационной информации осуществляется в соответствующих функциональных блоках спецвычислителя. Конструктивно данные блоки выполнены отдельно, межблочный обмен организован по каналу *Ethernet*.

Блок первичной обработки решает следующие задачи:

- управление режимами работы передатчика (длительностью и частотой зондирующих импульсов, сектором излучения);
- аналогово-цифровое преобразование видеосигнала, поступающего из приемного модуля;
- корреляционная и пространственно-временная обработка видеосигнала;
- формирование и выдачу потока данных для блока вторичной обработки;
- устойчивое сопровождение не менее 50 надводных целей;
- отображение малоразмерных целей;
- решение тактических и навигационных задач;
- передача информации пользователю о сопровождаемых целях по стандартным каналам связи.

Данные по каналу *Ethernet* поступают в блок вторичной обработки, который осуществляет:

- траекторные измерения;
- решение тактических задач (измерение расстояния между объектами, наведение на цель; расчет координат точки встречи движущихся

объектов и времени их прихода в эту точку (решение задачи «перехват»);

– отображение на мониторе РЛС надводной обстановки и результатов решения тактических задач (решение тактических задач отображает в цифробуквенном и графическом видах с наложением на надводную обстановку) (рис. 8);

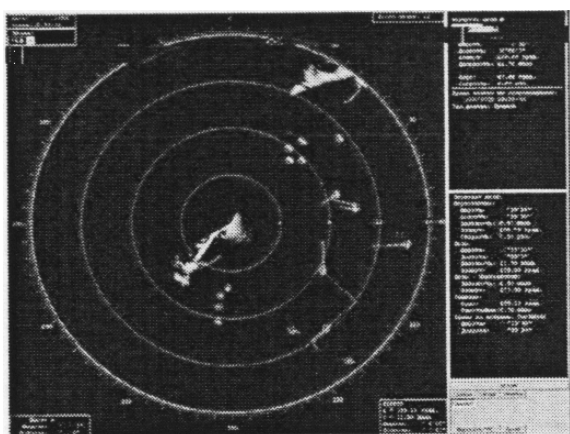
– архивирование и хранение данных о сопровождаемых надводных объектах;

– прием информации от блока управления о действиях оператора и формирование управляющих воздействий с последующей передачей в блок первичной обработки;

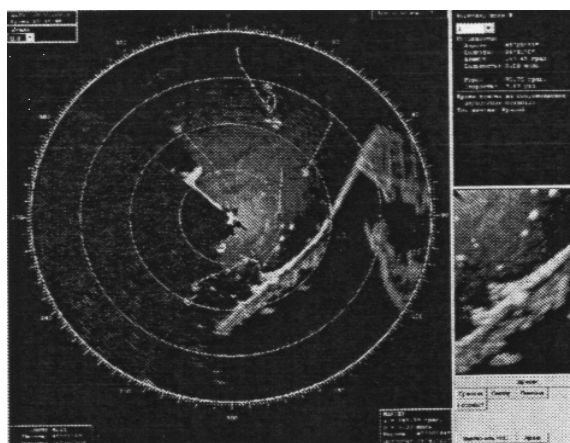
– регистрацию данных о работоспособности основных узлов РЛС;

– формирование и хранение дополнительных (вспомогательных) графических элементов (охраняемая зона и т. д.);

– формирование и выдачу по каналу *Ethernet* удаленным пользователям информации о сопровождаемых надводных объектах и надводной обстановке.



а)



б)

Рис. 8. Отображение на мониторе РЛС надводной обстановки: а) – секторный обзор б) – круговой обзор в сложных метеоусловиях

Блок управления обеспечивает анализ и обработку информации о состоянии органов управления, расположенных на панели оператора. На основе этой информации формируются управляющие данные, которые передаются в вычислитель. Кроме того, с помощью блока управления выполняются:

– оперативный контроль функционирования основных узлов РЛС и передача данных о сбоях ее работоспособности в спецвычислитель;

– формирование звуковых сигналов при изменении состояния сопровождаемых целей (автоматическое взятие цели на сопровождение при пересечении границы охраняемой зоны, потеря сопровождаемого надводного объекта).

Предусмотрена возможность работы спецвычислителя РЛС «Буревестник-2» в составе электронно-картографических систем (ЭКИС). Одна из таких систем уже более 2-х лет эксплуатируется на острове Змеиный, откуда данные о надводной обстановке передаются в систему «ГАРТ-12» государственной пограничной службы.

Функциональные возможности спецвычислителей позволяют использовать РЛС «Буревестник» в автономном режиме. При этом удаленное управление станциями, информация о надводной обстановке и диагностическая информация передаются пользователям по внешним сетям *Ethernet*.

Прибор ИП-54-1 (рис. 9) с системой ЭКИС входит в состав РЛС «Буревестник-4». Такая РЛС обеспечивает:

– радиолокационное отображение надводной обстановки, в том числе в сложных метеоусловиях;

– обзор пространства до 64 миль с отображением на девяти шкалах дальности;

– отображение информации на цветном 19" ЖК-мониторе;

– автоматический и ручной захват целей на автосопровождение;



Рис. 9. Прибор ИП-54-1 (в составе РЛС «Буревестник-4»)

- устойчивое сопровождение не менее 50 надводных целей;
- отображение малоразмерных целей;
- решение тактических и навигационных задач;
- передача информации пользователю о сопровождаемых целях по стандартным каналам связи;
- подключение к корабельным системам и приборам навигации по согласованным интерфейсам;
- архивация данных о сопровождаемых, целях не менее 48 ч.

ЭКИС позволяет:

- принимать информации от САПР и GHS;
- осуществлять информационный обмен с приемопередатчиком АИС;
- использовать электронные навигационные карты, поставляемые в формате S-57/3;
- корректировать карты охраняемой зоны;
- отображать параметры электронных карт в системе координат WGS-84.

3. Статистические функции распределения дальности действия РЛС. Рассмотрим графический пример определения дальности действия РЛС «Буревестник» с использованием базы данных и системы уравнений (2), которое выполняется при специальном режиме работы программы. На рис. 10 представлены зависимости $V_{\text{пред}}f(r)$ (2) при различных ЭПР надводных объектов $\sigma = 100, 1\ 000, 10\ 000\ \text{м}^2$.

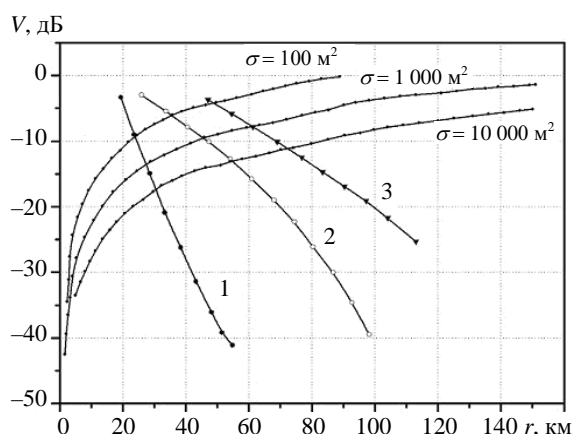


Рис. 10. Зависимости предельного значения множителя ослабления от расстояния при $\sigma = \text{const}$

Кроме этого, из базы данных взяты дистанционные зависимости $V(r)$ 1, 2, 3, полученные в северных районах Атлантического океана. Зависимость 1 соответствует неблагоприятным условиям распространения радиоволн и большому дистанционному затуханию сигнала (отсутствует эффект приводного волновода). Зависимость 2 соответствует наличию невысокого волновода испарения и среднему дистанционному затуханию сигнала. Зависимость 3 имеет место при

волноводном распространении радиоволн и малом затухании сигналов.

Точки пересечения зависимостей предельного значения множителей ослабления $V_{\text{пред}}f(r)$ при $\sigma = \text{const}$ и реальных дистанционных зависимостях множителя ослабления $V(r)$ и дадут нам значения дальностей действия РЛС «Буревестник» для соответствующих условий радиоволн (графическое решение системы уравнений (2)). Полученные значения дальности действия РЛС «Буревестник» представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значения дальности действия РЛС «Буревестник»

$\sigma, \text{м}^2$	100	1 000	10 000
$r_{\text{пред}}(1), \text{км}$	23	26	30
$r_{\text{пред}}(2), \text{км}$	35	45	55
$r_{\text{пред}}(3), \text{км}$	48	62	75
$r_{\text{пред}}$ (сверх-рефракция), км	≈90	>150	>150

В условиях сверхрефракции, когда распространение радиоволн происходит с ослаблением, близким к ослаблению свободного пространства, дальности действия РЛС «Буревестник» могут быть существенно выше. Ориентировочные значения для этого случая также представлены в табл. 2. Однако следует иметь в виду, что при увеличении расстояния отраженный от надводного объекта сигнал может уменьшаться ниже уровня собственных шумов, а затем вновь их превышать и появляться на экране РЛС.

На рис. 11–15 приведены статистические функции распределения дальностей действия РЛС «Буревестник», определенные с использованием базы данных и описанной выше методики для Атлантического океана (районы № 1, 2 на рис. 1), Северного Ледовитого океана (Норвежское море, район № 3 на рис. 1), Индийского океана (район № 4 на рис. 1) и Тихого океана (Охотское море, Японское море, район № 5 на рис. 1). Для сравнения на рисунках приведены зависимости дальности действия, полученные в экспериментальных исследованиях, с использованием установленных на судах навигационных РЛС 3-см диапазона «Дон», «Наяда» и метеорологической РЛС «МРЛ-5». Энергопотенциал перечисленных станций составляет: РЛС «Дон» – 164 дБ, «Наяда» – 168 дБ, «МРЛ-5» – 214 дБ [8]. Как видно из рисунков, предполагаемая дальность действия РЛС «Буревестник» с вероятностью, близкой к единице, лежит в пределах 30...32 км (ЭПР надводного объекта не менее $1\ 000\ \text{м}^2$) во всех исследованных районах Мирового океана и соответствует наиболее неблагоприятным условиям распространения радиоволн см диапазона. Следует подчеркнуть, что нами не

рассматривается зона интерференции, где при определенных соотношениях высоты установки антенны РЛС и высоты надводного объекта и его размеров возможны сильные флуктуации отраженного сигнала при изменении расстояния. На рис. 11 при сопоставлении кривой 3 (экспериментальные данные, полученные с помощью РЛС «Дон») и кривой 2 (РЛС «Буревестник-2»), определенной с использованием базы данных), видно, что они, достаточно близки. При неблагоприятных условиях распространения радиоволн разница в энергопотенциалах РЛС сказывается мало, а затем при улучшении условий распространения радиоволн и увеличении дальностей действия кривые 2 и 3 существенно отличаются.

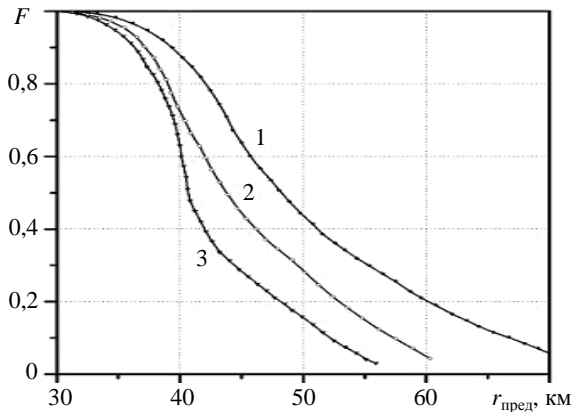


Рис. 11. Статистические функции распределения дальности действия РЛС. Северо-Западная Атлантика: 1, 2 – РЛС «Буревестник-2»; 3 – РЛС «Дон» ($1 - \sigma = 10\,000\text{ м}^2$, $2,3 - \sigma = 1\,000\text{ м}^2$)

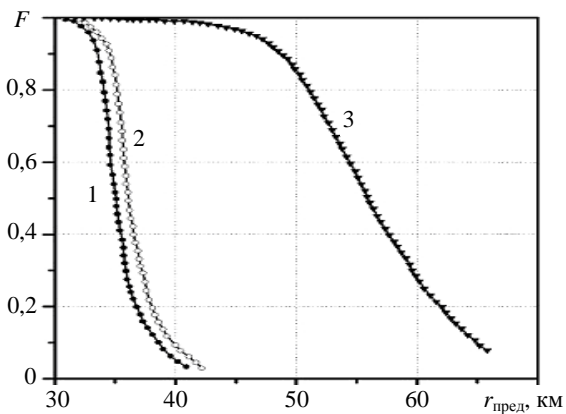


Рис. 12. Статистические функции распределения дальности действия РЛС. Норвежское море: 1 – РЛС «Дон»; 2 – РЛС «Буревестник-2», 3 – РЛС «МРЛ-5» ($\sigma = 1\,000\text{ м}^2$)

При этом вероятность появления аномальных условий распространения радиоволн уменьшается. Наиболее неблагоприятные условия распространения радиоволн имеют место в Северном Ледовитом океане. На рис. 12 представлены функции распределения дальностей действия РЛС «Дон» (экспериментальные данные, кривая 1) и функции распределения дальностей действия РЛС «Буревестник», полученные с использованием ба-

зы данных. Видно, что они почти не отличаются. РЛС «Буревестник» имеет незначительное преимущество за счет большего энергопотенциала. При существенном увеличении энергопотенциала можно добиться лучших результатов. На рис. 12 показана функция распределения дальностей действия РЛС «МРЛ-5» с энергопотенциалом 214 дБ (экспериментальные данные). Такой энергопотенциал характерен для горизонтальных РЛС, а не для навигационных. В Северо-восточных районах Атлантического океана (рис. 13) условия распространения радиоволн лучше, чем в Северном Ледовитом океане, и вероятность появления аномальных условий распространения радиоволн больше. Наиболее благоприятные условия из исследованных районов наблюдаются в Индийском океане. К сожалению, мы не смогли использовать при исследованиях в Индийском океане РЛС «Дон». На рис. 14 представлены функции распределения 1 – РЛС «Буревестник» и 2 – РЛС «МРЛ-5», определенные с использованием базы данных множителей ослабления радиоволн.

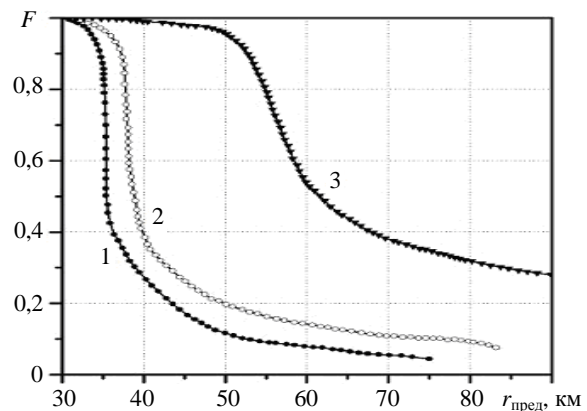


Рис. 13. Статистические функции распределения дальности действия РЛС. Северо-Восточная Атлантика: 1 – РЛС «Дон»; 2 – РЛС «Буревестник-2»; 3 – РЛС «МРЛ-5» ($\sigma = 1\,000\text{ м}^2$)

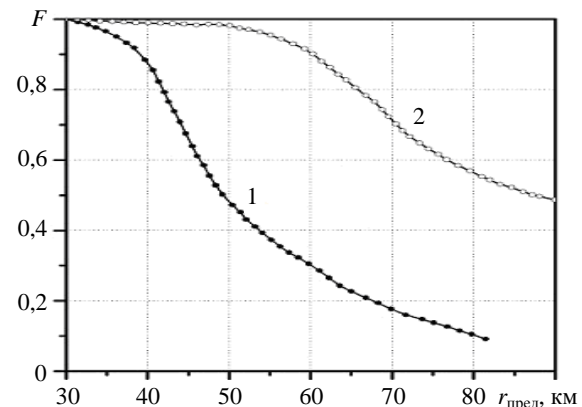


Рис. 14. Статистические функции распределения дальности действия РЛС. Индийский океан: 1 – РЛС «Буревестник-2»; 2 – РЛС «МРЛ-5»

На рис. 15 представлены экспериментальные зависимости, полученные в районах Ти-

хого океана на РЛС «Наяда», которая близка по параметрам к РЛС «Буревестник».

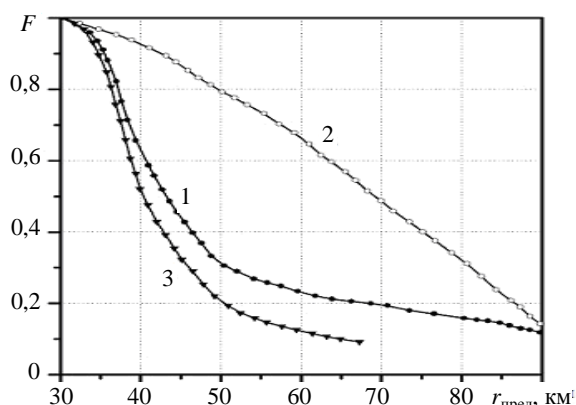


Рис. 15. Статистические функции распределения дальности действия РЛС «Наяда»: 1 – Охотское море; 2 – Японское море (август-сентябрь); 3 – Тихий океан

Эти районы Тихого океана отличаются многообразием условий распространения радиоволн. Японское море в летний период имеет благоприятные условия подобные условиям Черного моря. Дальность действия РЛС «Буревестник» в местах установки на Черном море определяется спецификой распространения радиоволн над его поверхностью, которая существенно отличается от исследованных районов Мирового океана. Черное море является внутренним морем, и на пространственно-временное распределение коэффициента преломления тропосферы влияет близость суши и наплыв воздушных масс с ее поверхности. Это приводит к тому, что практически всегда над поверхностью Черного моря существуют инверсионные слои с большой протяженностью. В летнее время они располагаются вблизи поверхности воды [9], образуя максимум на высотах 200...300 м, причем над морской поверхностью может существовать один или два устойчивых слоя. Кроме того, как и на океанских траассах в приводном слое характерно наличие волновода испарения. Эксперименты показывают, что вероятность появления сверхрефракции возрастает в летнее время (максимальное значение 67 %) и остается достаточно высокой в осенний период. Отрицательная рефракция встречается редко – в основном в зимнее и весеннее время.

В районе Солнечной долины на Черном море в осенний период 1983 г. были проведены экспериментальные исследования дальности действия РЛС «Волна», установленной на высоте 22 м и близкой по параметрам к РЛС «Дон». Диапазон дальностей действия РЛС «Волна» составляет 28...47 км. В отдельных случаях дальность действия достигала 70 км.

Выводы. Созданная ИРЭ НАНУ база данных экспериментальных дистанционных зависимостей множителя ослабления радиоволн в различных по метеорологическому режиму рай-

онах Мирового океана и пакет прикладных программ позволяет оценить возможности применения РЛС «Буревестник» для навигации и получить функции распределения дальностей действия радиолокатора при различных ЭПР надводных объектов и различных условиях распространения радиоволн см диапазона.

При наиболее неблагоприятных условиях распространения радиоволн см диапазона, которые наблюдаются в Северном Ледовитом океане (Норвежское море), с помощью РЛС «Буревестник» можно контролировать с вероятностью, близкой к 1, перемещение надводных объектов с ЭПР $\sigma = 1\,000\text{ м}^2$ на расстояниях до 30 км, что достаточно для решения навигационных задач. Увеличение энергопотенциала РЛС в этих случаях не приведет к существенному увеличению дальности ее действия. Антенну РЛС «Буревестник» на судне для районов с такими условиями распространения радиоволн необходимо устанавливать как можно выше.

Для других исследованных районов с благоприятными условиями распространения радиоволн дальность действия РЛС «Буревестник» с достаточно высокой вероятностью (0,4...0,9) будет лежать в пределах 30...50 км ($\sigma = 1\,000\text{ м}^2$), а при аномальных условиях распространения радиоволн дальность ее действия будет достигать нескольких радиогоризонтов. В таких условиях целесообразно установить две антенные системы: одну на высоте нескольких метров над уровнем моря, а другую как можно выше. Это даст возможность эффективно использовать волновод испарения, а при его отсутствии пользоваться высокорасположенной антенной.

Созданная в Украине современная РЛС может служить базовой моделью при разработке ряда новых модификаций. Ее блок-схема содержит ряд новых технических решений, в частности:

- систему питания станции, с мощностью потребления не более 230 Вт;
- вентильный индукторный двигатель с относительно малым числом оборотов и значительным моментом на валу, что позволило исключить многозвенный редуктор и повысить надежность работы антенного привода, существенно снизить затраты электроэнергии и повысить точность позиционирования антенны [5];
- цифровое управление совмещенными приемопередатчиком и антенным постом, что позволило увеличить до 70 м протяженность кабельной сети, соединяющей их с индикатором, и обеспечить конкурентоспособные параметры по сравнению с лучшими зарубежными аналогами (например, чувствительность приемного устройства не хуже 136 дБ);
- разработанное программное обеспечение позволяет значительно расширить область применения РЛС, улучшить ее параметры без увеличения стоимости антенны;

– магнетрон с холодным катодом в передатчике РЛС обеспечивает наработку до отказа более 20 000 ч.

РЛС «Буревестник» может быть применена в качестве эффективного навигационного радара на судах, курсирующих в районах Мирового океана с интенсивным судоходством.

Библиографический список

1. *Радиофизические исследования Мирового океана: сб. науч. тр./ Ин-т радиофизики и электрон. АН Украины. – Х., 1992. – 220 с.*
2. *Исследование распространения радиоволн УКВ-диапазона в районах Мирового океана / В. Л. Костина, И. М. Мыщенко, А. Н. Роевко, С. И. Хоменко // Электромагнитные волны и электромагнитные системы. – 2009. – 14, № 10. – С. 41–53.*
3. *Современная РЛС «Буревестник-1» для контроля надводной обстановки на постах наблюдения военно-морских и пограничных служб / В. Д. Еремка, В. П. Дзюба, А. Ф. Зыков и др. // Арсенал-XXI. – 2010. – № 1–4. – С. 46–50.*
4. *Yeryomka V. D. Coaxial cold-cathode magnetron / V. D. Yeryomka, V. P. Dzyuba // IEEE Intern. Vacuum Electronics Conf. (IVEC'2004): conf. dig. – Monterey, 2004. – P. 246–247.*
5. *Development of up-to-date sea surface-object monitory radar facility «Burevestnik – 1» installed at naval and sea border guard surveillance point / V. D. Yeryomka, V. P. Dzyuba, A. F. Zikov et al. // 20th Intern. Crimean Conf. Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo'2010): conf. proc. – Sevastopol: Weber Publ., 2010. – Vol. 2. – P. 1248–1250.*
6. *X-band coaxial magnetron with field and secondary emitters / M. A. Kopot, V. D. Yeryomka, P. N. Melezhhik et al. // 20th Intern. Crimean Conf. Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo'2010): conf. proc. – Sevastopol: Weber Publ., 2010. – Vol. 1. – P. 301–304.*
7. *Пат. Украины № 83354. Магнетрон / В. Д. Еремка, В. П. Дзюба, Н. Н. Захрабов, А. Н. Токоуенко, А. П. Митник / Бюл. № 14, 2008 г.*
8. *Мыщенко И.М. Экспериментальное исследование дальности действия судовых навигационных РЛС сантиметрового диапазона в районах Мирового океана / И. М. Мыщенко, И. М. Панкратов, С. И. Хоменко // Збірник наук. праць / М-во оборони України, Харків. військ. ун-т. – Х., 2001. – Вип.2(32). – С. 56–59.*
9. *Диагностика условий распространения УКВ в тропосфере / Б. В. Жуков, В. А. Кабанов, И. М. Мыщенко и др. – К.: Наук. думка, 2010. – 261 с.*

Рукопись поступила 24.05.2012.

V. P. Dzyuba, V. D. Yeryomka, A. F. Zikov,
I. M. Mytsenko, O. I. Prokopenko, A. N. Roenko,
D. V. Roskoshnyi

ABOUT THE POSSIBILITY OF RADAR «BUREVESTNIK» APPLICATION FOR NAVIGATION IN THE WORLD OCEAN REGIONS WITH INTENSIVE SHIPPING

One of the problems in the area of radio wave propagation and radar design is creation of radar facilities for navigation in

the regions of the World Ocean with intensive shipping. Ukrainian radioelectronic industry has a large experience in development of different purpose radar systems, one of that is the radar «Burevestnik». This radar is used to control and observe marine surface situation on the naval border check-points of Ukraine. Another possible application of the mentioned radar is its usage for navigation in the World Ocean. The aim of this paper is to estimate and to illustrate the possibility of radar «Burevestnik» effective application for navigation in the World Ocean, to determine radar coverage range statistical distribution functions at different radar cross sections (RCS) of the surface objects and different centimeter radio waves propagation conditions. To solve these problems the centimeter radio waves attenuation factor database created in IRE NASU on the basis of experimental results was used. Radar «Burevestnik» coverage range statistical distribution functions at surface objects RCS $\sigma = 100, 1\ 000, 10\ 000\ \text{m}^2$ and different meteorological conditions in the regions of the World Ocean were determined. Obtained results were compared with that of experimental researches conducted with stationary navigation radars «Don», «Nayada» and «MRL-5». Finally, a conclusion that radar «Burevestnik» designed in Ukraine can be used as a base model for development of new modifications of navigation radars was made.

Key words: radiowave propagation, attenuation factor, radar coverage range, statistical distribution functions.

В. П. Дзюба, В. Д. Ерьомка, А. Ф. Зиков,
І. М. Миценко, О. І. Прокопенко, О. М. Роевко,
Д. В. Роскошний

ПРО МОЖЛИВІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ РЛС «БУРЕВІСНИК» ДЛЯ НАВІГАЦІЇ В РАЙОНАХ СВІТОВОГО ОКЕАНУ З ІНТЕНСИВНИМ СУДНОПЛАВСТВОМ

Однією з проблем в області поширення радіохвиль і радіолокаційної техніки є створення засобів радіолокації для вирішення навігаційних завдань у районах Світового океану з інтенсивним судноплаванням. Українська радіоелектронна промисловість має великий досвід в розробці радіолокаційних систем різного призначення, однією з яких є РЛС «Буревісник». Ця РЛС застосовується для контролю надводної обстановки на постах спостереження військово-морських та прикордонних служб України. Іншим можливим застосуванням згаданої РЛС може бути її використання в районах Світового океану для навігації. Метою цієї роботи є оцінка та показ можливості ефективного застосування РЛС «Буревісник» для навігації в цих районах, визначення статистичних функцій розподілу дальності дії РЛС при різних ефективних площах розсіювання (ЭПР) надводних об'єктів і різних умовах поширення радіохвиль см діапазону. Для вирішення цієї проблеми застосовано базу даних множника послаблення радіохвиль см діапазону, створену ІРЕ НАН України за результатами експериментальних радіофізичних досліджень. Визначені статистичні функції розподілу дальності дії РЛС «Буревісник» при ЭПР надводних об'єктів $\sigma = 100, 1\ 000, 10\ 000\ \text{m}^2$ в різних по метеорологічному стану районах Світового океану. Проведено порівняння з експериментальними дослідженнями, в яких використовувалися стаціонарні навігаційні РЛС «Дон», «Наяда», «МРЛ-5». Зроблено висновок, що створена в Україні сучасна РЛС може служити базовою моделлю при розробці нових модифікацій навігаційних РЛС.

Ключові слова: розповсюдження радіохвиль, множник послаблення, дальність дії РЛС, статистичні функції розподілу.