

В. П. Дзюба¹, А. Д. Дориченко², В. Д. Ерёмка³, А. Ф. Зыков⁴, Л. П. Милиневский², И. М. Мыщенко³,
А. Н. Пивень⁵, О. И. Прокопенко², А. Н. Роевко³, Д. В. Роскошный⁶

¹ГП завод «Генератор»,

18, ул. Новоконстантиновская, Киев, 04080, Украина

²ГП завод «Буревестник»,

2, ул. Здолбуновская, Киев, 02081, Украина

³Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины,

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

E-mail: yeryomka@ire.kharkov.ua

⁴Отделение гибридных моделирующих и управляющих систем в энергетике

Института проблем моделирования в энергетике НАН Украины им. Г. Е. Пухова,

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

⁵Державна прикордонна служба України

26, ул. Владимирская, Киев, Украина,

⁶Институт телекоммуникаций НТУ «КПИ»

2, пер. Индустриальный, Киев, 03056, Украина

ПРИМЕНЕНИЕ РЛС «БУРЕВЕСТИК ЗГ» ДЛЯ ЗАГОРИЗОНТНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ НАДВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

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 является радиолокационная станция (РЛС) «Буревестник». Эта РЛС применяется для контроля надводной обстановки на постах наблюдения военно-морских и пограничных служб Украины. В работе предложено модернизировать РЛС «Буревестник-1» для навигации и загоризонтного обнаружения надводных объектов. Приводятся оценка и иллюстрация возможности эффективного применения РЛС «Буревестник ЗГ» для загоризонтного обнаружения надводных объектов в районах Мирового океана. Для этого использована база данных множителя ослабления радиоволн сантиметровой диапозона, созданная Институтом радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины по результатам экспериментальных радиофизических исследований. Определены статистические функции распределения дальности действия РЛС «Буревестник ЗГ» в районах Мирового океана, проведено сопоставление с экспериментальными исследованиями, в которых использовались стационарные навигационные РЛС «Дон», «Наяда», «МРЛ-5». Сделан вывод, о возможности использования РЛС «Буревестник ЗГ» в районах Мирового океана для навигации и загоризонтного обнаружения надводных объектов.

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

В настоящее время в связи с участвовавшими случаями контрабандной ловли рыбы, незаконной перевозки грузов и транспортировки нефти, других нарушений в территориальных водах Украины и стран, имеющих протяженную морскую границу, значительно вырос интерес к загоризонтному обнаружению надводных объектов с помощью радиотехнических средств. Кроме того, эта проблема весьма актуальна в связи с возрастающей угрозой морского пиратства.

В морской радиолокации наибольшее применение получили системы, работающие в сантиметровом диапазоне волн. Они обеспечивают высокий энергетический потенциал при сравнительно небольших размерах антенных систем и достаточно высокое значение эффективной площади рассеяния (ЭПР) надводных объектов. Этот диапазон волн хорошо изучен и теоретически, и экспериментально. В Институте радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова (ИРЭ) НАН Украины в период с 1976 по 1992 г. проводились регулярные экспериментальные исследования распространения радиоволн в ряде районов Мирового

океана [1]. Полученные результаты позволили создать базу данных дистанционных зависимостей множителя ослабления радиоволн [2]. Как показали эти исследования, а также более поздние, проведенные в акватории Черного моря [3], для 3-см диапазона, например, характерна достаточно высокая вероятность появления волноводного распространения радиоволн за пределы радиогоризонта. Это послужило основанием для применения именно этого диапазона волн в модернизированной радиолокационной системе (РЛС) «Буревестник ЗГ».

На рис. 1 показаны усредненные дистанционные зависимости множителя ослабления радиоволн $V(r)$ для 3-см диапазона радиоволн, полученные ИРЭ НАН Украины в результате многолетних радиофизических исследований Мирового океана [4]. Приведены 3 зависимости, соответствующие различным условиям распространения радиоволн: 1 – субрефракции, 2 – стандартной рефракции, 3 – волноводному распространению, когда ослабление сигнала наименьшее.

Как известно, дальность действия радиолокатора определяется выражением [5]:

$$r_{\text{пред}} = \sqrt[4]{\frac{P_{\text{изл}} \sigma G^2 \lambda^2 V^2}{P_{\text{ш}} (4\pi)^3}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{изл}}$ – излучаемая мощность передатчика; G – коэффициент усиления антенны; V – множитель ослабления радиоволн при распространении в реальной среде; λ – длина волны облучения; σ – ЭПР цели; $P_{\text{ш}}$ – мощность собственных шумов приемника (предельная чувствительность).

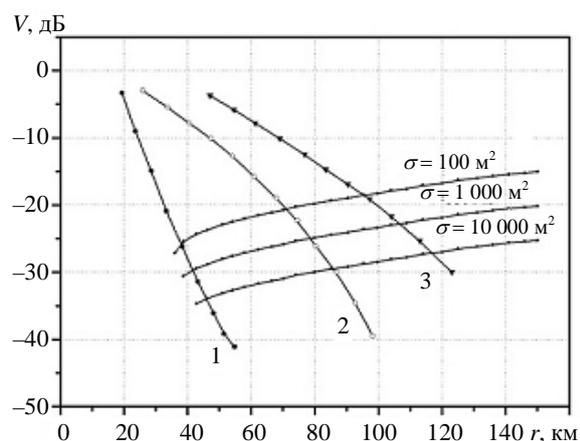


Рис. 1. Дистанционные зависимости множителя ослабления и его предельного значения от расстояния при $\sigma = \text{const}$

Таким образом, дальность действия $r_{\text{пред}}$ зависит от технических характеристик РЛС, или ее энергетического потенциала $C = \frac{P_{\text{изл}} G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 P_{\text{ш}}}$,

ЭПР надводного объекта σ и множителя ослабления V , основного параметра трассы распространения радиоволн $V = \frac{P}{P_0}$, где P – мощность,

поступающая на вход приемника при распространении в реальной среде, а P_0 – мощность, которая поступала бы на вход приемника при распространении в свободном пространстве (рис. 1). Предельным расстоянием $r_{\text{пред}}$ принято считать расстояние, на котором отраженный от объекта сигнал $P_{\text{отр}}$ становится равным мощности собственных шумов приемника $P_{\text{ш}}$.

При высотах расположения антенной системы РЛС $h_A \approx 20$ м и предполагаемой отражающей точки надводного объекта $h_{\text{ц}} \approx 10$ м дальность радиогоризонта в условиях нормальной рефракции будет равна $r_0 \approx 30$ км [5]. Для определения необходимого энергетического потенциала

РЛС, позволяющего осуществлять охрану территориальных вод и превышающего дальность радиогоризонта, зададим $r \approx 40$ км.

Из рис. 1 видно (зависимость 1), что при наихудших условиях распространения радиоволн на расстояниях $r \approx 40$ км множитель ослабления V равен -26 дБ. Энергетический потенциал C , необходимый для обнаружения надводного объекта с ЭПР σ на расстоянии r , будет равен

$$C = \frac{r^4}{\sigma V^2}. \quad (2)$$

Определим величину C для надводных объектов с ЭПР $\sigma_1 = 100 \text{ м}^2$ (катер) и $\sigma_2 = 1000 \text{ м}^2$ (судно водоизмещением ≈ 5000 т).

Подставив значения r , σ , V в выражение (2), получим необходимое значение энергетического потенциала $C \approx 217$ дБ для надводного объекта с ЭПР $\sigma_1 = 100 \text{ м}^2$ (катер) и $C \approx 207$ дБ для надводного объекта с ЭПР $\sigma_2 = 1000 \text{ м}^2$ (судно).

На основе имеющихся характеристик трасс распространения радиоволн и надводных объектов определим необходимые технические параметры для модернизации РЛС «Буревестник-1» и возможности ее использования для загоризонтного обнаружения надводных объектов как в Черном море, так и в районах Мирового океана.

Как видно из основного уравнения радиолокации (1), главным параметром, влияющим на дальность действия, является коэффициент усиления антенны G . Антенная система участвует в передаче прямого и приеме отраженного от надводного объекта сигналов. В нашем случае имеется возможность применить существующую параболическую антенну диаметром 3 м с коэффициентом усиления $G = 46$ дБ ($f = 9430$ МГц). Чувствительность приемника РЛС «Буревестник-1» составляет -130 дБ/Вт [2]. Этот параметр соответствует современным показателям и подходит для применения в РЛС «Буревестник ЗГ». Для обеспечения необходимой мощности излучения в передатчике для загоризонтной РЛС можно использовать существующий магнетронный генератор с $P_{\text{изл}} \geq 200$ кВт в импульсе. В перспективе предполагается использовать новую разработку ИРЭ НАН Украины – клинотрон с автоматической подстройкой частоты. Таким образом, энергетический потенциал РЛС «Буревестник ЗГ» будет близким к расчетному и позволит осуществлять наблюдение надводных объектов за пределами радиогоризонта. Технические параметры загоризонтной РЛС «Буревестник ЗГ» приведены в табл. 1.

При создании антенной системы применены современные технические решения, в том числе при разработке и конструировании электропривода [6]. Это позволило обеспечить высокий

уровень пускового момента и надежное осуществление движения и стабилизации частоты вращения.

Таблица 1
Технические параметры
загоризонтной РЛС «Буревестник ЗГ»

Излучаемая мощность	200 кВт
Коэффициент усиления антенны	46 дБ
Чувствительность приемного устройства	-136 дБ/Вт при 3 МГц
	-132 дБ/Вт при 6 МГц
	-128 дБ/Вт при 18 МГц
Несущая частота передатчика	9 430 МГц
Поляризация	Горизонтальная

Зная параметры РЛС «Буревестник-1», РЛС «Буревестник ЗГ» и используя базу данных множителей ослабления радиоволн сантиметрового диапазона, можно определить дальность действия указанных станций при различных условиях распространения радиоволн и ЭПР надводных объектов.

Рассмотрим графический пример определения дальности действия РЛС «Буревестник-1» и РЛС «Буревестник ЗГ» с использованием базы данных и системы уравнений

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

Уравнение (3) представляет собой экспериментальные зависимости множителя ослабления поля прямого сигнала от расстояния и содержится в базе данных для каждого из исследованных районов; уравнение (4) представляет собой зависимость предельного значения множителя ослабления $V_{\text{пред}}$, при котором возможно обнаружение цели с заданной ЭПР σ на данном расстоянии $r_{\text{пред}}$. На рис. 1 представлены зависимости $V_{\text{пред}} = f(r)$ (4) при различных ЭПР надводных объектов $\sigma_1 = 100 \text{ м}^2$, $\sigma_2 = 1\,000 \text{ м}^2$ и $\sigma_3 = 10\,000 \text{ м}^2$. Кроме этого, из базы данных взяты дистанционные зависимости $V(r)$ 1, 2 и 3, полученные в северных районах Атлантического океана. Зависимость 1 соответствует неблагоприятным условиям распространения радиоволны 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 $V(r)$ дадут нам значения дальностей действия РЛС «Буревестник-1» и РЛС «Буревестник ЗГ» для соответствующих условий распространения радиоволн (графическое решение системы уравнений (3) и (4)). Полученные значения дальностей действия РЛС «Буревестник-1» и РЛС «Буревестник ЗГ» представлены в табл. 2.

Таблица 2
Сравнение дальностей действия
РЛС «Буревестник-1» и «Буревестник ЗГ»

$\sigma, \text{ м}^2$	100	1 000	10 000
$r_{\text{пред } 1}, \text{ км}$	23	26	30
$r'_{\text{пред } 1}, \text{ км}$	37	42	48
$r_{\text{пред } 2}, \text{ км}$	35	45	55
$r'_{\text{пред } 2}, \text{ км}$	70	76	85
$r_{\text{пред } 3}, \text{ км}$	48	62	75
$r'_{\text{пред } 3}, \text{ км}$	92	105	115
$r_{\text{пред}}$ (сверх-рефракция), км	≈ 90	>150	>150
$r'_{\text{пред}}$	>150	>200	>300

$r_{\text{пред}}$ – предельная дальность действия РЛС «Буревестник-1»;

$r'_{\text{пред}}$ – предельная дальность действия РЛС «Буревестник ЗГ».

В условиях сверхрефракции, когда распространение радиоволн происходит с ослаблением близким к ослаблению в свободном пространстве, дальности действия РЛС «Буревестник-1» и РЛС «Буревестник ЗГ» 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 и быть ниже уровня собственных шумов, а затем вновь превышать их уровень и появиться на экране РЛС. На рис. 2–4 приведены статистические функции распределения дальностей действия РЛС «Буревестник ЗГ» и для сравнения – навигационных РЛС «Буревестник-1» и «Дон», определенные с использованием базы данных [2] и описанной выше методики для районов Северного Ледовитого океана (Норвеж-

ское море, рис. 2), Северо-Восточной части Атлантического океана (рис. 3) и Индийского океана (рис. 4).

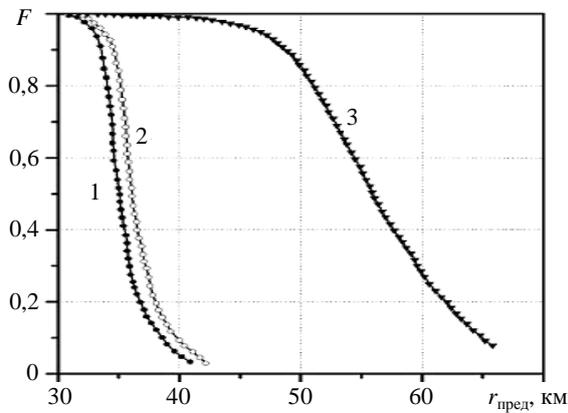


Рис. 2. Статистические функции распределения дальности действия РЛС, Норвежское море: 1 – РЛС «Дон»; 2 – РЛС «Буревестник-1»; 3 – РЛС «Буревестник ЗГ» ($\sigma = 1\ 000\ \text{м}^2$)

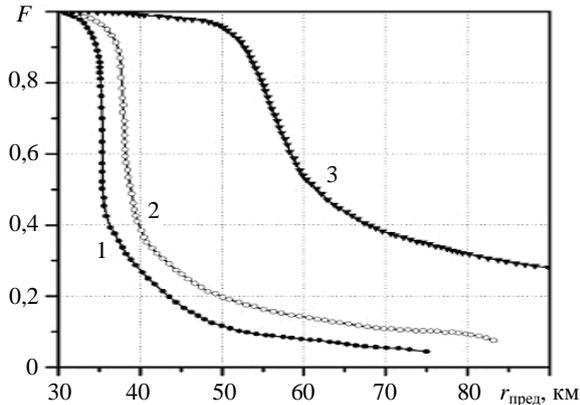


Рис. 3. Статистические функции распределения дальности действия РЛС, Северо-Восточная Атлантика: 1 – РЛС «Дон»; 2 – РЛС «Буревестник-1», 3 – РЛС «Буревестник ЗГ» ($\sigma = 1\ 000\ \text{м}^2$).

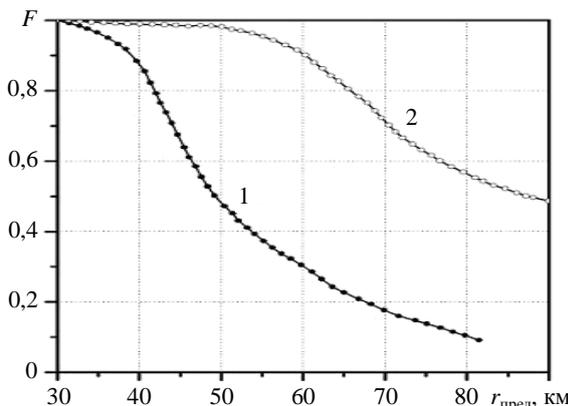


Рис. 4. Статистические функции распределения дальности действия РЛС, Индийский океан: 1 – РЛС «Буревестник-1»; 2 – РЛС «Буревестник ЗГ»

Энергопотенциал составляет: для РЛС «Дон» – 164 дБ, а для РЛС «Буревестник-1» –

172 дБ. РЛС «Буревестник ЗГ» является модификацией РЛС «Буревестник-1», у которой существенно увеличены размеры антенны, доработано приводное устройство, увеличена мощность излучения (в настоящее время использован магнетрон Ми99А, а в перспективе будет использована одна из новых разработок ИРЭ НАН Украины). Это дало возможность увеличить энергопотенциал до 216 дБ.

Как видно из рисунков, располагаемая дальность действия РЛС «Буревестник ЗГ», с вероятностью, близкой к единице, во всех исследованных районах Мирового океана лежит в пределах 45...55 км и соответствует наиболее неблагоприятным условиям распространения радиоволн сантиметрового диапазона. Это существенно превышает дальности действия существующей навигационной РЛС «Дон» и базовой РЛС «Буревестник-1» (см. рис. 2–4). Дальность действия РЛС «Буревестник ЗГ» в случае использования ее для охраны территориальных вод Украины в районах Черного моря может иметь существенно большую величину, что обусловлено спецификой распространения радиоволн над его поверхностью [3]. Черное море является внутренним морем и на пространственно-временное распределение коэффициента преломления тропосферы влияет наплыв воздушных масс с поверхности суши. Практически всегда над его поверхностью существуют инверсионные слои с большой протяженностью и на различных высотах и волноводы испарения.

Выводы. База данных экспериментальных дистанционных зависимостей множителя ослабления радиоволн, и пакет прикладных программ позволят оценить возможности применения РЛС «Буревестник ЗГ» для загоризонтного обнаружения надводных объектов. Созданная в Украине базовая модель РЛС «Буревестник-1» может быть использована в качестве загоризонтной РЛС. Для ее модификации необходимо увеличить энергетический потенциал на 40 дБ. Для увеличения излучаемой мощности необходимо использовать одну из новых разработок генераторов СВЧ ИРЭ НАН Украины. Необходимо провести испытания РЛС «Буревестник ЗГ» на Черном море и определить реальные дальности действия и обнаружения надводных объектов с различной ЭПР.

Библиографический список

1. *Мыценко И. М.* Исследование распространения радиоволн сантиметрового диапазона в районах Мирового океана / И. М. Мыценко, С. И. Хоменко // Вісн. Харків. нац. ун-ту. Сер. Радіофізика та електроніка. – № 50, вип. 2. – 2002. – С. 206–207.
2. *Физические основы и радиоэлектронные средства контроля надводной обстановки и судоходства* / В. П. Дзюба,

- В. Д. Ерёмка, А. Ф. Зыков и др. – М.–К.–Минск–Севастополь: Вебер, 2012. – 196 с.
3. *Диагностика условий распространения УКВ в тропосфере* / Б. В. Жуков, В.А. Кабанов, И. М. Мыщенко и др. – К.: Наук. думка, 2010. – 264 с.
 4. *Мыщенко И. М.* Дистанционные зависимости множителя ослабления радиоволн 3, 10, 50, 200 см диапазонов в районах Мирового океана / И. М. Мыщенко // *Радиофизика и электрон.*: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2006. – 11, № 3. – С. 393–400.
 5. *Справочник по радиолокации*: в 4 т. / под ред. М. Скольника; пер. с англ. под ред. К. Н. Трофимова. – М.: Сов. радио, 1976–1978.
 6. *Ветильный реактивный электродвигатель привода антенны радиолокационной станции* / И. Н. Разимов, В. В. Рыма, А. С. Порайло и др. // *Вісн. нац. техн. ун-ту «ХП»*: зб. наук. пр. – Х., 2003. – № 11. – С. 120–125.

Рукопись поступила 11.03.2013 г.

V. P. Dzyuba, A. D. Dorichenko,
V. D. Yeryomka, A. F. Zыkov, L. P. Milinevskij,
I. M. Mytsenko, A. N. Piven, O. I. Prokopenko,
A. N. Roenko, D. V. Roskoshnyj

APPLICATION OF “BUREVESTNIK ZG” RADAR FOR BEYOND-THE-HORIZON DETECTION OF THE SURFACE OBJECTS

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 radio-electronic 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. In the paper it is suggested to modernize radar “Burevestnik-1” for navigation and beyond-the-horizon detection of the surface objects. The possibilities of “Burevestnik ZG” effective application for beyond-the-horizon detection of the surface objects in the districts of the World Ocean are estimated. To illustrate the latter the centimeter radio waves attenuation factor database, created in IRE NASU on the base of experimental results, is used. Statistical distribution functions of the “Burevestnik ZG” radar coverage range in the districts of the World Ocean are determined. Comparison with experimental data

for stationary navigation radars “Don”, “Nayada” and “MRL-5” is conducted. Finally a conclusion, that radar “Burevestnik ZG” can be used in the regions of the World Ocean for navigation and beyond-the-horizon detection of the surface objects, is made.

Key words: beyond-the-horizon radiowave propagation, attenuation factor, coverage range, statistical distribution functions.

В. П. Дзюба, А. Д. Дориченко,
В. Д. Єрёмка, А. Ф. Зыков, Л. П. Міліневський,
І. М. Мищенко, А. Н. Півень, О. І. Прокопенко,
О. М. Роєнко, Д. В. Роскошний

ЗАСТОСУВАННЯ РЛС «БУРЕВІСНИК ЗГ» ДЛЯ ЗАГОРИЗОНТНОГО ВИЯВЛЕННЯ НАДВОДНИХ ОБ'ЄКТІВ

Однією з проблем поширення радіохвиль та радіолокаційної техніки є створення засобів радіолокації для вирішення навігаційних завдань в районах Світового океану з інтенсивним судноплаванням. Українська радіоелектронна промисловість має великий досвід розробки радіолокаційних систем різного призначення, однією з яких є радіолокаційна станція (РЛС) «Буревісник». Ця РЛС застосовується для контролю надводної обстановки на постах спостереження військово-морських та прикордонних служб України. У роботі запропоновано модернізувати РЛС «Буревісник-1» для навігації і загоризонтного виявлення надводних об'єктів. Наведено оцінку та ілюстрацію можливості ефективного застосування РЛС «Буревісник ЗГ» для загоризонтного виявлення надводних об'єктів у районах Світового океану. Для цього використано базу даних множника послаблення радіохвиль сантиметрового діапазону, створену Інститутом радіофизики та електроніки ім. А. Я. Усикова НАН України за результатами експериментальних радіофізичних досліджень. Визначено статистичні функції розподілу дальності дії РЛС «Буревісник ЗГ» в районах Світового океану, проведено порівняння з експериментальними дослідженнями, в яких використовувалися стаціонарні навігаційні РЛС «Дон», «Наяда», «МРЛ-5». Зроблено висновок про можливість використання РЛС «Буревісник ЗГ» в районах Світового океану для навігації та загоризонтного виявлення надводних об'єктів.

Ключові слова: загоризонтне поширення радіохвиль, множник послаблення, дальність дії, статистичні функції розподілу.