

УДК 621.396.96

К.І. Ткачук

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

РАДІОЛОКАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛІТАКА BOEING 737

Побудована модель поверхні літака Boeing - 737 і проведено математичне моделювання вторинного випромінювання літака при зондуванні у сантиметровому, дециметровому і метровому діапазонах електромагнітних хвиль. Отриманні основні радіолокаційні характеристики літака Boeing 737 (ефективна поверхня розсіювання (ЕПР), некогерентна ЕПР, середні і медіанні значення ЕПР). Проведений аналіз впливу елементів конструкції літака на його радіолокаційні характеристики.

Ключові слова: аеродинамічна ціль, еталонна повітряна ціль, вторинне випромінювання, радіолокаційні характеристики.

Вступ

Постановка проблеми. На сьогоднішній день, в якості основних засобів управління і контролю повітряним рухом використовуються аеродромні та трасові РЛС, які призначені для радіолокаційного огляду повітряного простору і видачі інформації про повітряний стан у інтересах забезпечення контролю за рухом повітряних суден в районах аеродромного і районного центрів.

До тактичних характеристик таких РЛС пред'являють високі вимоги, так як від їх стабільності і надійності функціонування залежить безпека польотів повітряних суден. Тому необхідний постійний контроль за працездатністю РЛС, їх тактичних і технічних характеристик, достовірністю оцінки поточного повітряного стану.

Для проведення оперативного контролю якості технічних параметрів зон виявлення існуючих РЛС, а також з метою забезпечення досліджень, щодо розробки нових та модернізації існуючих РЛС управління повітряним рухом та комплексів ППО необхідна апріорна інформація щодо радіолокаційних характеристик сучасних і перспективних повітряних об'єктів.

Зважаючи на велику різноманітність існуючих літаків, які використовуються у цивільній авіації було відібрано Boeing 737, як варіант типового (еталонного) повітряного об'єкта. Літак Boeing 737 є найбільш поширеним літаком у світі. Так, за інформацією наведеною на офіційному сайті корпорації Boeing за станом на 2012 рік було виготовлено понад 7000 літаків Boeing 737 різних модифікацій [1].

Стаття присвячена отриманню довідкових даних про радіолокаційні характеристики літака Boeing 737.

Мета роботи. Отримання радіолокаційних характеристик літака Boeing 737 у сантиметровому, дециметровому і метровому діапазонах електромагнітних хвиль.

Радіолокаційні характеристики літака Boeing 737

Для розрахунків радіолокаційних характеристик літака Boeing 737 був використаний метод наближеного розрахунку розсіювання плоскої електромагнітної хвилі на ідеально провідному об'єкті великих електричних розмірів [2 - 4]. Метод базується на визначенні еквівалентної щільності електричного струму на поверхні розсіювача у наближенні фізичної оптики і застосуванні спеціальних кубатурних формул для розрахування інтегралів, які описують розсіяне об'єктом поле.

Моделювання поверхні Boeing 737

Для проведення математичного експерименту була використана модифікація Boeing 737-400. Boeing 737 – це низькоплан зі стріловидним крилом і однокільовим оперенням. Літак має два турбо вентиляторні двигуни, які встановлені на пілонах під крилами літака. Зовнішній вигляд Boeing 737 зображено на рис. 1.



Рис. 1. Зовнішній вигляд літака Boeing 737

У відповідності з конструкцією літака Boeing 737-400 для проведення розрахунків радіолокаційних характеристик була побудована математична модель поверхні літака [5]. При моделюванні "гладка" поверхня літака була апроксимована ділянками

трьохосних еліпсоїдів. Усього використано 58 еліпсоїдів. Зовнішній вигляд математичної моделі поверхні Boeing – 737 представлений на рис. 2.

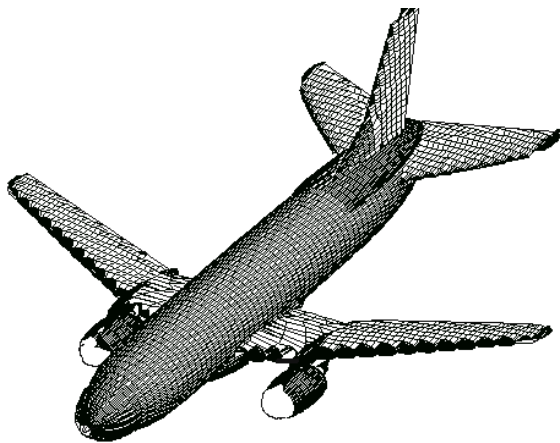


Рис. 2. Модель поверхні літака Boeing – 737

Результати розрахунку радіолокаційних характеристик моделі літака Boeing 737

Для всіх наведених у статті графіках та діаграмах параметри моделювання вторинного випромінювання моделі літака Boeing 737 складали:

- кут розносу між передавачем і приймачем 0 градусів (сумісне зондування);
- кут місця зондування -3 градуси відносно площини горизонту (зондування з нижньої на- півсфери);
- азимут відраховується в градусах від носового ракурсу з кроком 0,02 градуса.

Розрахунок радіолокаційних характеристик моделі літака Boeing 737 проводився для зондуючих сигналів у сантиметровому, дециметровому та метровому діапазонах на 6 частотах, а саме: 10ГГц (3 см), 5ГГц (6 см), 3ГГц (10 см), 1.3ГГц (23 см), 1ГГц (30 см), 166МГц (180 см). Значення ЕПР наведені в квадратних метрах (рис. 3 - 14).

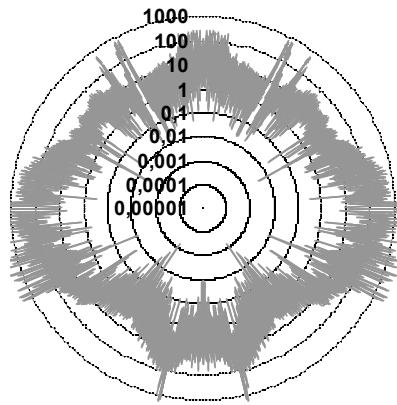
Миттєві значення ЕПР як правило не використовуються в інженерних розрахунках теорії та техніки радіолокації, так як функція ЕПР від ракурсу зондування є швидко осцилююча, з діапазоном коливань значень ЕПР у декілька порядків, в залежності від електричної довжини об'єктів дослідження і їх конфігурації. Крім того, ракурс об'єкта зондування, особливо для аеродинамічних цілей, є випадковим у зв'язку з постійною вібрацією, тому, з метою надання практичного значення отриманих результатів у статті наведені середні (стовпчики чорного кольору) і медіанні (стовпчики світло-сірого кольору) значення ЕПР літака рис. 3б - 8б. Середні і медіанні значення розраховувались у азимутальних секторах з шириною 20°. Медіанне значення ЕПР - це вибіркоче значення ЕПР з ранжовуваної сукупності значень ЕПР у фіксованому секторі ракурсів зондування, яке розділяє ранжовану сукупність значень ЕПР на дві рівні частини.

Слід зазначити, що медіанні значення ЕПР краще характеризують радіолокаційну помітність аеродинамічних об'єктів у порівнянні з середніми значеннями ЕПР. Так, наприклад, якщо у азимутальному секторі з шириною 20° є хоча би один азимутальний напрямок, при якому значення ЕПР суттєво більше (на 2 - 3 порядки), ніж для решти азимутальних напрямків, то середнє значення ЕПР у секторі буде суттєво відрізнятися від реального для всіх ракурсів зондування. У аналогічному випадку, медіанне значення ЕПР буде відсікати окремі стрибки миттєвого ЕПР. Крім іншого, медіанне значення ЕПР використовується для вирішення задач радіолокаційного виявлення та розпізнавання цілей.

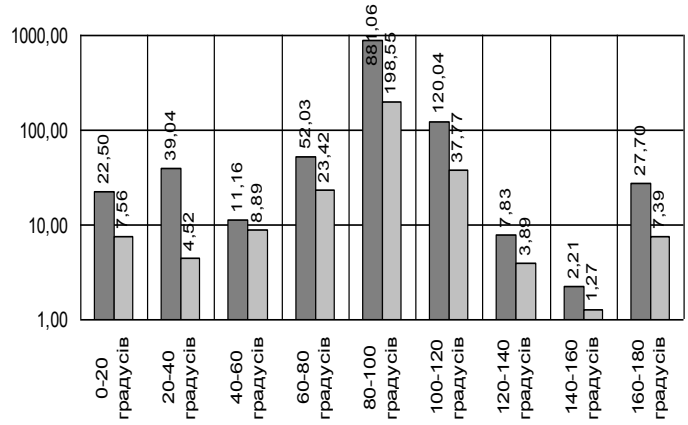
Отримані у статті результати добре узгоджуються з теоретичними дослідженнями радіолокаційних характеристик аеродинамічних об'єктів. Найбільші значення ЕПР спостерігаються для бокових ракурсів. Для всіх проведених розрахунків функція ЕПР від ракурсу зондування є швидко осцилюючою, при цьому дисперсія значень ЕПР значно вище при зондуванні у сантиметровому та дециметровому діапазонах (рис. 3, а - 7, а) у порівнянні з метровим діапазоном (рис. 8, а).

Середні значення ЕПР для бокових ракурсів зондування досягають 200 – 600 м², так як саме для бокових ракурсів зондування площа поверхні літака, яка приймає участь у розсіюванні ("освітлена") найбільша.

Для діапазонів зондування у азимутальній площині 26° - 28° і 332° - 334° спостерігаються значні сплески значень ЕПР, до сотен квадратних метрів, для всіх частот зондування, які були використані при розрахунках. Високі значення ЕПР літака у зазначених діапазонах обумовлені розсіюванням на передніх кромках правого і лівого крила, відповідно. Слід зазначити, що кромки крил літака моделювались, як "гладка" поверхня з відповідними радіусами кривизни. Фактично, при зондуванні у напрямку ортогональному до крила літака на поверхні передньої кромки крила виникає лінія, що "блищить". Саме ця лінія, що "блищить", обумовлює високі значення ЕПР літака для зазначених ракурсів. Числові значення ЕПР для таких ракурсів обумовлені електричною довжиною передньої кромки крила, яка для випадку $\lambda = 0.03$ м складає 343 λ , а для $\lambda = 1.8$ м складає 6 λ . Різниця між значеннями ЕПР літака для різної довжини зондувальної хвилі добре видна на рис. 3, а і 8, а. Ширина сектору зворотнього випромінювання такого елемента є функцією від електричної довжини кромки і у випадку моделі Boeing 737, для передніх кромки крил дорівнює 2°. Для ракурсів зондування, які відхиляються від ортогонального напрямління до передньої кромки крила на 1.5° - 2° значення ЕПР літака знижуються до десятків квадратних метрів.

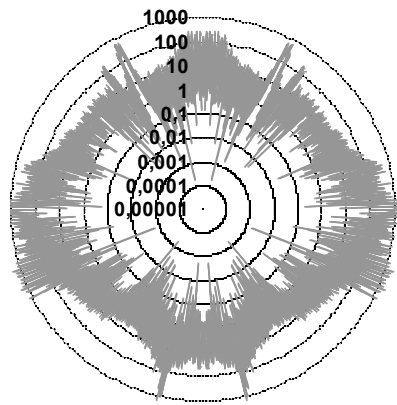


а – кругова діаграма ЕПР

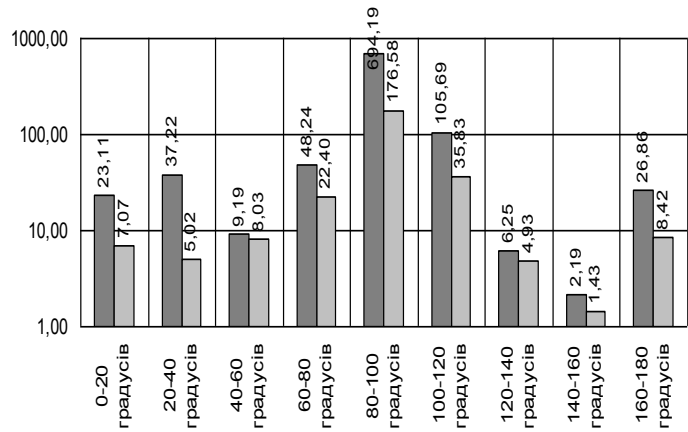


б – гістограма ЕПР

Рис. 3. ЕПР моделі Boeing 737, частота зондування 10 ГГц ($\lambda = 3$ см)

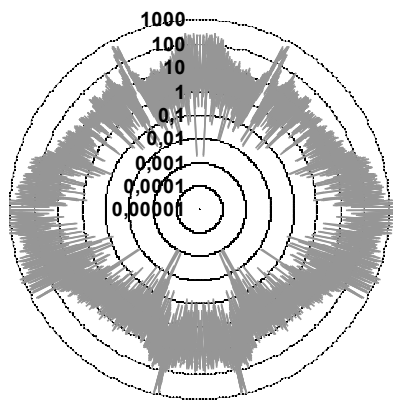


а – кругова діаграма ЕПР

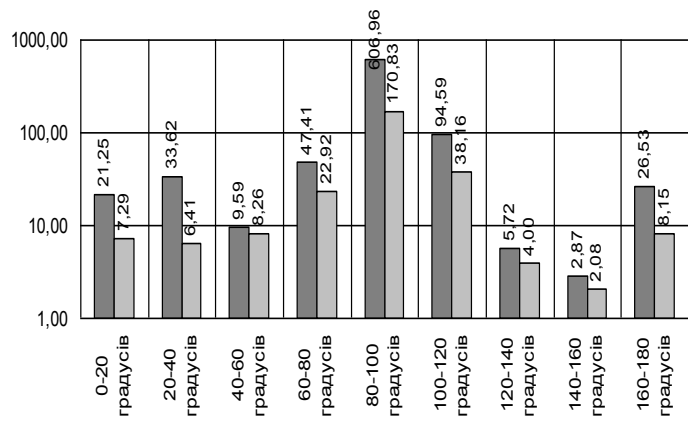


б – гістограма ЕПР

Рис. 4. ЕПР моделі Boeing 737, частота зондування 5 ГГц ($\lambda = 6$ см)

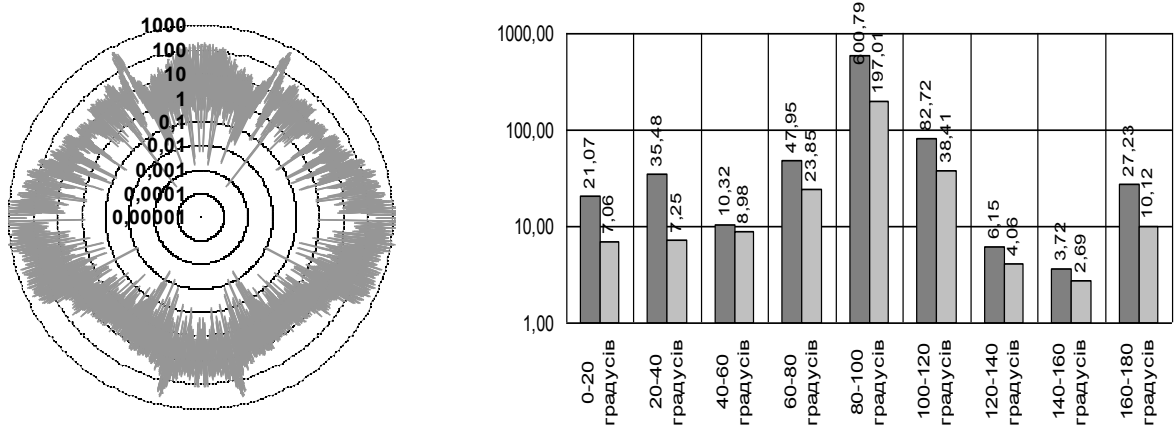


а – кругова діаграма ЕПР



б – гістограма ЕПР

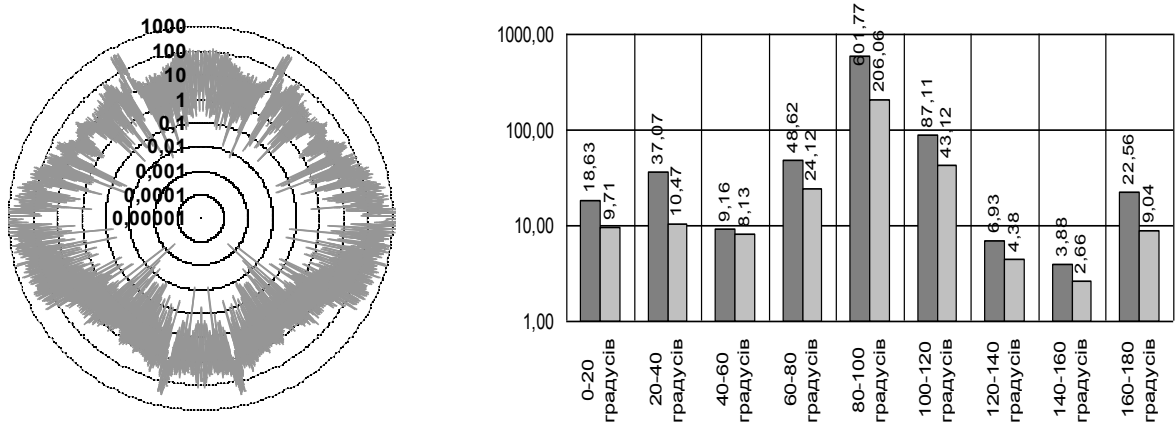
Рис. 5. ЕПР моделі Boeing 737, частота зондування 3 ГГц ($\lambda = 10$ см)



а – кругова діаграма ЕПР

б – гістограма ЕПР

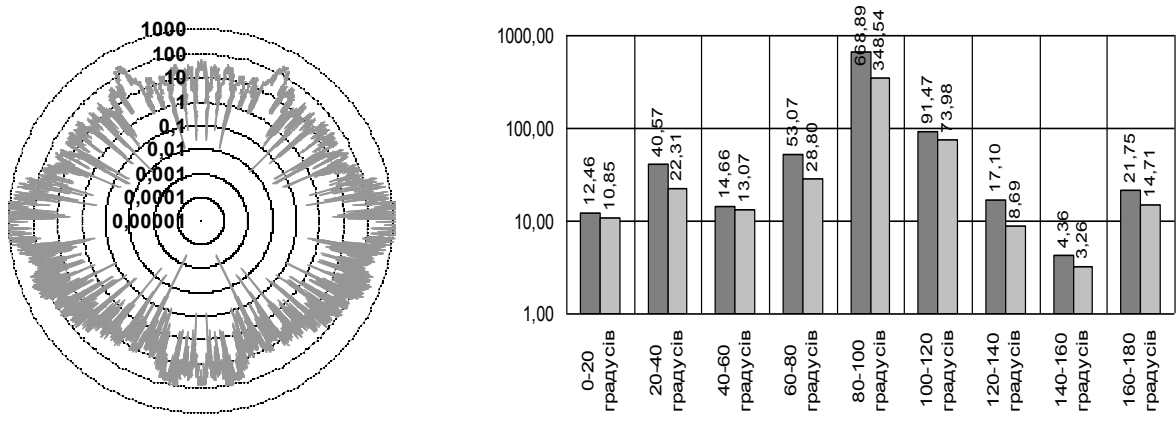
Рис. 6. ЕПР моделі Boeing 737, частота зондування 1,3 ГГц ($\lambda = 23$ см)



а – кругова діаграма ЕПР

б – гістограма ЕПР

Рис. 7. ЕПР моделі Boeing 737, частота зондування 1 ГГц ($\lambda = 30$ см)



а – кругова діаграма ЕПР

б – гістограма ЕПР

Рис. 8. ЕПР моделі Boeing 737, частота зондування 166 МГц ($\lambda = 180$ см)

Аналогічне явище виникає для ракурсів зондування у азимутальних діапазонах 32° - 37° і 323° - 328° , що обумовлено відбиттям від передніх кромки крил та стабілізаторів Boeing 737.

Передня кромка крил складається з двох прямолінійних кромки, які розташовані під різними кутами до поздовжньої вісі літака, а саме 27° (333°) для частини передньої кромки крила, що розташована за двигуном літака і 35° (325°) для частини передньої кромки, що розташована ближче до фюзеляжу.

Крім того, напрямок передньої кромки стабілізаторів складає $\pm 35^{\circ}$ до поздовжньої вісі літака.

Таким чином, загальне зворотне розсіювання літака у азимутальних діапазонах 32° - 37° і 323° - 328° обумовлюється зворотнім випромінюванням передніх кромки стабілізаторів і частини передніх кромки крил літака. В силу того, що електрична довжина зазначених кромки значно менше, ніж у крил літака (170λ для передньої кромки стабілізатора у випадку $\lambda=0.03\text{м}$) значення ЕПР досягають лише десятків метрів, але розширюється ширина сектору зворотнього випромінювання. Більш того, на діаграмі ЕПР для випадку $\lambda=1.8\text{м}$ (рис. 8а) відсутні явно виражені сплески ЕПР для зазначених азимутальних діапазонів. Це обумовлено невеликою (2.8λ) електричною довжиною передньої кромки стабілізаторів для довжини зондувальної хвилі $\lambda = 1.8\text{ м}$, і відповідно, низьким рівнем зворотнього вторинного випромінювання від кромки стабілізаторів, яке сумірне з рівнем зворотнього вторинного випромінювання інших частин літака.

Зазначенні вище пояснення повною мірою відносяться до інших кромочних ділянок літака: задні і бокові кромки крил, горизонтальних та вертикальних стабілізаторів.

ЕПР моделі Boeing 737 у діапазоні азимутів зондування $\pm 7^{\circ}$ має ярко виражені значні коливання від одиниць до десятків м^2 (рис. 3а - 8а), які обумовлені сумарним зворотнім розсіюванням від 2-х двигунів літака.

При зондуванні у напрямку вздовж осі двигуна, виникає кругова лінія на поверхні передньої частини двигуна, що "блищить". Відповідно, зворотне розсіювання для лобових ракурсів у горизонтальній площині обумовлюється зворотнім розсіюванням передньої частини двигунів, так як інші елементи моделі вносять значно менший вклад у сумарне вторинне випромінювання літака. Значення ЕПР одного двигуна Boeing 737 для лобових ракурсів досягає десятків і навіть сотень м^2 в залежності від довжини хвилі зондувального сигналу і відповідно електричного розміру.

При зондуванні у напрямках, відмінних від паралельного до вісі двигуна, на поверхні (передній чи задній) двигуна виникає дві локальні ділянки повер-

хні, що "блищать". У цьому випадку зворотне розсіювання від них значно менше, ніж при зондуванні у напрямках вздовж осі двигуна.

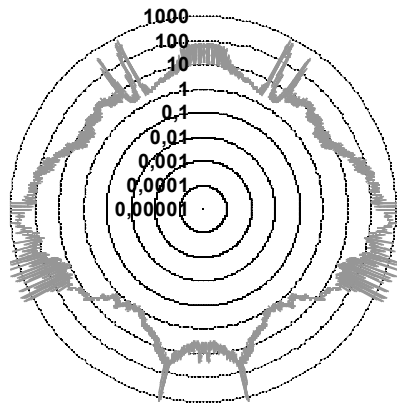
ЕПР об'єкта складної форми є швидкоосцилюючою функцією, яка залежить від частоти зондувальної хвилі і ракурсу об'єкта. В обох випадках це обумовлено різницею фаз сигналів, відбитих різними ділянками поверхні моделі, а також картиною зон Френеля, що значно змінюється на поверхні об'єкта навіть при незначній зміні частоти зондувальної хвилі або ракурсу зондування (об'єкту). З метою отримання стійких оцінок ЕПР, необхідно проводити усереднення в частотному діапазоні або в секторі ракурсів зондування [4]. Слід зазначити, що методики розрахунку ЕПР, що використовуються, достатньо затратні у частині ресурсів ПЕОМ. Так, розрахунок кругової діаграми ЕПР моделі Boeing 737 для фіксованої частоти зондування і фіксованого кута місця зондування з кроком по азимуту $0,02^{\circ}$ займає приблизно 25 годин. Внаслідок цього проведення усереднення в частотному діапазоні потребує значного збільшення часу. Як зазначено вище, одним з факторів, які впливають на осциляцію функції ЕПР від частоти і ракурсу зондування є фази, з якими складаються відгуки від різних ділянок поверхні об'єкту.

Для зниження впливу цього фактору і, відповідно, з метою отримання більш стійких оцінок ЕПР доцільно використовувати суму ЕПР окремих ділянок поверхні об'єкту, що досліджується. Оцінка ЕПР у цьому випадку має назву "некогерентної" ЕПР [4], оскільки сума ЕПР окремих ділянок поверхні об'єкту не враховує фазових набігів. У [4] показано, що некогерентна ЕПР практично не відрізняється від ЕПР, яка усереднена в діапазоні частот зондування і є достатньо стійкою оцінкою радіолокаційної помітності об'єктів.

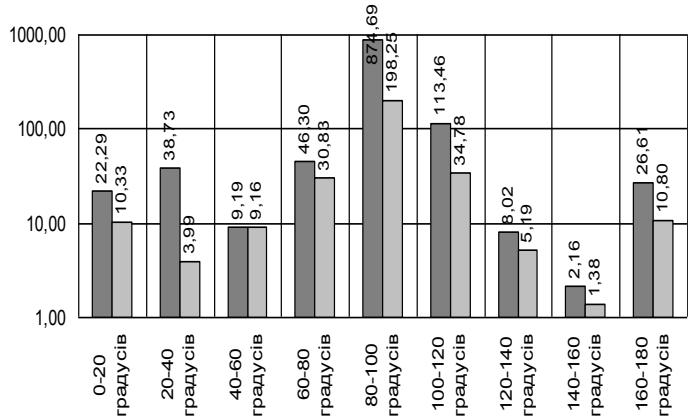
На рис. 9, а – 14, а наведені кругові діаграми некогерентної ЕПР моделі Boeing 737, а на рис. 9б-14б гістограми середніх і медіанних значень некогерентної ЕПР для різних частот зондування у сантиметровому, дециметровому та метровому діапазонах.

Частоти зондування і умови проведення розрахунків некогерентної ЕПР тіж самі, як і ті, що були застосовані при розрахунках когерентної ЕПР (рис. 3 – 8).

Як видно з рис. 9, а – 14, а, залежність некогерентних значень ЕПР моделі від ракурсу зондування має більш стійкий, сглажений характер у порівнянні з функцією миттєвих значень ЕПР (рис. 3а-8а). Середні і медіанні значення некогерентної ЕПР моделі Boeing 737 зменшуються (на 5-10%) у порівнянні з аналогічними значеннями миттєвої ЕПР для всіх частот зондування, які досліджувались і азимутальних діапазонів усереднення.

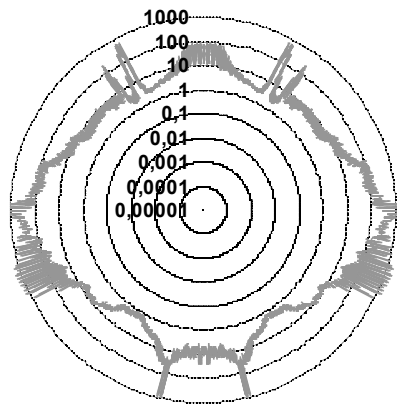


а – кругова діаграма НЕПР

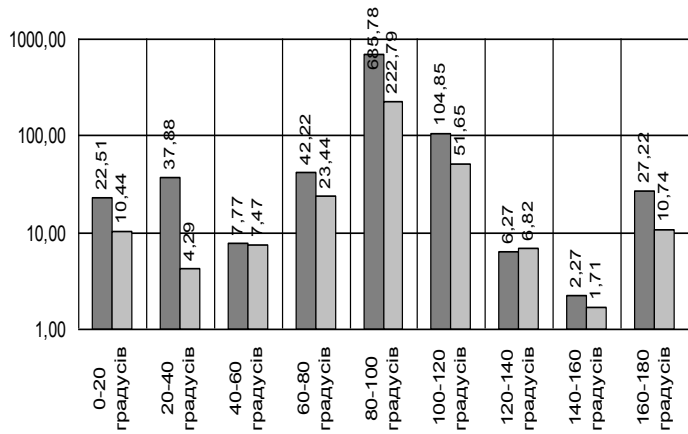


б – гістограма НЕПР

Рис. 9. НЕПР моделі Boeing 737, частота зондування 10 ГГц ($\lambda=3$ см)

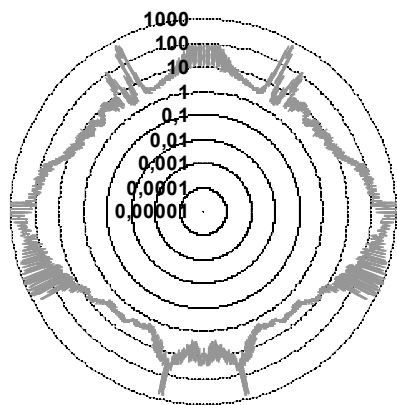


а – кругова діаграма НЕПР

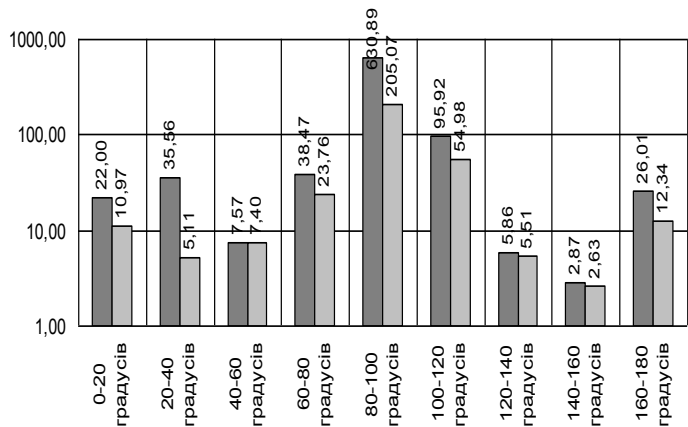


б – гістограма НЕПР

Рис. 10. НЕПР моделі Boeing 737, частота зондування 5 ГГц ($\lambda=6$ см)

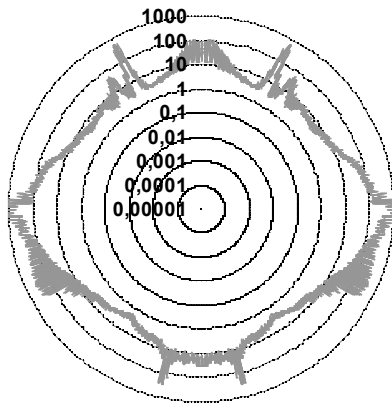


а – кругова діаграма НЕПР

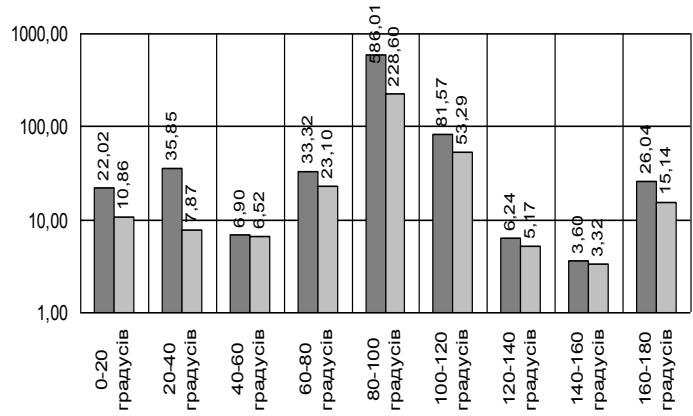


б – гістограма НЕПР

Рис. 11. НЕПР моделі Boeing 737, частота зондування 3 ГГц ($\lambda=10$ см)

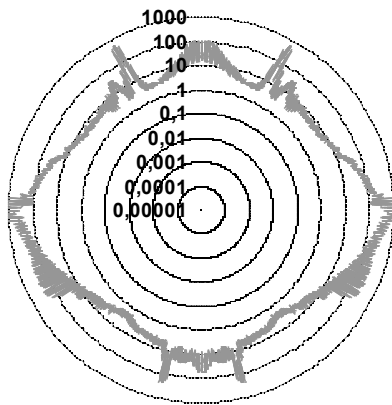


а – кругова діаграма НЕПР

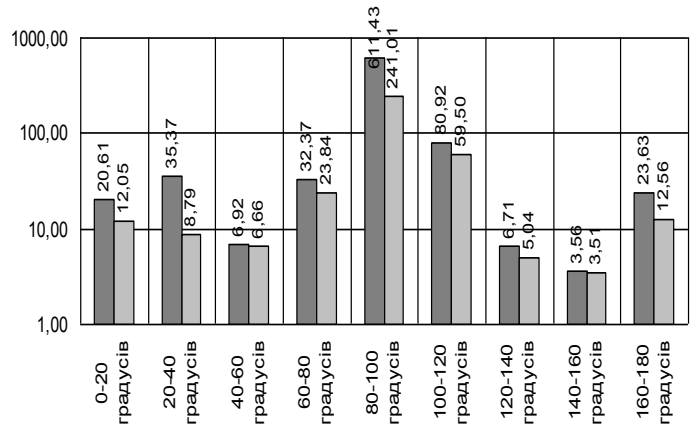


б – гістограма НЕПР

Рис. 12. НЕПР моделі Boeing 737, частота зондування 1.3 ГГц ($\lambda=23$ см)

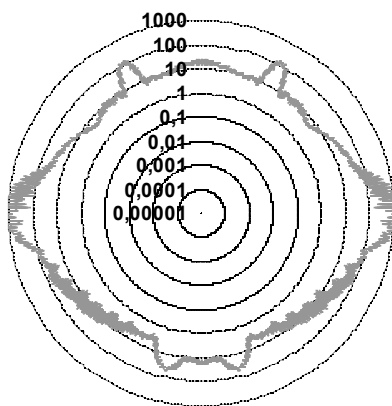


а – кругова діаграма НЕПР

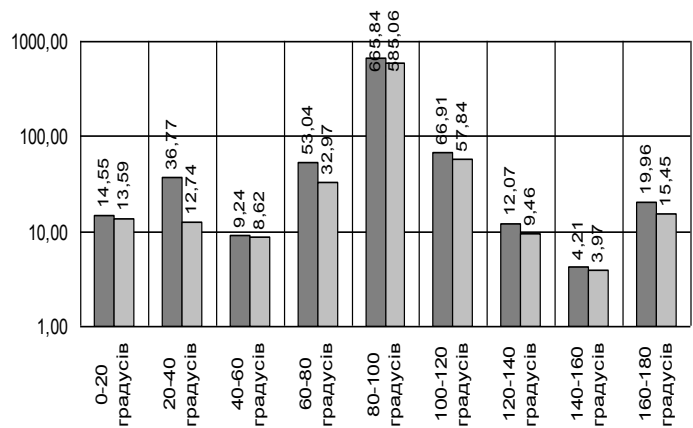


б – гістограма НЕПР

Рис. 13. НЕПР моделі Boeing 737, частота зондування 1 ГГц ($\lambda=30$ см)



а – кругова діаграма НЕПР



б – гістограма НЕПР

Рис. 14. НЕПР моделі Boeing 737, частота зондування 166 МГц ($\lambda=180$ см)

Висновки

Розроблена модель поверхні літака Boeing 737, на базі якої проведено математичне моделювання вторинного випромінювання літака. Отримані основні радіолокаційні характеристики Boeing 737 (ефективна поверхня розсіювання (ЕПР), некогерентна ЕПР, середні і медіанні значення ЕПР) у сантиметровому, дециметровому і метровому діапазонах електромагнітних хвиль.

Ці результати можуть бути використані для вирішення задач оперативного контролю якості технічних параметрів зон виявлення існуючих РЛС, а також при дослідженнях, щодо розробки нових та модернізації існуючих РЛС управління повітряним рухом та комплексів ППО.

Список літератури

1. Boeing delivers the 7370th 737 [Електронний ресурс]. - Режим доступу до ресурсу: URL: <http://www.boeing.mediaroom.com/index.php?s=43&item=2484>
2. Рассеяние электромагнитных волн воздушными и наземными радиолокационными объектами: монография / О.И. Сухаревский, В.А. Василец, С.В. Кукобко, [и др.]; под ред. О.И. Сухаревского. – Х.: ХУПС, 2009. – 468 с.

3. Фундаментальные и прикладные задачи теории рассеяния электромагнитных волн / Ю.К. Сиренко, И.В. Сухаревский, О.И. Сухаревский, Н.П. Яшина; под ред. Ю.К. Сиренко. – Х.: Крок, 2000. – 344 с.

4. Сухаревский О.И. Эффективная поверхность рассеяния объектов с неидеально отражающей поверхностью, имеющей изломы. / О.И. Сухаревский, В.А. Василец, С.А. Горелишев, С.В. Нечитайло, К.И. Ткачук // Зарубежная радиоэлектроника. – М., 2001. - № 6. - С. 41-48.

5. 737 Airplane Characteristics for Airport Planning. [Електронний ресурс]. - Режим доступу до ресурсу: URL: <http://www.boeing.com/commercial/airports/737.htm>.

Надійшла до редколегії 12.10.2012

Рецензент: д-р техн. наук проф. О.І. Сухаревський. Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ САМОЛЕТА BOEING 737

К.И. Ткачук

Построена модель поверхности самолета Boeing 737 и проведено математическое моделирование вторичного излучения самолета при зондировании в сантиметровом, дециметровом и метровом диапазонах электромагнитных волн. Получены основные радиолокационные характеристики самолета Boeing 737 (эффективная поверхность рассеивания (ЭПР), некогерентная ЭПР, средние и медианные значения ЭПР). Проведен анализ влияния элементов конструкции самолета на его радиолокационные характеристики.

Ключевые слова: аэродинамическая цель, вторичное излучение, радиолокационные характеристики, эталонная воздушная цель.

RADAR CHARACTERISTICS OF THE AIRCRAFT BOEING 737

К.И. Tkachuk

The model of the aircraft Boeing 737 surface has been developed. Based on the model, mathematical modeling of the aircraft secondary radiation was conducted for the centimetric, decimetric and metric electromagnetic waves. Main radar characteristics of Boeing 737 have been calculated, namely: the aircraft absolute cross-section, incoherent cross-section, arithmetic mean values and median values of the aircraft cross-section. There is analysis of the aircraft component influence on it's radar characteristics.

Key words: aerodynamic target, backward radiation, calibration aerodynamic target, radar characteristic.