

УДК 621.396.96

ОЦІНКА КРОКУ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ (ВИМІРЮВАННЯ) ДІАГРАМИ ЗВОРОТНОГО РОЗСІЯННЯ ОБ'ЄКТІВ СКЛАДНОЇ ФОРМИ

О.А. Масловський, М.М. Легенький, М.С. Антюфєєва

*Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна,
факультет радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем
пл. Свободи 4, Харків, 61022, Україна
e-mail: mlegenkiy@yandex.ru*

Поступила до редакції 17 июня 2016 г.

Для отримання точних значень вірогідності виявлення радіолокаційного об'єкту складної форми необхідні значення ЕПР для різних ракурсів візування, що потребує великої кількості розрахунків для кожного об'єкту. В роботі проведено дослідження щодо кількості вимірювань (або розрахунків) ЕПР об'єкту, необхідних для достатньо точного визначення статистичних характеристик помітності об'єкту. Отримані результати підтверджено розрахунками для декількох окремих об'єктів: моделі танка та двох моделей літаків. Визначені вимоги щодо густини кутової сітки для діаграми зворотного розсіяння, на якій слід визначати ЕПР, щоб отримати достовірну оцінку статистичних характеристик об'єкту.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ЕПР, діаграма зворотного розсіяння, об'єкт складної форми, статистичні характеристики

Для получения точных значений вероятности обнаружения радиолокационного объекта сложной формы необходимы значения ЭПР для разных ракурсов визирования, что требует большого количества расчетов для каждого объекта. В работе проведено исследование количества измерений (или расчетов) ЭПР объекта, необходимых для достаточно точного определения статистических характеристик заметности объекта. Полученные результаты подтверждены расчетами для нескольких отдельных объектов: модели танка и двух моделей самолетов. Определены требования по плотности угловой сетки для диаграммы обратного рассеяния, на которой следует определять ЭПР, чтобы получить достоверную оценку статистических характеристик объекта.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ЭПР, диаграмма обратного рассеяния, объект сложной формы, статистические характеристики

In order to obtain the exact values of the detection probability of complex shape object it is necessary to obtain the RCS value for each possible observation angle that requires a lot of calculations for each object. In the paper the investigation the necessary number of measurements (or calculations) the facility RCS required for a sufficiently accurate determination of the statistical characteristics of the object visibility is provided. The results are confirmed by calculations for a number of different objects: tank model and two models of aircraft. Thus, angular mesh density requirements for the backscatter pattern to determine the RCS to obtain reliable estimates of the statistical characteristics of the object are defined.

KEYWORDS: RCS, backscattering pattern, complex shape object, statistical characteristics

ВСТУП

Останнім часом приділяється багато уваги проблемі малопомітності цивільної і військової техніки для радіолокаційних станцій та головок самонаведення високоточної зброї. На етапі проектування необхідною є попередня оцінка радіолокаційної помітності об'єкту, також для готового зразка техніки важливим є контроль якості маскуванню та його впливу на помітність об'єкта. Для проведення зазначених досліджень необхідним є обчислення або вимірювання основної радіолокаційної характеристики об'єкту – ефективної поверхні розсіяння (ЕПР).

Для типових радіолокаційних цілей у моностатичному випадку ЕПР є складною непередбачуваною функцією кутів падіння $\sigma = \sigma(\theta, \varphi)$. Ця залежність має назву діаграма зворотного розсіяння (ДЗР). У реальних обставинах радар може бачити об'єкт під різними, непередбачуваними кутами, отже ЕПР об'єкта є випадковою змінною. Таким чином, для оцінки радіолокаційної помітності об'єкта має сенс використання статистичних методів обробки ЕПР. Деякі методи такої обробки можна знайти у сучасних публікаціях за даною тематикою. Зокрема, у роботі [1] представлено теоретичні методи розрахунку ЕПР об'єктів, що флюктуують. В статті [2] представлено розрахунки ЕПР Stealth-літаків та її аналіз за допомогою розподілу Сверлінга, логнормального розподілу та розподілу χ^2 . Схожі методи обробки ЕПР для наземних об'єктів представлено у роботі [3] та для оцінки рівня помітності об'єкту у роботі [4].

Слід відзначити, що у реальних вимірюваннях чи розрахунках при виборі кутового кроку вимірювання ЕПР керуються не доведеними та не поясненими методами [5]. У цій статті, базуючись на статистичному підґрунті, розглянуто методу вибору оптимального кроку ДЗР.

Дана робота є узагальненням і продовженням тез доповідей на конференціях [6] та [7], де коротко описано застосування описаної методики до визначення кроку для розрахунків (вимірювання) радіолокаційних характеристик для повітряних та наземних цілей, відповідно.

РОЗРАХУНОК ЕПР ДЛЯ МОДЕЛЕЙ ОБ'ЄКТІВ СКЛАДНОЇ ФОРМИ

У цій роботі для отримання ЕПР об'єкту використано метод Physical Optics – Scattering and Bouncing Rays (PO-SBR) [8], який дає змогу проводити розрахунок відбитих від об'єкта хвиль у наближенні фізичної та геометричної оптики.

При розгляді радіолокаційної помітності наземного об'єкта важливо приймати до уваги відбиття від підстильної поверхні [9]. Для розрахунку ЕПР наземного об'єкту використовується метод, запропонований у роботі [10].

У якості наземного об'єкту дослідження вибрано модель танка Т-90 (Див. рис. 1а). Модель танка має ширину 3.8 м., висоту 2.2 м. та довжину 6.9 м. (з дулом 9.5 м.). Модель складається з 19087 фасетів.

Азимутальна залежність ЕПР для цієї моделі представлена на рис. 1г для кута місця 60 град. Крок розрахунку тут дорівнює 0.1° .

Також представляє інтерес проведення досліджень й для повітряних цілей. За допомогою програми 3D Max було створено дві моделі літаків: McDonnell Douglas F-15 (див. рис. 1б) та Boeing 747 (див. рис. 1в). Модель F15 складається з 48404 фасетів, має довжину 19 м та розмах крил 13 м. Модель Boeing 747 є більш гладкою та складається з 19358 фасетів. Ця модель має 73.5 м. у довжину та розмах крил 69.8 м. Поверхня всіх моделей здебільшого вважається ідеально металевією, тільки вікна є скляними. Діаграми зворотного розсіяння для згаданих моделей літаків представлено на рис. 1д (сіра лінія - ДЗР для моделі F15, чорна лінія - ДЗР для моделі Boeing).

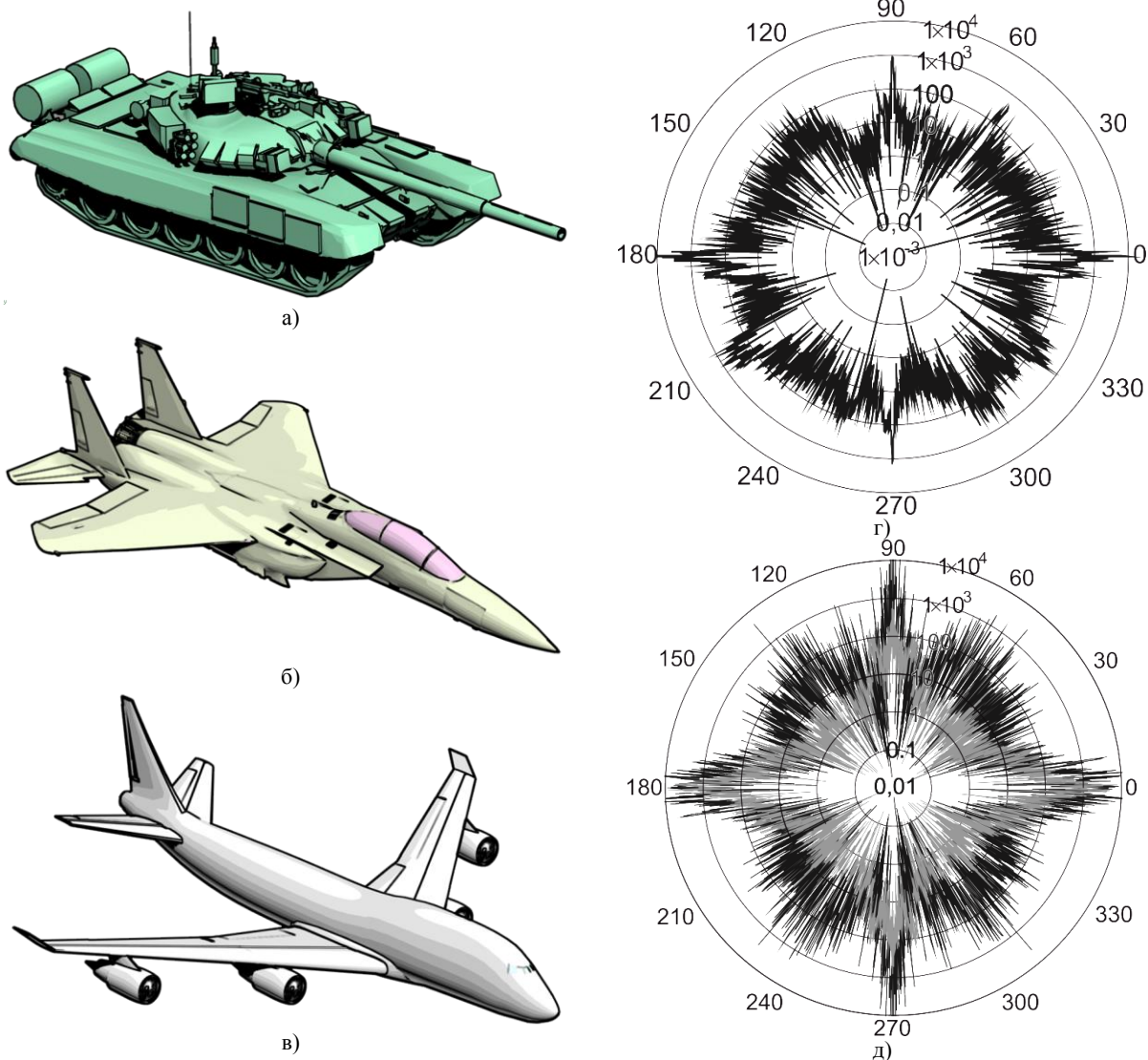


Рис.1. Досліджувані моделі та діаграми зворотного розсіяння для них

Далі проведемо статистичну обробку отриманих даних. Для цього ми розглядаємо ці дані, як генеральну сукупність, далі перевіримо її відповідність нормальному розподілу та застосуємо центральну граничну теорему теорії ймовірностей для визначення середнього значення ЕПР для генеральної сукупності через середні значення для вибірок із заданою ймовірністю [11].

СТАТИСТИЧНА ОБРОБКА ОТРИМАНИХ ДАНИХ

Перш ніж використовувати центральну граничну теорему, слід провести перевірку наших даних ДЗР на нормальний розподіл. Для цього ми будемо графік Q-Q [12] з даними ДЗР. Нижче ми порівнюємо графіки Q-Q для даних у дБ від м² (рис. 2) та у м² (рис. 3) з графіками Q-Q нормального розподілу (тут взято дані для наземної цілі – танка рис. 1а). Пунктирна лінія на рис. 2,3 позначає графік Q-Q для нормального розподілу, лінії з символів – графіки для розподілу ЕПР досліджуваного об'єкта.

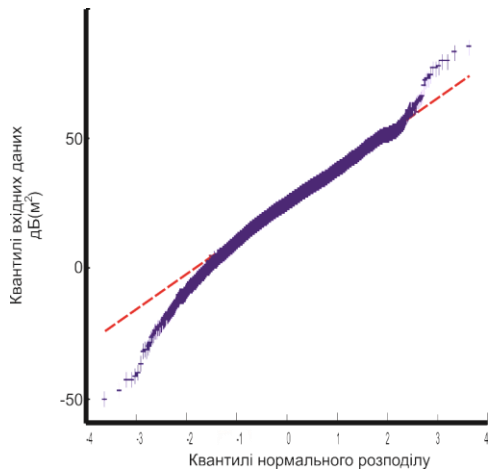


Рис. 2. Графік Q-Q для даних ЕПР об'єкта у децибелах від квадратних метрів

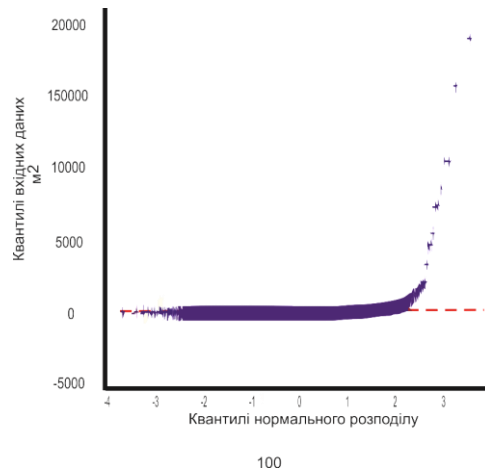


Рис. 3. Графік Q-Q для даних ЕПР об'єкта у квадратних метрах

З рис. 3 видно, що дані у квадратних метрах суттєво відрізняються від нормального розподілу. Для великих значень ЕПР помітні значні відхилення від нормального розподілу. Однак, дані у децибелах від квадратних метрів є більш наближеними нормального розподілу (див. рис. 2). Невеликі, порівняно з рис. 3, відхилення помітні лише для мінімальних та максимальних значень ЕПР.

Перевірку даних ДЗР на відповідність нормальному розподілу також можна провести за допомогою порівняння гістограми для досліджуваних даних з гістограмою нормального розподілу.

На рис. 4 поверх даних ДЗР, представлених у вигляді гістограми [11], накладено лінію, що відповідає нормальному розподілу з тими самими середнім значенням \bar{x} та дисперсією σ , як і для даних гістограми. На вісі абсцис на рис. 4 позначено ЕПР у децибелах від квадратного метру, на вісі ординат – кількість значень ЕПР, що потрапляють до відповідного інтервалу, амплітуду нормального розподілу підібрано для найкращої апроксимації гістограми. Видно, що отриманий розподіл ЕПР є близьким до нормального розподілу.

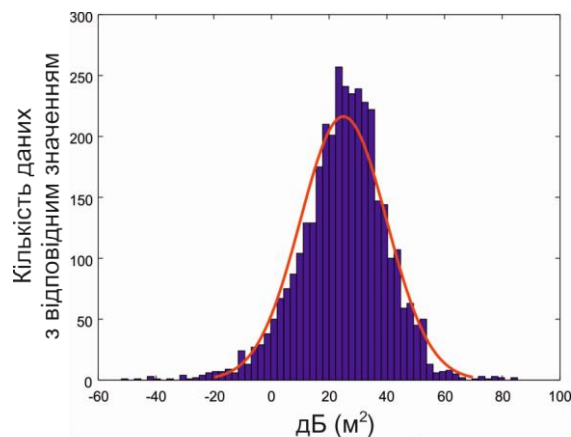


Рис. 4 Перевірка гістограми ДЗР на нормальний розподіл

Для перевірки відповідності розподілу ЕПР для повітряних цілей нормальному розподілу використовуємо той самий метод, що і для наземної моделі. Базуючись на висновках, зроблених вище для наземної цілі, перевіряємо тільки дані у децибелах від квадратних метрів. На рис. 5 та рис. 6 представлено порівняння графіків Q-Q для даних ДЗР обох моделей літаків з нормальним розподілом. З графіку видно, що розподіл даних для обох літаків є близьким до нормального.

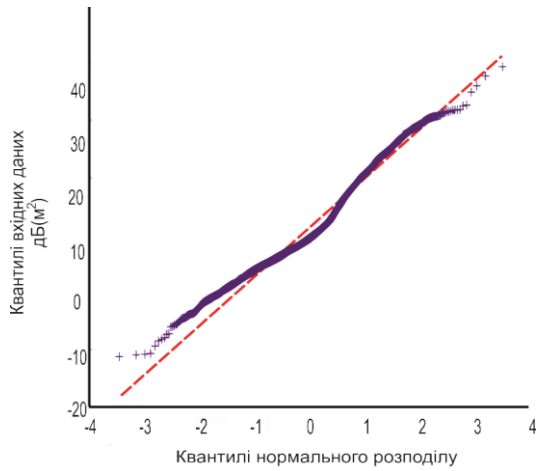


Рис. 5. Графік Q-Q для даних ЕПР для моделі літака F-15 (див. рис. 1 б)

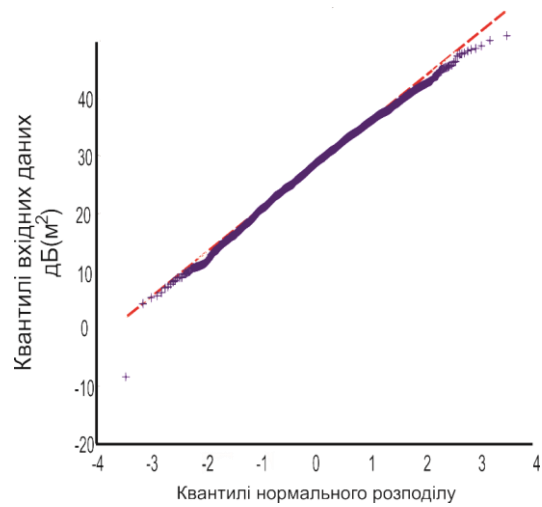
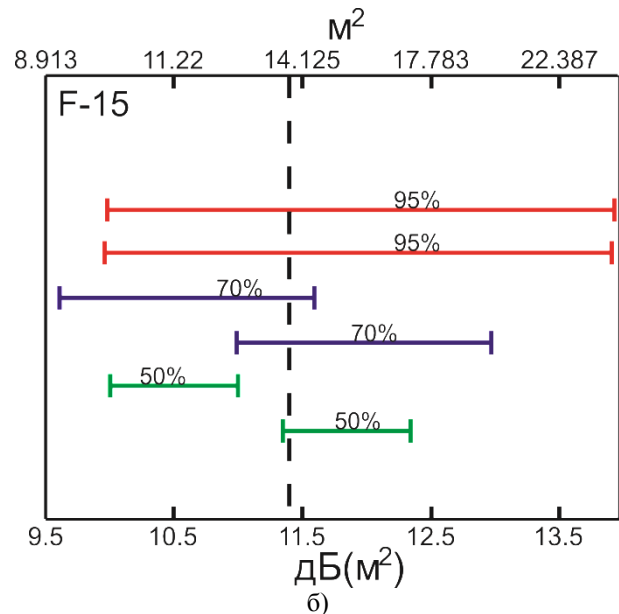
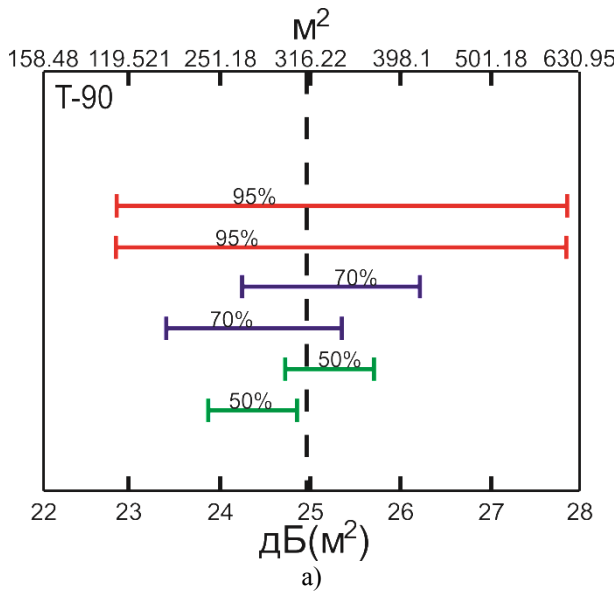


Рис. 6. Графік Q-Q для даних ЕПР для моделі літака Boeing (див. рис. 1 в)

Далі, розглядаючи дані у дБ від м² як генеральну сукупність, проведено перевірку на відповідність нормальному розподілу для різних вибірок з цих даних. Виявилось, що навіть вибірки розміром 120 елементів (тобто діаграма зворотного розсіяння з кроком 3°) для всіх зазначених вище моделей є близькими до нормального розподілу.

Таким чином, проведено перевірку на відповідність нормальному розподілу отриманих генеральних сукупностей даних та різних вибірок з цих даних. Отже, до цих даних можна застосовувати центральну граничну теорему. Центральна гранична теорема теорії ймовірностей дозволяє оцінити середнє значення випадкової величини за допомогою середніх значень даної величини для вибірок. Для кожного випадку можна оцінити похибку, яка в цьому випадку припускається, за допомогою довірчих інтервалів [11].



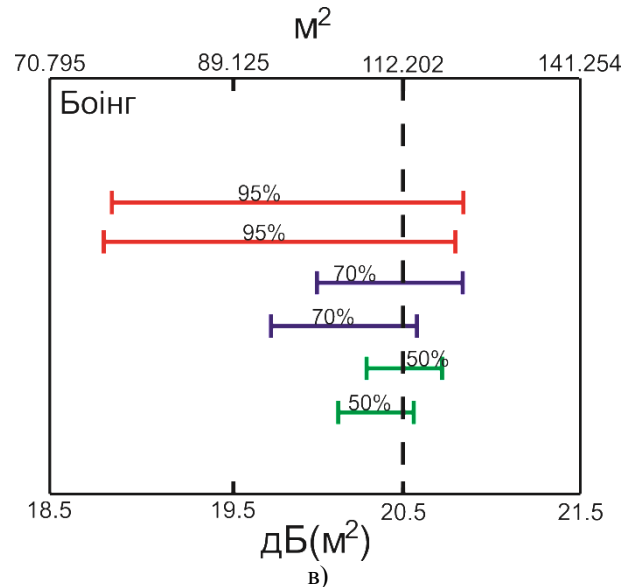


Рис. 7. Довірчі інтервали для різних вибірок із ДЗР для різних моделей

На рис. 7 вертикальним пунктиром зазначено середнє значення ЕПР для загальних сукупностей різних моделей: для моделі танка - 24.97 дБ від m^2 (тобто $314 m^2$), для моделі літака Boeing - 20.5 дБ від m^2 ($112 m^2$), для моделі літака F15 - 11.42 дБ від m^2 ($14 m^2$). На верхній та нижній горизонтальних осях представлено значення ЕПР в m^2 та в дБ від m^2 , відповідно. Із генеральних сукупностей вибираються різні вибірки – ДЗР з більшим кроком кута. Для всіх моделей із генеральної сукупності робляться вибірки з кроком 3° . Горизонтальні лінії на рис. 7 демонструють довірчі інтервали, які з заданою ймовірністю мають містити середнє значення загальної сукупності. Як видно із рис. 7, майже усі довірчі інтервали містять у собі середнє значення для загальної сукупності.

ВИСНОВКИ

Базуючись на проведених вище дослідженнях для наземних та повітряних цілей, можна на основі розрахунків ЕПР з великим кутівим кроком робити висновки щодо середнього значення ЕПР для об'єкту та визначити довірчі інтервали, в яких буде знаходитися це середнє значення з заданою ймовірністю.

Зокрема, можна зробити висновок, що для отримання відносної похибки не більшої 20% для кожної з проаналізованих вище моделей слід вибирати кутівий крок на ДРЗ не більший за 3° . Для уникнення інших похибок розрахунок слід провести декілька разів з новими вибірками.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Xu X. A New RCS Statistical Model of Radar Targets / X. Xu, P. Huang // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. –1997. – Vol. 33, No. 2. – P. 710-714.
2. Shi W. RCS Characterization of Stealth Target Using χ^2 Distribution and Longnormal Distribution / W. Shi, X.-W. Shi, L. Xu // Progress In Electromagnetic Research M. – 2012. – Vol. 27. – P. 1-10.
3. Papadopoulos S. Scenario based RCS statistics of complex ground targets / S. Papadopoulos, B. Mulgrew // 2008 IEEE Radar Conference, May 26 -30. – pp. 1-5.
4. Balajti I. RCS Statistical Aspects of Collocated Multi-Band Radar Systems Composed of “VHF, ”L” and “X” Band Radars / I. Balajti // An International Journal of Security, Strategy, Defense Studies, Military Technology and Public Management of the National University of Public Service. – 2007. – Vol. 6, No. 4. – P. 721-756.
5. Hu C. Indoor Accurate RCS Measurement technique on UHF Band / C. Hu, J. Xu, N. Li, L. Zhang // Progress In Electromagnetic Research, PIER 81, 2008. – pp. 279-289.
6. Maslovskiy A.. BSP Step for Complex Target RCS Measuring or Calculation / A. Maslovskiy, M. Legenkiy, M. Antyufeyeva // Proceedings of the conference The 9-th International Kharkov Symposium On Physics And Engineering Of Microwaves, Millimeter And Submillimeter Waves (Msmw'2016), June 21-24, Kharkiv.
7. Maslovskiy A., BSP Step for On-Ground Targets RCS Measuring or Calculation / A. Maslovskiy, M. Legenkiy, M. Antyufeyeva // Proceedings of the conference Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET'2016), July 5-7, Lviv.
8. Ling H. Shooting and bouncing rays: Calculating the RCS of an arbitrarily shaped cavity / H .Ling, R-C Chou, S-W Lee // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1989. – Vol. 37, No.2. – P. 194-205.
9. Maslovskiy A. A. Geometrical techniques for reducing radar targets detectability / A.A. Maslovskiy, M.N. Legenkiy //Proceedings of the conference on Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics, (YSC'2014), 2014.

10. Legenkiy M. Evaluation of On-Ground Object Radar Detectability Reduction, / M. Legenkiy, A. Butrym, M. Antyufeyeva // Proceedings of the conference Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, 2014. – pp. 254-257.
11. Rice J. Mathematical Statistics and Data Analysis / J. Rice. – Wadsworth Publishing Co Inc; 2nd edition edition. – 1994. – 672 p.
12. Wilk M. B. "Probability plotting methods for the analysis of data / M. B. Wilk, R. Gnanadesikan // Biometrika (Biometrika Trust). – 1968. – Vol. 55, No. 1. – P. 1–17.