

УДК 623.593.53

**ВОЛИНЕЦЬ В.Л.**, провідний науковий співробітник, кандидат технічних наук,  
старший науковий співробітник

**МАМОНОВА Н.Л.**, науковий співробітник

**НЕЛЬСОН О.В.**, науковий співробітник

## **ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПАСИВНИХ ЗАСОБІВ ІМІТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОЇ ПЛОЩІ РОЗСІЯННЯ ПОВІТРЯНИХ ЦІЛЕЙ**

*Представлено результати порівняльного аналізу засобів імітування ефективної площі розсіяння на основі кутикових відбивачів, самофокусуючих антенних решіток, лінз Люнеберга та двохточкового типу з жорсткою в'язкою*

*Ключові слова: імітування, повітряна ціль, ефективна площа розсіяння, імітатори: кутикові, лінзові, антенні решітки, двохточкові*

Одним із основних елементів цільового спорядження сучасних та перспективних мішеневих безпілотних авіаційних комплексів (БпАК) [1] є засоби імітування ефективної площі розсіяння (ЕПР) повітряних цілей різних типів в радіолокаційному діапазоні довжин хвиль надвисоких частот.

ЕПР зображає ефективну площу поперечного перерізу вторинного випромінювання еквівалентної цілі, яка ізотропно розсіює всю падаючу на неї енергію та створює в приймачі РЛС такий самий сигнал, як і від реальної цілі.

Математичне визначення ЕПР має наступний вигляд [2]:

$$\sigma = \frac{P_{np} (4\pi R^2)^2}{P_{пер} S_A D},$$

де  $P_{np}$  - потужність електромагнітної хвилі на вході приймача;  $P_{пер}$  - потужність передавача;  $R$  - дальність від РЛС до цілі;  $S_A$  - ефективна площа приймальної антени РЛС;  $D$  - коефіцієнт направленої дії антени.

За наведеною формулою ЕПР має розмірність площі ( $m^2$ ) та визначає енергетичну (а не геометричну) характеристику вторинного випромінювання цілі в точці приймання і не залежить від інтенсивності первинної хвилі.

Визначення ЕПР являється базовим для обчислювання ЕПР простих за конфігурацією імітаторів повітряних цілей.

ЕПР складних цілей вимірюється в умовах полігонів (або в безлунових камерах) на основі рівняння дальності в радіолокації.

Числове значення ЕПР дійсне тільки для конкретного літального апарату, комбінації поляризацій, просторового положення цілі та робочого діапазону частот

В однопозиційній радіолокації ЕПР залежить від двох просторових кутів і робочої частоти РЛС.

На основі загальних положень щодо ЕПР, викладених вище, перейдемо до аналізу типів імітаторів повітряних цілей та порівняння їх основних характеристик.

В табл. 1 представлені типові імітатори повітряних цілей в радіолокаційному діапазоні електромагнітних хвиль та математичне визначення їх ЕПР [3...6].

Таблиця 1

Типи імітаторів та їх ЕПР у радіолокаційному діапазоні довжин хвиль

№ з/п	Тип імітатора		Ефективна площа розсіяння ( $\sigma$ )	Примітка
1	Кутиковий	трикутний	$\frac{4 \pi a^4}{3 \lambda^2}$	$a$ - розмір грані, $\lambda$ - довжина хвилі
		квадратний	$12 \frac{\pi a^4}{\lambda^2}$	$a$ - розмір грані
		коловий	$\frac{16 \pi a^4}{3 \lambda^2}$	$a$ - радіус грані
2	Біконічний		$\frac{2\pi r_{cp}^2 h^2}{\lambda^2}$	$r_{cp}$ - середній радіус конуса, $h$ - висота
3	Півхвильовий диполь		$0,86\lambda^2$	-
4	Лінза Люнеберга		$4 \frac{\pi^3 d^4}{\lambda^2}$	$d$ - діаметр лінзи
5	Решітка Ван Ата		$\frac{4\pi}{\lambda^2} S_{ef}^2 \left[ \text{Sin} \left( \frac{\pi}{2} \text{Cos} \theta \right) \right]^4$	$S_{ef}$ - ефективна площа розкриття решітки, $\theta$ - кут опромінення
6	Двохточковий		$4\sigma \text{Cos}^2 \left( \frac{2\pi l_v}{\lambda} \text{Cos} \theta \right)$	$l_v$ - довжина в'язки, $\theta$ - кут опромінення, $\sigma$ - ЕПР елементарного імітатора

Кутикові імітатори ЕПР (табл. 1, п. 1) уявляють собою жорстку конструкцію, яка складається із двох або більше взаємно перпендикулярних граней, що проводять, та електрично з'єднані між собою. Основна перевага кутикових імітаторів ЕПР полягає в тому, що значна частина електромагнітної енергії, яка падає на них в границях внутрішнього кута, відбивається в напрямку протилежному напрямку опромінення. Ця властивість дозволяє використовувати невеликі кутикові імітатори для імітації повітряних цілей із значною ЕПР.

Величина ЕПР кутикових імітаторів залежить від напряму падіння хвилі опромінення, який задається величиною кутів. Найбільшу ЕПР серед тригранних

кутикових імітаторів має імітатор з квадратними гранями, але він має і найбільш вузьку діаграму спрямованості та менш міцну конструкцію.

Біконічний імітатор ЕПР (табл. 1, п. 2) також належить до різновиду кутикових точкових імітаторів і уявляє подвійний конус. Біконічний імітатор має рівномірну коловоу діаграму вторинного випромінювання.

ЕПР такого імітатора при площині поляризації поля електромагнітної хвилі, яка паралельна поздовжній осі подвійного конусу, аналогічна ЕПР циліндра з радіусом  $r_{cp} = 0,5(r_{max} + r_{min})$  та висотою  $h$ .

Півхвильовий дипольний імітатор ЕПР (табл. 1, п. 3) використовуються для створення пасивних навмисних маскуючих та імітуючих перешкод роботі РЛС.

Наведена формула для ЕПР цього імітатора, що резонує, в площині спостереження, нормальній до його осі, має теоретичне значення.

Оскільки орієнтація диполя в атмосфері випадкова, то випадкове і значення його ЕПР. Середня ефективна площа розсіяння півхвильового диполя дорівнює  $\sigma_{cp} \approx 0,17\lambda^2$ . Тобто середня ЕПР в п'ять разів менша від теоретично можливої.

ЕПР складених у пачки диполів має також квадратичну залежність від частоти. Диполі є резонансними відбивачами імітування ЕПР для частот, які відрізняються не більше ніж на  $\pm (10...15)\%$  від резонансної частоти. За межею цих значень частоти ЕПР диполів значно знижується. Кутовий сектор відбиття дипольного імітатора складає приблизно  $70^\circ$  [3].

Діелектрична лінза Люнеберга (табл. 1, п. 4) базується на використанні антени оптичного типу. Завдяки сферичній симетрії фокусувальна здатність цієї лінзи не залежить від напрямку падіння електромагнітної хвилі.

Якщо частина поверхні лінзи (кульової або циліндричної форми) металізована, то вона стає імітатором ЕПР, який діє в просторовому куті, що дорівнює куту, який охоплює металеве покриття. Поле в апертурі лінзи визначається на основі геометричної оптики, а зворотна діаграма спрямованості залежить від конфігурації металічного покриття і розраховується апертурним методом.

Для ілюстрації характеристик лінзового імітатора наведемо приклад щодо імітування повітряної цілі типу тактичного винищувача [ЕПР =  $(3...5)m^2$ ] в X-діапазоні довжин хвиль з використанням лінзи Люнеберга типу XMR06.5 ( $d = 16cm$ , маса = 1,2кг) [4]. В діапазоні азимутальних кутів спостереження  $\pm 50^\circ$  ЕПР цієї лінзи дорівнює  $3m^2$ , а максимальне значення -  $4m^2$ .

На рисунку 1 наведена типова залежність ЕПР лінз Люнеберга такого виду від азимутального кута спостереження.

Антенна решітка Ван Ата (табл. 1, п. 5) - перевипромінююча пасивна антенна решітка з прилаштованим набором відрізків надвисокочастотних ліній передавання однакової довжини, які з'єднують елементи, розташовані на однаковій відстані від центру антенної решітки - є еквівалентом кутикових імітаторів.

Антенна решітка Ван Ата також може бути використана, як імітатор ЕПР повітряних цілей різних класів. Наведена формула для ЕПР відповідає решітці з  $n$  півхвильових вібраторів і площею розкриву  $S_E = n\lambda^2/4$  (відстань між вібраторами  $\lambda/2$ , відстань від екрану  $\lambda/4$ ) та виразом у прямокутних дужках, який є діаграмою спрямованості диполя в Н-площині з урахуванням дзеркального відображення.

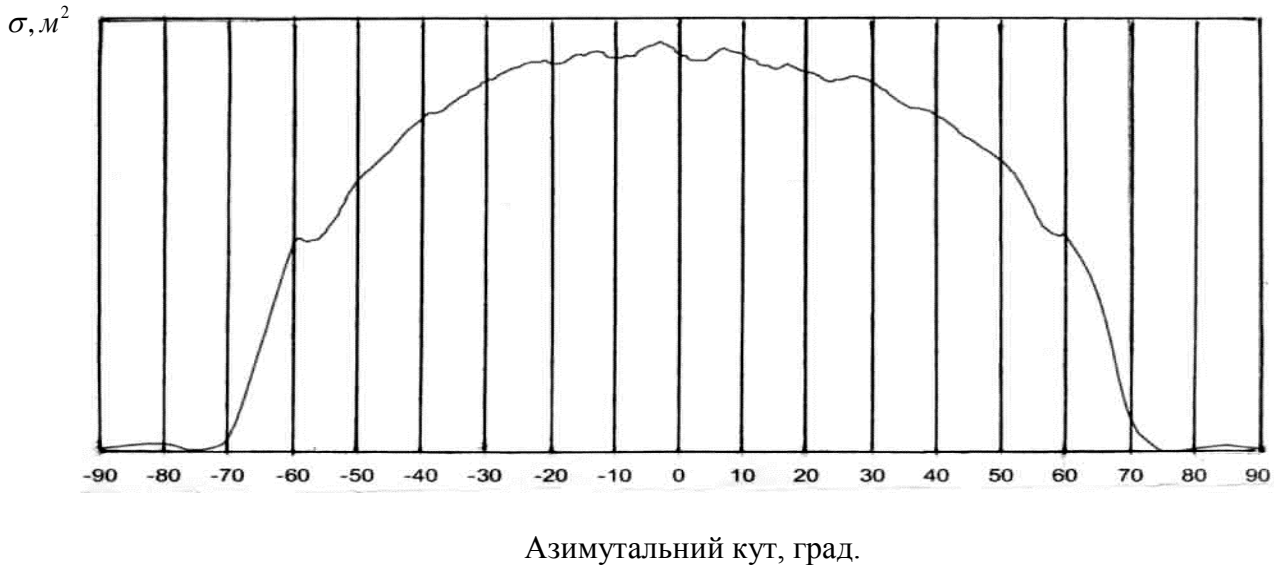


Рис. 1. Типова залежність ЕПР лінз Люнеберга від кута спостереження

Відповідно до табл. 1 ЕПР решітки Ван Ата залежить від кута падіння хвилі  $\theta$  і квадрату робочої довжини хвилі РЛС. Ці два фактори визначають основні його недоліки: вузьку частотну діапазонність та поляризаційну розрізнюваність.

Двохточковий імітатор (табл. 1, п. 6) можна розглядати, як окремий випадок багатоточкового, де два відбивачі електромагнітної хвилі з'єднані між собою в'язким або гнучким зв'язком.

Наявність гнучких в'язок між елементами імітатора та використання різних за формою елементів не дозволяє знайти точного аналітичного рішення задачі обчислювання значень скривлення фазового фронту для різних кутів його опромінювання.

У практиці імітування повітряної цілі може виникнути необхідність одночасного використання двох однотипних вищезазначених точкових імітаторів ЕПР. Для цього випадку в табл. 1 (п. 6) наведена ЕПР двухточкового ізотропного імітатора з жорсткою в'язкою, який знаходиться в об'ємі розділення РЛС [5...6].

В табл. 2 зображені обчислені дані щодо зсуву фаз та відносного значення ЕПР.

Таблиця 2

Відносне значення ЕПР двухточкового імітатора з однотипними елементами

Позначення характеристики	Числове значення характеристики									
	0	22,5	45	67,5	90	112,5	135	157,5	180	
$\varphi_0, \text{град}$	0	22,5	45	67,5	90	112,5	135	157,5	180	
$\text{Cos } \varphi_0$	1	0,92	0,71	0,38	0	-0,38	-0,71	-0,92	-1	
$\sigma_{\Sigma} / \sigma_{EI}$	4	3,84	3,42	2,76	2	1,24	0,58	0,16	0	

Відповідно до табл. 2 для задовільного функціонування двохточкового імітатора ЕПР елементи його геометрії повинні вибиратися таким чином, щоб зсув фаз інтерферуючих коливань знаходився в межах від 0 до  $\pi/2$ . За цих умов сумарна ЕПР буде змінюватися в межах від чотирьох до двох значень ЕПР точкових імітаторів (наприклад, кутикових).

Уявляє інтерес проведення порівняльного аналізу імітування ЕПР вищезазначеними імітаторами відносно ЕПР лінзи Люнеберга.

Розглянемо коефіцієнт відбиття різних типів імітаторів відносно ЕПР імітатора типу лінзи Люнеберга за умов однакових довжин хвиль та визначених початкових даних. В табл. 3 наведені значення обчислених відносних коефіцієнтів відбиття.

Таблиця 3

Відносний коефіцієнт ефективної площі розсіяння різних імітаторів ЕПР

Параметр	Значення характеристики за типами імітаторів					
	кутиковий			біконічний	решітка Ван Ата	двохточковий
	трикутний	квадратний	коловий			
Відносний коефіцієнт відбиття	$1,08 \times 10^{-2}$	$3,04 \times 10^{-1}$	$1,35 \times 10^{-1}$	$1,6 \times 10^{-1}$	$1,01 \times 10^{-1} \lambda$	2,16
Початкові дані	$a = d$	$a = d$	$a = d$	$r_{cp}^2 h^2 = d^4$	$s_{ef}^2 = d^4$ $\theta = 0$	$l = n\lambda, \theta = 0,$ $n - \text{ціле число,}$ $\sigma - \text{трикутник}$

Відповідно до табл. 3 імітатори на основі лінзи Люнеберга мають ЕПР у два рази більшу по відношенні до двохточкового імітатора та на порядок більше по відношенні до інших типів імітаторів.

За результатами порівняльного аналізу найбільш прийнятним пасивним імітатором ЕПР повітряних цілей в радіолокаційному діапазоні хвиль є лінза Люнеберга, для якої характерні наступні особливості:

повна заміна кутикових імітаторів із забезпеченням функціонування в більш широкому кутовому секторі;

незалежність від напрямку векторів електромагнітного поля;

частотна діапазонність, яка визначається тільки частотною діапазонністю опромінювача лінзи;

синфазність електромагнітного поля в апертурі лінзи, яка не порушується, якщо довжина шляхів двох променів в лінзі буде відрізнятися на ціле число довжин хвиль.

## ЛІТЕРАТУРА

1. IHS Jane's All the Worlds Aircraft: Unmanned 2012 – 2013.- 358 p.
2. Василенко Н.Т. и др. Авиационное радиоэлектронное оборудование. - М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1985. - 264 с.

3. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник. Изд. 2-е перераб. и доп. / Под ред. Я.Д. Ширмана. - М.: Радиотехника, 2007. - 512 с.
4. Technical data sheet [Електронний ресурс] - Режим доступу: email: luneberg @ luneberg. com / web site: www. luneberg. com.
5. Сканирующие антенные системы СВЧ / Под ред. Г.Т. Маркова и А.Ф. Чаплина.- Том 3. - М.: Сов. радио, 1971. - 464 с.
6. Волынец В.Л., Дидковский М.П., Утюжников А.Н. Метод распознавания радиолокационных целей по наблюдаемым характеристикам распределения выборки отраженных сигналов.- Международная конференция “ Change ` 92 ” «Методы распознавания изменений в случайных процессах и полях» (29 сентября - 2 октября 1992 г., г. Киев). - Тезисы докладов.- Киев, 1992, с.54-55.

*Надійшла до редакції 30.10.2014*