


УДК 551.463.26+621.396.969
EDN: PBYZON

А.Ю. Андреев 

ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

К ВОПРОСУ ОБ ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДИ РАССЕЯНИЯ МОРСКИХ ОБЪЕКТОВ

Объект и цель научной работы. В работе описана история радиолокационных измерений на модельных полигонах и в натуральных условиях на море и в свободном пространстве. Рассмотрен процесс появления термина «радиолокационная эффективная площадь рассеяния» для условий свободного пространства.

Материалы и методы. Анализ противоречий, возникших при радиолокационных измерениях на море, выполнен путем обзора работ ведущих отечественных и зарубежных специалистов. В результате термин «эффективная площадь рассеяния» используется и для свободного пространства, и для измерений на море, где появляется зависимость величины принятого радиолокатором сигнала от дистанции и высоты радиолокатора.

Основные результаты. Показаны противоречия, возникшие при радиолокационных измерениях на море, и способ их обхода путем использования такой характеристики, как «мощность в приемнике радиолокатора». Предложен новый термин «радиолокационная заметность» для описания рассеяния электромагнитных волн на морских объектах.

Заключение. Проведенные исследования показали возможность разрешения существующих в морской радиолокации противоречий путем введения специального термина «радиолокационная заметность». Это позволит устранить неоднозначность получаемых результатов при радиолокационных измерениях.

Ключевые слова: радиолокационное рассеяние, морская радиолокация, эффективная площадь рассеяния, радиолокационное поперечное сечение.

Автор заявляет об отсутствии возможных конфликтов интересов.

UDC 551.463.26+621.396.969
EDN: PBYZON

A.Yu. Andreev 

Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

ON RADAR CROSS-SECTION OF MARINE OBJECTS

Object and purpose of research. The paper summarizes the history of radar measurements on model ranges and in full scale at sea and in free space. Emergence of the “radar cross-section” term is traced for free-space conditions.

Materials and methods. Analysis of contradictions in radar measurements at sea is done by means of reviewing the works of leading Russian and foreign experts. As a result, the “radar cross-section” term has been used both for free space and measurements at sea where the signal received by radar depends on the distance and height of radar.

Main results. Contradictions arising in radar measurements at sea are shown and ways of evading them are identified by using the “power of radar receiver” characteristic. A new term of “radar observability” is suggested for describing the scattering of electromagnetic fields by marine objects.

Conclusion. The studies have confirmed that contradictions in marine radar detection can be resolved by introducing a special term of the “radar observability”. It is believed to obviate the ambiguity of obtained results from radar measurements.

Keywords: radar scattering, marine radar detection, scattering cross-section, radar cross-section.

The author declares no conflicts of interest.

Для цитирования: Андреев А.Ю. К вопросу об эффективной площади рассеяния морских объектов. Труды Крыловского государственного научного центра. 2023; 4(406): 119–122.

For citations: Andreev A.Yu. On radar cross-section of marine objects. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2023; 4(406): 119–122 (in Russian).

Радиолокационные измерения появились едва ли не раньше самой радиолокации. Методы измерения радиолокационных характеристик впервые обрабатывались в 1925 г. при изучении отражения и рассеяния радиоволн в ионосфере. Несмотря на наличие этих ранних работ, количественные измерения характеристик отражения целей стали осуществляться только тогда, когда в них появилась настоятельная потребность, вызванная появлением радиолокации [1].

Первая публикация об измерениях радиолокационных характеристик появилась в 1935 г. именно для кораблей: радар лайнера «Нормандия» с рабочей длиной волны 2 см (французской компании Societe Francais Radio Electrique – SFR) сопровождал три различных судна. При этом количественной мерой «радиолокационной величины» удаляющегося судна являлась дальность «пропадания» отметки от цели на экране радара [2].

Первые известные измерения радиолокационного отражения на моделях описаны в 1942 г. в отчете Массачусетского технологического института [1]. Измерения модели самолета с размахом крыльев 55 см выполнялись в безэховой камере на длине волны 10 см.

В 1947 г. в Трудах Кэмбриджского философского общества опубликована статья о теории радиолокационного отражения от кораблей [3], где эта мера уже именуется radar cross section (RCS), но одновременно приводится и более раннее название – equivalent echoing area (эквивалентная площадь отражения). При этом данная величина обозначается латинской буквой S (характерное обозначение для «площади»), а не общепринятой сегодня, появившейся позднее греческой буквой σ .

Обозначение σ для термина radar cross section появляется в 1951 г. В фундаментальном труде – 13-м томе серии Трудов Массачусетского технологического института под редакцией Дональда Керра [4]. «Разработанные ранее уравнения легко применяются в теории радиолокации после введения характеристики radar cross section, описывающей свойства радиолокационной цели. Этот параметр называется радиолокационным поперечным сечением или, альтернативно, поперечным сечением обратного рассеяния, обозначаемым σ и имеющим размерность площади. Radar cross section σ на самом деле является лишь **удобной математической абстракцией**, т.к. большинству практических целей нельзя присвоить уникальное числовое значение». В этом же томе есть следующее важное замечание, касающееся RCS: «... подразумевается, что цель всегда находится в условиях свободного пространства».

В 1965 г. выходит полностью переведенный на русский язык специализированный выпуск Трудов Института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике – «Отражательная способность радиолокационных целей» [5]. В нем, кроме шести десятков статей по интересующей нас тематике, приведены еще использовавшиеся на тот момент другие термины для σ – backscattering cross-section и scattering cross-section. После 1965 г. практически все англоязычные корифеи в своих трудах единообразно используют аббревиатуру RCS.

В русскоязычной литературе адекватный термин «радиолокационное поперечное сечение» не прижился. В результате у нас используется термин вообще без прилагательного «радиолокационный»: «эффективная площадь рассеивания» (ЭПР) [6, 7].

В самом начале создания теории радиолокации ее «отцам» уже была очевидна двойственность понятия ЭПР. Наиболее стабильными и простыми для описания были измерения радиолокационных характеристик самолетов. И, вводя в фундаментальном 13-м томе «удобную математическую абстракцию» σ , Дональд Керр со товарищи сразу же писали о справедливости ее применения только «в условиях свободного пространства» [4].

С другой стороны, в упомянутой выше первой статье по радиолокации на море в 1947 г. [3] сразу говорилось о наличии зеркального луча, отраженного от моря. Но здесь авторы корректно оперировали понятием «мощность в приемнике радара», которая зависела от ЭПР цели, помноженной на некоторый коэффициент. В упомянутом 13-м томе авторы этот коэффициент назвали «множителем распространения» (pattern propagation factor) и обозначили как F^4 [4]. Как и в предыдущей статье, они обошли двойственность понятия ЭПР, используя на графиках и для бомбардировщика, и для линкора понятие «интенсивность сигнала», т.е. ту же «мощность в приемнике радара».

А далее все смешалось. Автор первого «Справочника по радиолокации» Мерил Сколник в 1970 г. подробно описывает множитель распространения F^4 и его использование в основном уравнении дальности радиолокации в виде произведения σF^4 при наличии подстилающей морской поверхности [8]. Но в 1974 г. В своей основополагающей эмпирической формуле [9] он же связывает ЭПР корабля σ с его водоизмещением D и частотой радара f без всяких упоминаний множителя распространения, а именно

$$\sigma = 52 f^{1/2} D^{3/2}.$$

Далее в фундаментальных монографиях [10–12] повторяется та же картина.

Единственным трудом, где разделяются понятия σ и σF^4 , стала книга Маурисио Лонга [13]. Он пишет, что «обычно ни ЭПР σ , ни F^4 нельзя определить из радиолокационных измерений. Измеряется только их произведение σF^4 . При малых углах места F^4 может существенно изменяться даже для соседних элементов разрешения. Таким образом, измеренная величина σF^4 обычно и именуется ЭПР. Поэтому σF^4 иногда именуется «наблюдаемой ЭПР» (apparent RCS), но по факту это фейковая или псевдо-ЭПР».

Однако данный термин не прижился в англоязычной (да и русскоязычной) литературе. В Интернете удалось найти лишь две статьи с таким словоупотреблением [14–15], причем авторы более поздней статьи 2005 г. – французы. В отечественной литературе также термин ЭПР до сих пор применяется для морских целей – корабля, швартовой бочки [16].

Попытки «разделить» ЭПР для самолета и для корабля в отечественной науке предпринимались с 1980-х гг. Полученный к этому времени опыт натуральных измерений [17] показал существенную зависимость полученных результатов от дистанции до корабля, что полностью противоречило классическому понятию ЭПР. Тогда создатель этого измерительного комплекса РИК-Б – В.О. Кобак, автор книги «Радиолокационные отражатели» [18], – предложил ввести для величины σF^4 термин «ЭПР системы рассеиватель + поверхность раздела» [19]. Именно этой величине $\Sigma = \sigma F^4$ пропорциональна мощность в приемнике головки самонаведения летящей над морем ракеты – аналогично тому, как при работе в свободном пространстве (для ракеты «земля – воздух») мощность в приемнике пропорциональна σ .

После более чем десятилетней дискуссии специалистов Е.А. Штагер предложил более короткое определение – «**радиолокационная заметность**» и обозначение $\Sigma = \sigma F^4$ для измеряемой на море количественной характеристики [20]. В отличие от ЭПР данная величина зависит от дистанции до цели.

Понимание данного вопроса позволило повысить точность радиолокационных измерений на море благодаря учету погрешности, вносимой множителем распространения для калибровочного уголкового отражателя [21]. Поэтому представляется целесообразным термин «радиолокационная заметность» использовать в случае измерений радиолокационных измерений на море, в отличие от ЭПР, измеряемой в свободном пространстве.

Список использованной литературы

1. *Blacksmith P., Hiatt R.E., Mack R.B.* Introduction to radar cross-section measurements // Proceedings of the IEEE. 1965. Vol. 53, No. 8. P. 1035–1056. DOI: 10.1109/PROC.1965.4069.
2. *Williams P.D.L., Cramp H.D., Curtis K.* Experimental study of the radar cross-section of maritime targets // Electronic Circuits and Systems. 1978, Vol. 2, Vol. 4. P. 121–135. DOI: 10.1049/IJ-ECS.1978.0026.
3. *Wilkes M.V., Ramsay J.A.* A theory of the performance of radar on ship targets // Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society. 1947. Vol. 43, Part 2. P. 220–231.
4. Распространение ультракоротких радиоволн : пер. с англ. / Под ред. *Б.А. Шиллерова*. Москва : Сов. радио, 1954. 711 с.
5. Труды Института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике (ТИИЭР). 1965. Т. 53, № 8. 1327 с.
6. *Белоцерковский Г.Б.* Основы радиолокации и радиолокационные устройства. Москва : Советское радио, 1975. 336 с.
7. *Бакулев П.А.* Радиолокационные системы. Учебник для вузов. Москва : Радиотехника, 2004. 320 с.
8. Radar Handbook / Ed. *M.I. Skolnik*. New York : McGraw-Hill, 1970. 1 vol. (var. pag.).
9. *Skolnik M.I.* An empirical formula for the radar cross section of ships at grazing incidence // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1974. Vol. AES-10, No. 2. P. 292.
10. *Currie N.C.* Radar Reflectivity Measurement : techniques and applications. 2nd ed. Norwood : Artech House, 1989. XVI, 753 p.
11. *Pace P.E.* Detecting and Classifying Low probability of intercept radar. 2nd ed. Boston ; London : Artech House, 2004. XXX, 857 p.
12. *Brooker G.* Introduction to Sensors and Imaging, Raleigh : SciTech Publishing, 2009. 717 p.
13. *Long M.W.* Radar Reflectivity of Land and Sea. 3rd ed. Boston ; London : Artech House, 2001. XXII, 534 p.
14. *Fremouw E.J., Ishimaru A.* Intensity scintillation index and mean apparent radar cross section on monostatic and bistatic paths // Radio Science. 1992. Vol. 27, No. 4. P. 539–543.
15. *Fabbro V., Combes P.F., Guillet N.* Apparent radar cross section of a large target illuminated by a surface wave above the sea // Progress In Electromagnetics Research (PIER). 2005. Vol. 50. P. 41–60. DOI: 10.2528/PIER04050502.
16. Радиотехнические системы : учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки «Радиотехника» / Под ред. *Ю.М. Казаринова*. Москва : Академия, 2008. 589 с.

17. *Кобак В.О.* Радиолокационные отражатели. Москва : Советское радио, 1975. 248 с.
18. *Андреев А.Ю., Ефимов В.В., Леонтьев В.В.* К истории радиолокации: создание экспериментального радиолокационного измерительного комплекса РИК-Б / Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2011. Вып. 1. С. 62–69.
19. *Андреев А.Ю., Кобак В.О., Леонтьев В.В.* Средняя эффективная площадь рассеяния колеблющейся прямоугольной пластины, расположенной на границе раздела двух сред // Радиотехника. 1989. № 6. С. 65–68.
20. *Штагер Е.А.* Радиолокационная заметность корабля. Санкт-Петербург : ВВМ, 2019. 103 с.
21. *Shtager E.A.* An estimation of sea surface influence on radar reflectivity of ships // IEEE Transactions. 1999. Vol. AP-47, No. 10. P. 1623–1627. DOI: 10.1109/8.805908.
11. *Pace P.E.* Detecting and Classifying Low probability of intercept radar. 2nd ed. Boston ; London : Artech House, 2004. XXX, 857 p.
12. *Brooker G.* Introduction to Sensors and Imaging, Raleigh : SciTech Publishing, 2009. 717 p.
13. *Long M.W.* Radar Reflectivity of Land and Sea. 3rd ed. Boston ; London : Artech House, 2001. XXII, 534 p.
14. *Fremouw E.J., Ishimaru A.* Intensity scintillation index and mean apparent radar cross section on monostatic and bistatic paths // Radio Science. 1992. Vol. 27, No. 4. P. 539–543.
15. *Fabbro V., Combes P.F., Guillet N.* Apparent radar cross section of a large target illuminated by a surface wave above the sea // Progress In Electromagnetics Research (PIER). 2005. Vol. 50. P. 41–60. DOI: 10.2528/PIER04050502.
16. Radio engineering systems: textbook for radio engineering universities / Ed. by *Yu.M. Kazarinov*. Moscow : Academy, 2008. 589 p. (in Russian).
17. *Kobak V.O.* Radar reflector. Moscow : Sov. Radio, 1975. 248 p. (in Russian).
18. *Andreev A.Yu., Efimov V.V., Leontiev V.V.* On the radar history: development of experimental radar instrumentation complex RIC-B // Izvestia vuzov Rossii. 2011. Vol. 1. P. 62–69 (in Russian).
19. *Andreev A.Yu., Kobak V.O., Leontiev V.V.* Average radar cross-section of oscillating rectangular plate at interface of two media // Radio Engineering. 1989. Vol. 6. P. 65–68 (in Russian).
20. *Shtager E.A.* Ship radar stealth. St. Petersburg : VVM, 2019. 103 p. (in Russian).
21. *Shtager E.A.* An estimation of sea surface influence on radar reflectivity of ships // IEEE Transactions. 1999. Vol. AP-47, No. 10. P. 1623–1627. DOI: 10.1109/8.805908.

References

1. *Blacksmith P., Hiatt R.E., Mack R.B.* Introduction to radar cross-section measurements // Proceedings of the IEEE. 1965. Vol. 53, No. 8. P. 1035–1056. DOI: 10.1109/PROC.1965.4069.
2. *Williams P.D.L., Cramp H.D., Curtis K.* Experimental study of the radar cross-section of maritime targets // Electronic Circuits and Systems. 1978, Vol. 2, Vol. 4. P. 121–135. DOI: 10.1049/IJ-ECS.1978.0026.
3. *Wilkes M.V., Ramsay J.A.* A theory of the performance of radar on ship targets // Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society. 1947. Vol. 43, Part 2. P. 220–231.
4. Propagation of short radio waves: translation from English / Ed. by *B.A. Shillerov*. Moscow : Sov. Radio, 1954. 711 p. (in Russian).
5. Proceedings of the IEEE. 1965. Vol. 53. No. 8. 1327 p.
6. *Belotserkovskiy G.B.* Fundamentals of radar detection and radars. Moscow : Sov. Radio, 1975. 336 p. (in Russian).
7. *Bakulev P.A.* Radar systems. Textbook for universities. Moscow : Radio Engineering, 2004. 320 p. (in Russian).
8. Radar Handbook / Ed. *M.I. Skolnik*. New York : McGraw-Hill, 1970. 1 vol. (var. pag.).
9. *Skolnik M.I.* An empirical formula for the radar cross section of ships at grazing incidence // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1974. Vol. AES-10, No. 2. P. 292
10. *Currie N.C.* Radar Reflectivity Measurement: techniques and applications. 2nd ed. Norwood : Artech House, 1989. XVI, 753 p.

Сведения об авторе

Андреев Александр Юрьевич, начальник лаборатории радиолокации ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-47-41. E-mail: 7_otd@ksrc.ru. <https://orcid.org/0000-0002-2021-3674>.

About the author

Aleksandr Yu. Andreev, Head of Radar Laboratory, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-47-41. E-mail: 7_otd@ksrc.ru. <https://orcid.org/0000-0002-2021-3674>.

Поступила / Received: 31.07.23
Принята в печать / Accepted: 29.11.23
© Андреев А.Ю., 2023