

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  $\sigma$ .

Обозначение  $\sigma$  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  $\sigma$  и имеющим размерность площади. Radar cross section  $\sigma$  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  $\sigma$  – 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»  $\sigma$ , 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  $\sigma F^4$  при наличии подстилающей морской поверхности [8]. Но в 1974 г. В своей основополагающей эмпирической формуле [9] он же связывает ЭПР корабля  $\sigma$  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  $\sigma$  и  $\sigma F^4$ , стала книга Маурисио Лонга [13]. Он пишет, что «обычно ни ЭПР  $\sigma$ , ни  $F^4$  нельзя определить из радиолокационных измерений. Измеряется только их произведение  $\sigma F^4$ . При малых углах места  $F^4$  может существенно изменяться даже для соседних элементов разрешения. Таким образом, измеренная величина  $\sigma F^4$  обычно и именуется ЭПР. Поэтому  $\sigma F^4$  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  $\sigma F^4$  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  $\sigma$ .

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. 2<sup>nd</sup> ed. Norwood : Artech House, 1989. XVI, 753 p.
11. *Pace P.E.* Detecting and Classifying Low probability of intercept radar. 2<sup>nd</sup> 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. 3<sup>rd</sup> 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. 2<sup>nd</sup> 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. 3<sup>rd</sup> 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. 2<sup>nd</sup> 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