

УДК 656.61

Метод определения дальности действия береговой радиолокационной станции

Громоздин В. В., Иевлев К. В., Козуб М. С., Новикова Т. В.

*Испытательный центр «Омега» — филиал ФГУП НИИР
ул. Вакуленчука, 29, г. Севастополь, 299053, Российская Федерация
gromozdin@niir.ru, ivlev@niir.ru, kozub@niir.ru, panina@niir.ru*

Получено: 19 апреля 2022 г.

Отрецензировано: 5 июня 2022 г.

Принято к публикации: 5 июня 2022 г.

Аннотация: *В работе рассмотрен опытно-теоретический метод проведения испытаний береговой радиолокационной станции (БРЛС) с применением испытательной цели с уменьшенной эффективной поверхностью рассеяния (ЭПР), что позволяет учесть влияние осадков различной интенсивности при проведении испытаний в условиях отсутствия осадков. Рассмотрены ограничения при выборе ЭПР испытательной цели как по верхней границе, обусловленной техническими параметрами испытываемой БРЛС и дальностью радиогоризонта, так и по нижней границе, обусловленной волнением моря и отражениями от морской поверхности.*

Ключевые слова: *система управления движением судов, береговая радиолокационная станция, эффективная поверхность рассеяния, дальность действия, энергетический потенциал, интенсивность осадков.*

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Метод определения дальности действия береговой радиолокационной станции / В. В. Громоздин, К. В. Иевлев, М. С. Козуб, Т. В. Новикова // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2022. Т. 5, № 2. С. 236—246.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Метод определения дальности действия береговой радиолокационной станции / В. В. Громоздин, К. В. Иевлев, М. С. Козуб, Т. В. Новикова // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2022. — Т. 5, № 2. — С. 236—246.

1. Введение

Береговые радиолокационные станции являются одними из основных технических средств системы управления движением судов (СУДС), предназначенной для улучшения безопасности и эффективности движения

судов и для защиты окружающей среды¹. Эксплуатация СУДС должна иметь под собой юридическую основу и эксплуатироваться в соответствии с национальным и международным правом, а сам район обслуживания должен иметь установленные границы. Сведения о зоне действия СУДС, выполняемых функциях, процедурах связи с судами и другая необходимая информация направляются администрацией СУДС в международную ассоциацию маячных служб (МАМС) для публикации в международном справочном руководстве *World VTS Guide*. Под зоной действия СУДС понимается зона, которая перекрывается рабочими зонами основных технических средств. Рабочие зоны определяются для каждого вида основных технических средств СУДС посредством проведения натурных испытаний² по завершении строительства (реконструкции) СУДС, а также при вводе в эксплуатацию новых объектов и технических средств в целях установления фактических географических границ рабочих зон и других эксплуатационных характеристик технических средств³.

В соответствии с рекомендацией⁴ БРЛС обеспечивает обнаружение небольших целей в сложных погодных условиях. Способность обнаруживать цели в осадках должна быть определена для системы органом СУДС на основе статистической информации о погодных условиях, получаемых от местных метеорологических служб, включая частоту выпадения осадков и их интенсивность, размер капель и т. д. В условиях выпадения осадков дальность обнаружения может быть уменьшена до 25 % от максимально возможной, исходя из количества нормальных осадков, определенных для данного района, что предполагает получение приемлемой частоты ложных тревог. Учитывая резкий рост затухания сигнала с ростом частоты, при осадках более 25 мм/ч для обеспечения требований должны использоваться радары, работающие в диапазоне 2,900—3,100 МГц (S-диапазон)⁵. Во многих случаях осадки не являются однородными, и должна указываться рабочая зона БРЛС в осадках, типичных для конкретного участка. Для упрощения допускается, что осадки однородны. Например, в приказе³ указано, что осадки присутствуют на протяжении всей рабочей

¹ ИМО Резолюция А.857(20). Руководство для служб движения судов.

² Приказ Минтранса РФ от 10 февраля 2010 г. № 32. Об утверждении Положения об одобрении типов аппаратуры и освидетельствовании объектов и центров.

³ Приказ Министерства транспорта России от 23.07.2015 N 226. Об утверждении Требований к радиолокационным системам управления движением судов, объектам инфраструктуры морского порта, необходимым для функционирования Глобальной морской системы связи при бедствии и для обеспечения безопасности, объектам и средствам автоматической информационной системы, службе контроля судоходства и управления судоходством.

⁴ IALA Recommendation V-128. On Operational and Technical Performance Requirements for VTS Equipment. Edition 3.0. 2007.

⁵ Vessel Traffic Services Manual (IALA VTS Manual).

зоны БРЛС и регламентируются следующие возможные значения их интенсивности: 4 мм/ч, 10 мм/ч и 16 мм/ч.

Таким образом, определение рабочих зон БРЛС является достаточно важной и актуальной задачей, но определение рабочих зон БРЛС в условиях осадков посредством проведения натуральных испытаний имеет существенную проблему, заключающуюся в том, что обеспечить заданную интенсивность осадков на требуемом протяжении трассы (или на участке трассы) практически невозможно. Целью данной работы является разработка метода проведения испытаний, определяющих рабочую зону БРЛС с учетом влияния осадков заданной интенсивности.

2. Основная часть

Наличие осадков приводит к затуханию энергии радиоволн, что обусловлено поглощением их энергии каплями воды. Учитывая, что в основном уравнении радиолокации значение излучаемой мощности стоит под корнем четвертой степени, дополнительное затухание радиоволн за счет осадков приводит к снижению дальности действия РЛС в соответствии с формулой:

$$r_{п_max} = r_{a_max} \cdot 10^{-0,05 \cdot \gamma_{RD} \cdot \Delta r}, \quad (1)$$

где

$r_{п_max}$ — максимальная дальность действия РЛС в атмосфере с учетом осадков;

γ_{RD} — гонное ослабление в осадках, дБ/км;

Δr — участок трассы, на котором происходит затухание, км;

r_{a_max} — максимальная дальность действия РЛС в атмосфере без осадков, и которая определяется формулой:

$$r_{a_max} = r_{0_max} \cdot 10^{-0,05 \cdot \gamma_{RA} \cdot \Delta r}$$

где r_{0_max} — максимальная дальность действия РЛС в среде без потерь.

Соотношение между погонным ослаблением γ_{RD} (дБ/км) и интенсивностью осадков R (мм/ч) описывается степенным законом, приведенным в рекомендации⁶:

$$\gamma_{RD} = k \cdot R^\alpha \quad (3)$$

В соответствии с приведенными в рекомендации⁶ методиками расчета коэффициентов k и α погонное затухание в осадках γ_{RD} на частотах S - и X -

⁶ Рекомендация МСЭ-R P.838-2. Модель погонного ослабления в дожде, используемая в методах прогнозирования.

диапазонов, регламентируемых ИМО⁷ для береговых радаров, приведено в таблице 1.

Таблица 1. Значения погонных затуханий в осадках
 Table 1. Values of per unit attenuation in precipitation

Интенсивность осадков R (мм/ч)	Частота (ГГц)	Погонное затухание в дожде γ_{RD} (дБ/км)	
		Горизонтальная поляризация	Вертикальная поляризация
4	3	0,0014	0,0012
	9,4	0,042	0,036
10	3	0,0037	0,0031
	9,4	0,139	0,119
16	3	0,0059	0,0049
	9,4	0,257	0,219

На рисунках 1 и 2 сплошной линией приведены графики зависимости от расстояния относительного снижения максимальной дальности действия БРЛС в условиях с осадками заданной интенсивности $r_{п_max}$ к максимальной дальности РЛС в условиях без осадков $r_{а_max}$ для частот 3 ГГц и 9,4 ГГц для горизонтальной и вертикальной поляризации. Данные графики построены из предположения того, что заданная интенсивность осадков действует на протяжении всей дальности действия БРЛС, т. е. при $\Delta r = r_{а_max}$.

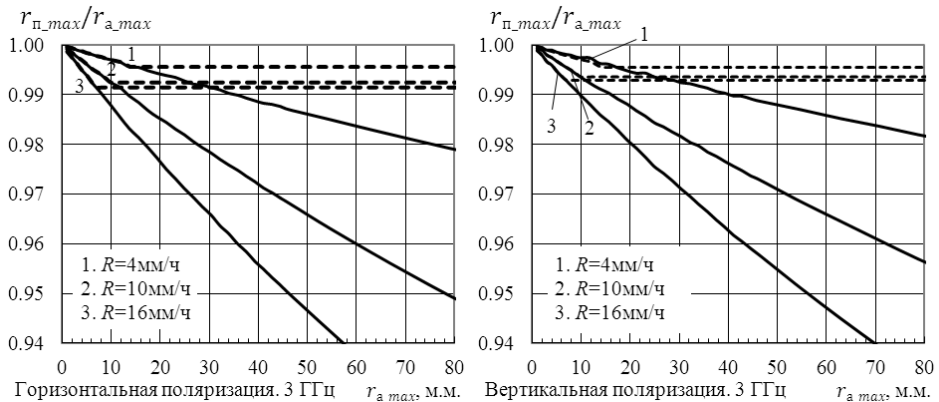


Рис. 1. Зависимость $r_{п_max}/r_{а_max}$ от расстояния для частоты 3 ГГц.
 Fig. 1. Dependence of $r_{п_max}/r_{а_max}$ on the distance for a frequency of 3 GHz

⁷ Резолюция ИМО MSC192(79). Принятие пересмотренных эксплуатационных требований к радиолокационному оборудованию. 2004.

Из рисунков 1 и 2 следует, что влияние осадков в диапазоне 3 ГГц достаточно незначительно, в то время как в диапазоне частот 9,4 ГГц осадки существенно сказываются на максимальной дальности БРЛС. Именно это и определяет в основном тот факт, что для получения более высокого разрешения, как правило, используются БРЛС X-диапазона, тогда как РЛС S-диапазона используется в основном в условиях повышенных осадков, т. е. БРЛС S-диапазона используются достаточно редко.

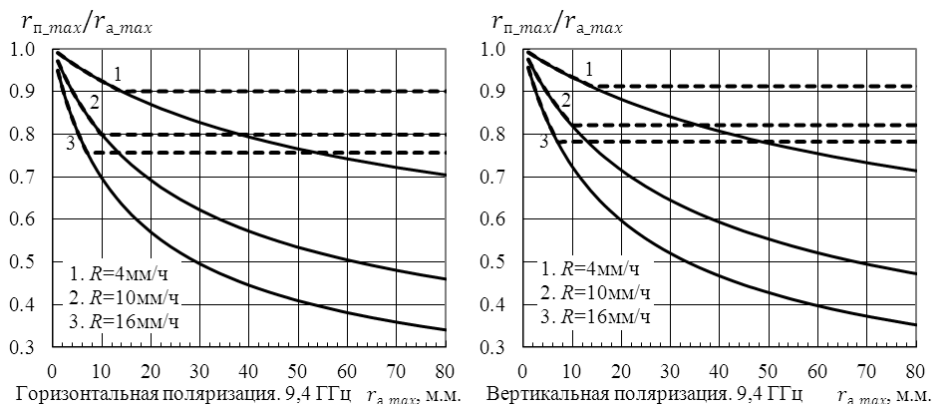


Рис. 2. Зависимость $r_{п,max}/r_{а,max}$ от расстояния для частоты 9,4 ГГц.

Fig. 2. Dependence of $r_{п,max}/r_{а,max}$ on the distance for a frequency of 9,4 GHz

Следует отметить, что на практике полученные данные об уменьшении дальности действия за счет интенсивности осадков являются завышенными, поскольку расчеты проведены для случая однородного в пространстве дождя, чего в природе при таких интенсивностях практически не наблюдается. Высокая интенсивность осадков, как правило, очень локализована. При больших интенсивностях основная масса выпадающего дождя сосредоточена в ячейке с диаметром порядка от 10 до 15 км.

Рекомендация МАМС⁸ дает общую формулу для диаметра пятна с осадками, которая пригодна для осадков интенсивностью R до 57 мм/ч:

$$D = 41,595 - 23,608 \cdot \log(R) \quad (4)$$

где D — диаметр пятна осадков, км.

При интенсивностях осадков 4 мм/ч, 10 мм/ч и 16 мм/ч диаметр пятна составляет 27,4 км, 18 км и 13,2 км соответственно. Дополнительное затухание радиоволн за счет локализованных осадков приводит к снижению дальности действия РЛС в соответствии с формулой (2) при условии:

⁸ IALA Guideline 1111. Preparation of operational and technical performance requirements for VTS systems.

$$\Delta r = \begin{cases} r_{a_max} & \text{при } r_{a_max} < D \\ D & \text{при } r_{a_max} \geq D \end{cases} \quad (5)$$

На рисунках 1 и 2 пунктирной линией приведены графики зависимости от расстояния относительного снижения максимальной дальности действия БРЛС в условиях с осадками заданной интенсивности $r_{п_max}$ при их локализованном характере в соответствии с (4) к максимальной дальности действия БРЛС в условиях без осадков r_{a_max} для частот 3 ГГц и 9,4 ГГц для горизонтальной и вертикальной поляризации. Из рисунка 1 следует, что влиянием осадков при их локализованном характере в диапазоне 3 ГГц можно пренебречь, т. к. разница при этом составляет менее 1 %. В остальных случаях разница является существенной, и это необходимо учитывать при проведении испытаний. При действии осадков на протяжении всей дальности действия БРЛС их учет необходимо производить путем получения экспериментальных результатов в условиях без осадков с последующим пересчетом в соответствии с графиками на рисунках 1 и 2. При этом, однако, существует проблема, связанная с тем, что, если в условиях с осадками граничная дальность БРЛС заявлена близкой к радиогоризонту, то в условиях без осадков граничная дальность действия может оказаться за пределами радиогоризонта, и ее определение посредством натуральных испытаний не представляется возможным.

Для решения этой проблемы предлагается использование эталонной цели с уменьшенным значением эффективной площади рассеяния (ЭПР). Возможность предлагаемого варианта определения дальности действия БРЛС при осадках вытекает из основного уравнения радиолокации, один из вариантов которого имеет вид:

$$r_{0_max} = \sqrt[4]{\frac{P_{и} \cdot G_{max}^2 \cdot \sigma_{ц} \cdot \lambda^2}{P_{пр.min} \cdot (4\pi)^3}} \quad (6)$$

где

$P_{и}$ — излучаемая мощность в импульсе (Вт);

G_{max} — коэффициент усиления антенны, включая КПД приемно-передающего тракта;

$P_{пр.min}$ — чувствительность приемника БРЛС (Вт);

λ — длина волны излучения (м);

$\sigma_{ц}$ — заданная ЭПР цели (м²).

Учитывая, что в формуле (6) ЭПР цели $\sigma_{ц}$ стоит под корнем 4-й степени, учет осадков можно произвести уменьшением ЭПР в соответствии с формулой:

$$\sigma'_{ц} = \sigma_{ц} \cdot 10^{-0,2 \cdot \gamma_{RD} \cdot \Delta r}. \quad (7)$$

Определив в процессе проведения испытаний дальность действия БРЛС без учета осадков (r_{0_max}) с ЭПР цели уменьшенного значения, определенной в соответствии с (7), дальность действия БРЛС в условиях осадков (r'_{0_max}) можно определить с помощью следующей формулы:

$$r'_{0_max} = r_{0_max} \cdot \sqrt[4]{\sigma'_c / \sigma_c}. \quad (8)$$

Таким образом, определяется возможность проведения испытаний по определению дальности действия БРЛС с учетом осадков заданной интенсивности на основе испытаний, проведенных в условиях без осадков.

Существует, однако, вероятность, что энергетический потенциал БРЛС настолько велик, что, даже при уменьшенной в соответствии с (7) ЭПР цели, не удастся определить дальность действия БРЛС без учета осадков, т. к. она ограничивается дальностью радиогоризонта. Следовательно, существует ограничение на максимальное значение ЭПР цели, которое определяется энергетическим потенциалом ЭПР и дальностью радиогоризонта.

На рисунке 3 приведены графики зависимости требуемого значения ЭПР цели для обеспечения заданной дальности обнаружения БРЛС «Наяда 5», работающей на частоте 9410 МГц, для типовых значений ее параметров.

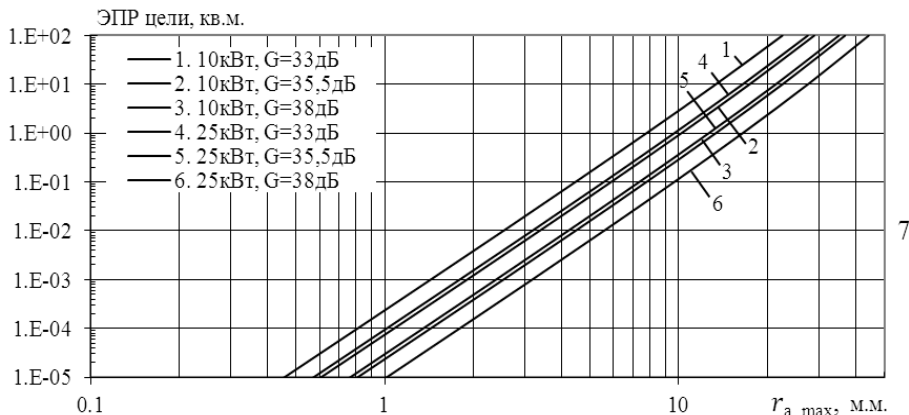


Рис. 3. Зависимость требуемого значения ЭПР цели для обеспечения заданной дальности обнаружения БРЛС «Наяда 5» для типовых значений ее параметров.

Fig. 3. Dependence of the required value of the RCS of the target to ensure a given detection range of the "Nayada 5" radar for typical values of its parameters

Таким образом, для определения максимального значения ЭПР цели предварительно необходимо вычислить дальность радиогоризонта R для БРЛС, которая в морских милях (м.м) определяется формулой:

$$R = 2,23(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \quad (9)$$

где h_1 — высота установки антенны БРЛС (м);
 h_2 — высота центра ЭПР над уровнем моря (м).

Затем с помощью соответствующего графика, приведенного на рисунке 3 для максимальной дальности обнаружения БРЛС примерно вдвое меньше дальности радиогоризонта, определенного по (9), определить максимально допустимую ЭПР испытательной цели.

С другой стороны существуют ограничения на минимальные пределы значений ЭПР испытательной цели, определяемые влиянием отражений зондирующего сигнала БРЛС от морской поверхности. В общем случае сигнал, отраженный от морской поверхности, описывается в терминах удельной ЭПР (УЭПР) σ_0 и зависит от угла скольжения, от рассеяния электромагнитных волн на крупных и мелких неровностях и от наличия отражения волн от облака брызг и пенных образований. При этом существуют эмпирические формулы, учитывающие скорость ветра и его направление, поляризацию, частоту сигнала и т. д. [1]. Однако в первом приближении можно использовать зависимости для усредненного моря в виде графиков зависимости УЭПР σ_0 от скорости ветра для вертикальной поляризации сигнала, приведенные в [2]. Сопоставляя приведенные в [1] значения скорости ветра, при которых приведены графики с параметром волнения моря в баллах, и учитывая, что интерес представляют значения угла падения радиоволн на морскую поверхность, близкие к 80—90 градусам, УЭПР моря для частоты 9,4 ГГц можно представить, как показано в таблице 2.

Таблица 2. Зависимость УЭПР от скорости ветра для частоты 9,4 ГГц.

Table 2. Dependence of the unit RCS on wind speed for a frequency of 9.4 GHz

Скорость ветра, м/с	≤ 2,5	2,5—5	5—7,5	7,5—10
Соответствие скорости ветра волнению моря по шкале Бофорта, баллы	2	3	4	5
УЭПР σ_0 , дБ	−40	−39	−36	−34

ЭПР участка морской поверхности является произведением УЭПР на площадь участка поверхности S , облучаемого радиоимпульсом, которая зависит от расстояния между БРЛС и участком S , а также от разрешающей способности станции по азимуту ($\Delta\alpha$) и по расстоянию (ΔR):

$$\sigma_{\text{м.п.}} = \sigma_0 \pi ((R + 0,5\Delta R)^2 - (R - 0,5\Delta R)^2) \Delta\alpha / 360 \quad (10)$$

На рисунке 4 приведены графики зависимости значения ЭПР облучаемой поверхности от расстояния до этой поверхности для различных значений волнения морской поверхности.

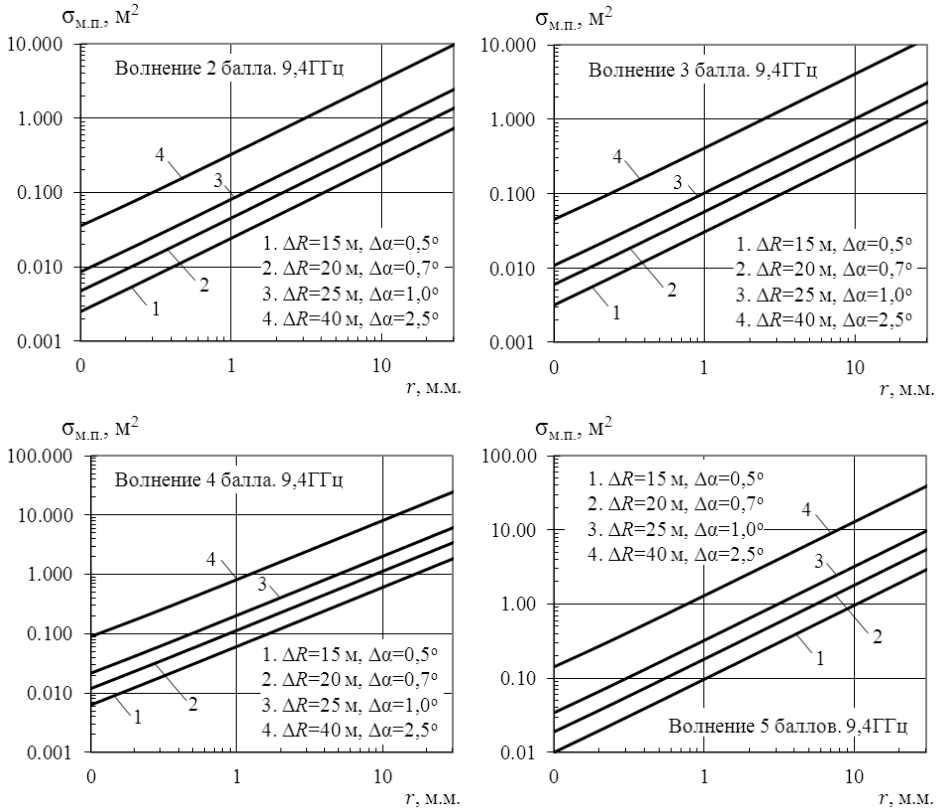


Рис. 4. Зависимости значения ЭПР облучаемой поверхности от расстояния до этой поверхности для различных значений волнения морской поверхности.

Fig. 4. Dependences of the RCS value of the irradiated surface on the distance to this surface for various sea surface waves

3. Заключение

Рассмотренный опытно-теоретический метод проведения испытаний БРЛС, использующий понятие энергетического потенциала станции и испытательной цели уменьшенной ЭПР, позволяет учесть влияние осадков заданной интенсивности на основе результатов испытаний, проведенных в условиях отсутствия осадков. Рассмотрены ограничения при выборе ЭПР испытательной цели как по верхнему пределу, обусловленному техническими параметрами испытываемой БРЛС и дальностью радиогоризонта, так и по нижнему пределу, обусловленному волнением моря и отражениями зондирующего сигнала от морской поверхности.

Список литературы

1. Мур Р. К., Фэн А. К. Радиолокационные определения параметров ветра над морем // ТИИЭР. 1979. Том 67, № 11. С. 40—63.
2. Справочник по радиолокации / под ред. М. Скольника. Том 1. Основы радиолокации / под ред. Я. С. Ицхоки. М. : Сов. радио, 1976. 456 с.

Информация об авторах

Громоздин Валентин Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Инновационные и телекоммуникационные технологии» Севастопольского государственного университета, заместитель директора филиала по техническому развитию Севастопольского испытательного центра «Омега» — филиала ФГУП НИИР, Российская Федерация.

Иевлев Константин Владимирович, аспирант кафедры «Радиоэлектронные системы и технологии» Севастопольского государственного университета, инженер 1-й категории НТО МиА Севастопольского испытательного центра «Омега» — филиала ФГУП НИИР, Российская Федерация.

Козуб Максим Сергеевич, аспирант кафедры «Радиоэлектронные системы и технологии» Севастопольского государственного университета, начальник НТО И Севастопольского испытательного центра «Омега» — филиала ФГУП НИИР, Российская Федерация.

Новикова Татьяна Викторовна, доцент кафедры «Инновационные и телекоммуникационные технологии» Севастопольского государственного университета, заместитель начальника НТО МК Севастопольского испытательного центра «Омега» — филиала ФГУП НИИР, Российская Федерация.

Method for Determining the Range of a Coastal Radar Station

V. V. Gromozdin, K. V. Ievlev, M. S. Kozub, and T. V. Novikova

Testing centre “OMEGA”, Branch of the FSUE NIIR
29, Vakulenchuka st., Sevastopol, 299053 Russian Federation
gromozdin@niir.ru, ivlev@niir.ru, kozub@niir.ru, panina@niir.ru

Received: April 19, 2022

Peer-reviewed: June 5, 2022

Accepted: June 5, 2022

Abstract: *The paper considers an experimental-theoretical method for testing a coastal radar station using a test target with a reduced effective scattering surface (ESR), which makes it possible to take into account the effect of precipitation of varying intensity when testing in conditions of lack of precipitation. The limitations are considered when choosing the ESR of a test target both along the upper limit, due to the technical parameters of the tested radar and the range of the radio horizon, and along the lower limit, due to sea waves and reflections from the sea surface.*

Keywords: *Vessel Traffic Services, coastal radar station, effective scattering surface, range, energy potential, precipitation intensity.*

For citation (IEEE): V. V. Gromozdin, K. V. Ievlev, M. S. Kozub, and T. V. Novikova, “Method for Determining the Range of a Coastal Radar Station,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 2, pp. 236–246, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.2.17. (In Russ.).

References

- [1] R. K. Moore and A. K. Fung, “Radar determination of winds at sea,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 67, no. 11, pp. 1504–1521, 1979, doi: 10.1109/proc.1979.11510.
- [2] *Radar Handbook*, M. I. Skolnik, ed. in chief. The McGraw-Hill Co., 1970.

Information about the authors

Valentin V. Gromozdin, C.Sc., Associate professor of the dept. of Innovative and Telecommunication Technologies of the Sevastopol State University, Deputy Director for Technical Development of the Sevastopol branch of FSUE NIIR “Omega Testing Center”, Russian Federation.

Konstantin V. Ievlev, graduate student of the dept. of Innovative and Telecommunication Technologies of the Sevastopol State University, Engineer of the scientific and technical dept. of marine and aviation equipment of the Sevastopol branch of FSUE NIIR “Omega Testing Center”, Russian Federation.

Maxim S. Kozub, graduate student of the dept. of Innovative and Telecommunication Technologies of the Sevastopol State University. Head of scientific and technical testing dept. the Sevastopol branch of FSUE NIIR “Omega Testing Center”, Russian Federation.

Tatyana V. Novikova, C.Sc., Associate professor of the dept. of Innovative and Telecommunication Technologies of the Sevastopol State University, Deputy Head of the scientific and technical dept. of quality management of the Sevastopol branch of FSUE NIIR “Omega Testing Center”, Russian Federation.