

УДК 621.396.96

ОЦІНЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК РАДІОЛОКАЦІЙНОГО РОЗСІЮВАННЯ АРТИЛЕРІЙСЬКИХ СНАРЯДІВ У МЕТРОВОМУ, ДЕЦИМЕТРОВОМУ І САНТИМЕТРОВОМУ ДІАПАЗОНАХ ДОВЖИН ХВИЛЬ

Г. С. ЗАЛЕВСЬКИЙ, О. І. СУХАРЕВСЬКИЙ, В. О. ВАСИЛЕЦЬ, М. В. СУРГАЙ

*Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба,
Україна, Харків, 61023, вул. Сумська, 77/79*

Анотація. Досліджено характеристики радіолокаційного вторинного випромінювання артилерійських снарядів різних типів, які отримані шляхом математичного моделювання. Описано чисельні електродинамічні методи, розроблені авторами даної статті, які дозволяють моделювати електромагнітні відгуки повітряних об'єктів складної форми різних електричних розмірів. У випадку, коли довжина і діаметр снарядів співрозмірні із довжиною зондувальної хвилі (мають резонансні розміри), для розрахунку застосовується метод, заснований на розв'язанні інтегрального рівняння магнітного поля. Для моделювання характеристик вторинного випромінювання снарядів електрично великих розмірів застосовується асимптотичний високочастотний метод. Розроблені методи пройшли верифікацію шляхом порівняння даних розрахунку для модельних об'єктів із чисельними результатами, отриманими іншими авторами, а також із даними фізичних експериментів. Демонструються характеристики вторинного випромінювання снарядів у метровому, дециметровому і сантиметровому діапазонах довжин хвиль. Обговорюються основні закономірності їх вторинного випромінювання на двох ортогональних поляризаціях при різних часово-частотних параметрах радіолокаційного зондувального сигналу.

Ключові слова: артилерійський снаряд; математичне моделювання; модель відбитого сигналу; радіолокатор контрбатареїної боротьби; характеристики радіолокаційного розсіювання

ВСТУП

Артилерійські системи різних типів широко застосовуються арміями країн світу і незаконними військовими формуваннями у сучасних війнах і локальних конфліктах, завдаючи значних втрат серед військовослужбовців і мирного населення. Найбільш ефективними технічними засобами виявлення ворожих артилерійських позицій, попередження військових і мирного населення, а також корегування вогню своєї артилерії з метою подавлення ворожих вогневих позицій є радіолокатори контрбатареїної боротьби (РКББ).

Сучасні радіолокатори здійснюють виявлення і супроводження мін, снарядів артилерії

і ракетних систем залпового вогню (РСЗВ), визначення координат вогневих позицій, точок розривів, визначення типу снаряду (вогневої позиції) і дозволяють здійснювати коригування вогню власної артилерії для своєчасного подавлення ворожих позицій [1–5].

У провідних країнах світу створено і прийнято на озброєння цілий ряд сучасних РКББ, які застосовують радіолокаційні сигнали різних діапазонів довжин хвиль: РКББ дециметрового діапазону AN/TPQ-48/49 (США) [1], EL/M-2084 (Ізраїль) [1]; РКББ сантиметрового діапазону AN/TPQ-36/37 (США) [1, 2], AN/TPQ-53 (США) [3], «Собра» (Німеччина, Франція, Великобританія, США) [1], АРК-1

DOI: [10.20535/S0021347019070033](https://doi.org/10.20535/S0021347019070033)

© Г. С. Залевський, О. І. Сухаревський, В. О. Василець, М. В. Сургай, 2019

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Крупников, А. “Радиолокационные станции контрбатареинной борьбы основных зарубежных стран, *Зарубежное военное обозрение*, № 12, С. 32–41, 2010.
2. Introduction to AN/TPQ-36/37 Radar Upgrade. URI: <http://www.intersoft-electronics.com/Downloads/Radar%20Upgrades/TPQ36%20Radar%20Upgrade%20Presentation.pdf>.
3. AN/TPQ-53 Q-53 Counterfire target acquisition radar system. URI: https://www.armyrecognition.com/united_states_us_army_artillery_vehicles_system_uk/an/tpq-53_q-53_counterfire_target_acquisition_radar_system_technical_data_sheet_specifications.html.
4. “New Ukrainian Counter-Battery Radar Successfully Completes Field Trials,” *Defence Blog. Online Military Magazine*. URI: <https://defence-blog.com/army/new-ukrainian-counter-battery-radar-successfully-completes-field-trials.html>.
5. Оружие России. Модернизированный артиллерийский радиолокационный комплекс разведки и обслуживания стрельбы наземной артиллерии АРК-1М «Рысь». URI: <http://armsdata.net/russia/0120.html>.
6. Ergül, Ö.; Gürel, L. “Linear-linear basis functions for MLFMA solutions of magnetic-field and combined-field integral equations,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 55, No. 4, p. 1103-1110, Apr. 2007. DOI: [10.1109/TAP.2007.893393](https://doi.org/10.1109/TAP.2007.893393).
7. Gibson, W. C. *The Method of Moments in Electromagnetics*, 2nd ed. Boca-Raton–London–New York: Chapman & Hall/CRC, 2014. URI: <https://www.crcpress.com/The-Method-of-Moments-in-Electromagnetics/Gibson/p/book/9781482235791>.
8. Ylä-Oijala, P.; Taskinen, M.; Järvenpää, S. “Analysis of surface integral equations in electromagnetic scattering and radiation problems,” *Engineering Analysis with Boundary Elements*, Vol. 32, No. 3, p. 196-209, 2008. DOI: [10.1016/jenganabound.2007.08.004](https://doi.org/10.1016/jenganabound.2007.08.004).
9. Yan, Su; Jin, Jian-Ming; Nie, Zaiping. “Improving the accuracy of the second-kind Fredholm integral equations by using the Buffa-Christiansen functions,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 59, No. 4, p.

1299-1310, Apr. 2011. DOI: [10.1109/TAP.2011.2109364](https://doi.org/10.1109/TAP.2011.2109364).

10. Ubeda, E.; Tamayo, J. M.; Rius, J. M. "Taylor-orthogonal basis functions for the discretization in method of moments of second kind integral equations in the scattering analysis of perfectly conducting or dielectric objects," *PIER*, Vol. 119, p. 85-105, 2011. DOI: [10.2528/PIER11051715](https://doi.org/10.2528/PIER11051715).

11. Cheng, J.; Adams, R. J.; Young, J. C.; Khayat, M. A. "Augmented EFIE with normally constrained magnetic field and static charge extraction," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 63, No. 11, p. 4952-4963, Nov. 2015. DOI: [10.1109/TAP.2015.2478936](https://doi.org/10.1109/TAP.2015.2478936).

12. Sukharevsky, O. I.; Zalevsky, G. S.; Vasilets, V. A. "Modeling of ultrawideband (UWB) impulse scattering by aerial and subsurface resonant objects based on integral equation solving," in: Taylor, J. D. (ed.), *Advanced Ultrawideband Radar: Signals, Targets, and Applications*. Boca Raton London New York: CRC Press Taylor & Francis Group, 2016, Ch. 5, p. 195-235. DOI: [10.1201/9781315374130](https://doi.org/10.1201/9781315374130).

13. Lappalainen, J.; Ylä-Oijala, P.; Tzarouchis, D. C.; Sihvola, A. "Resonances of characteristic modes for perfectly conducting objects," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 65, No. 10, p. 5332-5339, Oct. 2017. DOI: [10.1109/TAP.2017.2741063](https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2741063).

14. Сургай, М. В.; Залевський, Г. С.; Василець, В. О.; Сухаревський, О. І. "Оцінювання рівня радіолокаційної помітності снаряду ракетної системи залпового вогню «Град» у різних діапазонах довжин хвиль," *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*, № 2, С. 142-148, 2017. URI: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ZKhUPS_2017_2_30.

15. Сургай, М. В. "Математичне моделювання характеристик вторинного випромінювання снаряду ОФ-25 самохідної гаубиці 2С3 «Акація» у різних діапазонах довжин хвиль," *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*, № 3, С. 135-141, 2018. DOI: [10.30748/nitps.2018.32.18](https://doi.org/10.30748/nitps.2018.32.18).

16. Liu, Y.; Guo, X.-Y.; Zhou, H.-J. "A memory saving augmented EFIE with modified basis functions for low-frequency problems," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 66, No. 3, p. 1359-1365, Mar 2018. DOI: [10.1109/TAP.2018.2789983](https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2789983).

17. MacKie-Mason, B.; Greenwood, A.; Peng, Z. "Adaptive and parallel surface integral equation solvers

for very large-scale electromagnetic modeling and simulation," *PIER*, Vol. 154, p. 143-162, 2015. DOI: [10.2528/PIER15113001](https://doi.org/10.2528/PIER15113001).

18. Liu, Y.; Yücel, A. C.; Bağcı, H.; Gilbert, A. C.; Michielssen, E. "A wavelet-enhanced PWTD-accelerated time-domain integral equation solver for analysis of transient scattering from electrically large conducting objects," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 66, No. 5, p. 2458-2470, May 2018. DOI: [10.1109/TAP.2018.2809555](https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2809555).

19. Tasic, M. S.; Kolundzija, B. M. "Method of moment weighted domain decomposition method for scattering from large platforms," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 66, No. 7, p. 3577-3589, July 2018. DOI: [10.1109/TAP.2018.2829821](https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2829821).

20. Kalfa, M.; Ergül, Ö.; Ertürk, V. B. "Error control of multiple-precision MLFMA," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 66, No. 10, p. 5651-5656, Oct. 2018. DOI: [10.1109/TAP.2018.2854405](https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2854405).

21. Gorshkov, S. A.; Leshchenko, S. P.; Orlenko, V. M.; Sedyshev, S. Yu.; Shirman, Ya. D. (eds.). *Computer Simulation of Aerial Target Radar Scattering, Recognition, Detection, and Tracking*. Norwood, M.A.: Artech House, 2002. 382 p. ISBN-10: 1580531717 / ISBN-13: 978-1580531719.

22. Барабаш, Ю. Л.; Братченко, Г. Д.; Гончарук, А. А. "Математична модель та результати моделювання сигнального розпізнавання й визначення координат гармат в РЛС розвідки вогневих позицій," *Вісник Київського Національного університету імені Тараса Шевченка*, № 10, С. 6-10, 2005.

23. Sukharevsky, O. I. (ed.). *Electromagnetic Wave Scattering by Aerial and Ground Radar Objects*. Boca Raton: SRC Press, 2015. DOI: [10.1201/9781315214511](https://doi.org/10.1201/9781315214511).

24. Сухаревський, О. І.; Василець, В. О.; Нечитайло, С. В. *Довідник характеристик розсіювання повітряних та наземних радіолокаційних об'єкт.* Х.: ХНУПС, 2019. 304 с. +1 електрон. опт. диск (CD-ROM). ISBN 978-966-468-087-2.

25. Barrett, T. W. "Ultrawideband (UWB) time-frequency signal processing," in: Taylor, J. D. (ed.). *Advanced Ultrawideband Radar: Signals, Targets, and Applications*. Boca Raton London New York: CRC Press, 2016, Ch. 4, p. 105-194. DOI: [10.1201/9781315374130](https://doi.org/10.1201/9781315374130).

Поступила в редакцію 10.09.2018

После доработки 10.10.2018

Принята к публикации 20.06.2019