

СТЕБЛЯНКО П.О., д. ф.-м. н., проф.,
КАТКОВА Т.І., д.т.н., проф.,
СТЕЛЮК Б.Б., к.т.н., доц.

Університет митної справи та фінансів, м. Дніпро

МОДЕЛЮВАННЯ В ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІЙ СИСТЕМІ МИТНОГО КОНТРОЛЮ

Вступ. Розглянуто можливість застосування в практиці митного контролю режиму безеховості, створюваного за допомогою нестандартизованих засобів вимірювання у вигляді безеховій камери (БЕК). З позицій принципу достовірності підтвердження відповідності проведено калібрування рупорообразной БЕК, як основи додаткового інструментарію в інформаційній системі митного контролю (ІСМК). Поставлено завдання створення банку даних (БД) образів типових об'єктів для впровадження в митну практику методів і засобів радіолокаційного виявлення і розпізнавання. Наведено функціональну схему лабораторної установки з БЕК і представлені результати експериментальних досліджень. Запропоновано, використовуючи результати контрольних вимірювань ефективної площі розсіювання каліброваних об'єктів, забезпечувати контроль рівня достовірності вимірювань через апостеріорне їх підтвердження або опротестування.

Постановка задачі. Проблема виявлення прихованих об'єктів при впровадженні методів і засобів радіолокаційного виявлення і розпізнавання в практику митного контролю ставить завдання створення банку даних (БД) образів типових об'єктів штучного походження. Для забезпечення достовірності інформаційної експертної бази як підсистеми інформаційної системи митного контролю (ІСМК) доцільно задіяти режим безеховості, створюваний спеціальними методами і способами його реалізації [1-5]. При цьому встановлення потенційного рівня ризику пропуску прихованих об'єктів (з точки зору концепції прийняттого ризику в умовах невизначеності, що задається відповідними можливостями помилкової тривоги $P_{л.т.}$ і пропуску об'єкта $P_{пр}$) є необхідною умовою успішного вирішення завдання апріорної оцінки достовірності та надійності виявлення прихованих об'єктів за допомогою ІСМК.

Виконання вимоги достатності інформації може бути підтверджено тільки експериментальними методами, реалізованими в умовах, що дозволяють селективувати активні і пасивні перешкоди в процесі виявлення прихованих об'єктів митного контролю [1].

Проблема забезпечення достовірності з точки зору підтвердження відповідності ІСМК заданим вимогам при прийнятті рішень щодо розпізнавання образів (ідентифікації) та про ступінь безпеки прихованих об'єктів є досить актуальною і фактично зводиться до оцінки значень критерію достовірності контрольно-вимірювальної апаратури (КВА) (в першу чергу це відноситься до радіоапаратури) з урахуванням методології менеджменту ризику [6].

Остаточний вибір рішення по використанню КВА може бути оцінений тільки після її експериментальної апробації. При оцінці надійності та достовірності роботи КВА доцільно використовувати режим безеховості. Отже, тільки при позитивній реалізації цих двох умов (умов необхідності і достатності) можна стверджувати (при апріорі обумовлених значеннях $P_{л.т.}$ і $P_{пр}$) про відповідність достовірності і правомірності КВА, використовуваної при митному контролі.

Мета роботи полягає в розвитку і застосуванні принципу достовірності при підтвердженні відповідності потенційних тактико-технічних характеристик (ТТХ) КВА,

призначеної для отримання інформації безпосередньо як від ІСМК, так і від лоцируємих об'єктів шляхом вимірювання та контролю вторинного випромінювання (перевипромінювання) від різних каліброваних об'єктів з метою подальшого створення банку образів прихованих об'єктів штучного походження.

Результати роботи. Принципом вірогідності стосовно КВА завжди супроводжує невизначеність, рівень якої визначає наявність ризиків неточного вимірювання або не виявлення, наприклад, прихованих об'єктів.

В основі оцінки прийнятного ризику, за аналогією з радіолокаційними методами отримання інформації у вигляді виявлення, вимірювання, дозволу і розпізнавання ці їх об'єктів спостереження, можуть бути використані відповідні значення $R_{л.т.}$ і $R_{пр.}$, доповнені можливостями правильного і неправильного виявлення за критеріями Неймана-Пірсона або ідеального спостерігача [7]. Виходячи з цього можна трактувати достовірність як ступінь довіри на тлі допустимих ризиків до рівня працездатності КВА.

Очевидне взаємовплив КВА і прихованих об'єктів штучного походження дозволяє конкретизувати перелік можливих факторів, що впливають на достовірність отриманої інформації.

Так, з боку прихованих об'єктів штучного походження можуть проявляється і суттєво впливати такі фактори:

- протяжність і рельєфність прихованих об'єктів, що призводять до появи цілого ансамблю блискучих точок;

- неоднорідність як самої поверхні відображення прихованих об'єктів, так і наявності декількох (дозволених або які не задовольняють цим критерієм) інших об'єктів, що призводять в свою чергу до прояву особливостей групового перевипромінювання;

- умови зберігання або приховування прихованих об'єктів і т.д.

З боку КВА, в залежності від особливостей прихованих об'єктів і конкретного виду вимірювань (оптичний, радіохвильовий, рентгенівський, радіаційний і т.д.), можуть проявлятися фактори, перелік яких багатолікий і різноманітний. Зокрема, це:

- різні методики вимірювань, багатьом з яких також властива невизначеність (наприклад, співзвучні принципам невизначеності в квантовій механіки і радіолокації);

- технологічний розкид параметрів і характеристик КВА, що з'являється в процесі тривалої експлуатації і потребують періодичної метрологічної атестації та

- інші не менш значущі чинники, що впливають на достовірність вимірювань за допомогою КВА.

Таким чином, виходячи з ТТХ КВА і не маючи апріорної інформації про приховані об'єкти штучного походження, доцільність створення банку образів прихованих об'єктів при обліку їх взаємовпливу в процесі виявлення, вимірювання і розпізнавання останніх, очевидна. При цьому, для чистоти експерименту при створенні каталогу образів прихованих об'єктів штучного походження (до таких в першу чергу слід віднести контрафактні товари народного споживання) доцільно використовувати режим безеховості, створюваний спеціальними методами і способами, які їх реалізують, наприклад, за допомогою безехових камер (БЕК) [1-5].

В основі створення режиму безеховості лежить принцип поглинання відбитого сигналу від будь-якої перешкоди на шляху поширення акустичної або електромагнітної хвилі. Під перешкодою прийнято розуміти будь-яку неоднорідність параметрів середовища, в якій поширюється хвиля. Для електромагнітних хвиль – це будь-яка зміна діелектричної і/або магнітної комплексних проникнення середовища, яка оцінюється як неоднорідність.

Основними факторами, що визначають якість БЕК, є їх розміри й форма, а також якість застосованого радіо-поглинаючого матеріалу (РПМ).

Головним параметром, що визначає якість БЕК, є коефіцієнт безеховості (КБЕ)

K_6 . Чим менше значення паразитних розсіяних полів, тем менший КБЕ й тим краща якість БЕК.

Робочий об'єм БЕК – це область простору БЕК з апіорі заданим КБЕ, який прийнято також називати безеховою зоною.

Як правило, габаритні розміри безехової зони БЕК визначають експериментально, порівнюючи КБЕ в кожній точці передбачуваної зони вимірювань (досліджень) з апіорі заданим значенням. Для цього використовують співвідношення вигляду:

$$K_B = 20 \lg \frac{\sum E_{\text{від}}(x, y, z)}{E_{\text{пад}}}, \quad (1)$$

де x, y, z – координати знаходження приймальної антени (зонду); $E_{\text{від}}$ – відбиті напруженості електричного поля; $E_{\text{пад}}$ – напруженість електричного поля падаючої хвилі.

Очевидно, що за будь-якої конфігурації БЕК будь-якій падаючій (первинній) хвилі з напруженістю електричного поля \vec{E}_0 будуть відповідати відбиті від стінок камери вторинні хвилі з відповідними напругами електричних полів у вигляді сукупності $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \dots, \vec{E}_n$

При цьому в будь-якій точці гіпотетичної зони безеховості БЕК значення співвідношення $\left| \sum_{i=1}^k \vec{E}_i / \vec{E}_0 \right|$ завжди повинно бути меншим, ніж апіорі заданий K_B . Отже, для випадку, коли приймальна антена (зонд) має ізотропну діаграму спрямованості, величину КБЕ (у децибелах) можна безпосередньо оцінити за допомогою співвідношення:

$$K_B = 20 \lg \frac{E_n(x_m, y_k, z_j)}{E_{\text{пр}}} \quad (2)$$

де $E_{\text{пр}} = \left| \vec{E}_0 \right|$ – напруженість падаючого поля (прямого променя) передавальної антени в точці спостереження; $E_n(x_m, y_k, z_j)$ – сума напруженості відбитих хвиль від усіх стінок камери в приймальній точці; x_m, y_k, z_j – координати знаходження приймальної антени (зонду), де $x_m = m \Delta x$; $y_k = k \Delta y$; $z_j = j \Delta z$.

Співвідношення (2) вказують на можливість покрокового переміщення зонда по ортогональним декартовим координатам.

Таким чином, у точці приймання результуючу напруженість електричного поля, зображену у вигляді суперпозиції відбиттів від усіх стінок прямокутної камери (а їх 6), можна записати у вигляді:

$$E_z(x_m, y_k, z_j) = \frac{R_n}{F_\Gamma(\mathcal{I}_n)} \sum_{i=1}^4 F_\Gamma(\mathcal{I}_{ni}) V_\Gamma(\mathcal{C}_{ni}) \frac{e^{-\sqrt{-1}k(R_{ni}-R_n)}}{R_{ni}} + \frac{R_n}{F_B(\mathcal{I}'_n)} \sum_{i=5}^6 F_B(\mathcal{I}_{ni}) V_B(\mathcal{C}_{ni}) \cos(\mathcal{I}'_{ni}) \frac{e^{-\sqrt{-1}k(R_{ni}-R_n)}}{R_{ni}}, \quad (3)$$

де n_i – сукупність трьох індексів m, k, j ; i – номер відбивної стінки (наприклад, у прямокутній камері $i=1, 2, \dots, 6$); $V_{\Gamma, B}(\mathcal{C}_{ni})$ – френелевські коефіцієнти відбиттів від стін БЕК за горизонтальної (індекс «Г») і вертикальної (індекс «В») поляризацій.

У формулі (3) параметр $R_{m,k,j}$ – це відстань між передавальною точкою, точкою на i -й перевипромінювальній стінці та точкою спостереження, обумовленою зі співвідношенням:

$$R_n = \sqrt{(x_0 - x_{ni})^2 + (y_0 - y_{ni})^2 + (z_0 - z_{ni})^2}; \quad (4)$$

Параметр R_{ni} у формулі (3) – це відстань між приймальною антеною, відбивною точкою на i -й стінці й точкою спостереження, яке задано співвідношенням вигляду:

$$R_{ni} = \sqrt{(x - x_{ni})^2 + (y - y_{ni})^2 + (z - z_{ni})^2} + \sqrt{(x_0 - x_{ni})^2 + (y_0 - y_{ni})^2 + (z_0 - z_{ni})^2}; \quad (5)$$

У наведених формулах (4) і (5) через (x_0, y_0, z_0) відображено місце розташування передавальної (опроміненої БЕК) антени; а через (x_m, y_k, z_j) – координату приймального зонду, який можна переміщувати по-кроково в БЕК, змінюючи координати відповідно до виразів $x_m = m\Delta x$; $y_k = k\Delta y$; $z_j = j\Delta z$; а (x_{mi}, y_{ki}, z_{ji}) – координати точки дзеркального відбиття на i -й стінці камери.

У формулі (3) через $F_{r,v}(I_{ni})$ уведено діаграми спрямованості передавальної антени для випадків горизонтальної й вертикальної поляризації, де I_{ni} – кут між падаючим променем і віссю передавальної антени, а I'_{ni} – кут між прямим і відбитим променями. При цьому кут падіння променя на i -ту стіну відображений записом $I_{ni} = \frac{p}{2} - I'_{ni}$, а кут між прямим променем і віссю передавальної антени позначений у вигляді I''_{ni} , де

$$I''_{ni} = \arcsin(z_j - z_0)/R_n; \\ I'_{ni} = \arctg z_0/(x_{ni} - x_0). \quad (6)$$

Отже, співвідношення (3), яке складається із двох сум, відображає повне перевідбите поле, з яких перша складова ставиться до тих стінок ($i = 1,2,3,4$), стосовно яких поляризація падаючих на них хвиль горизонтальна, а друга – до тих стінок ($i=5,6$), стосовно яких вона вертикальна.

У точці, де вимірюється поле, доцільно використовувати зонд із ізотропною діаграмою спрямованості. Тоді, пересуваючи по-кроково цей зонд по осях (x, y, z) камери, можна виміряти повний сигнал у різних точках камери.

Очевидно, що похибка проведених випробувань у БЕК буде залежати від діаграми спрямованості конкретної випромінюваної антени й запропонованої методики оцінки якості БЕК і її робочої зони. При цьому будь-яка методика експериментального визначення якості БЕК може претендувати лише як на її алгоритм (на метрологічній мові це означає «програма») оцінки якості, а не на атестацію. У протилежному випадку необхідно задовольнити основні положення метрологічного забезпечення розробки, виготовлення й експлуатації нестандартизованих засобів вимірювань, до яких слід віднести БЕК.

Відповідно до програми атестації необхідно визначити діапазон робочих частот БЕК, її КБЕ, «уявну» ефективну площу розсіювання (ЕПР або ЕВП – ефективна відбивна поверхня) БЕК, розміри безехової зони й ефективність екранування, застосовуючи, наприклад, методи визначення рівня відбитих сигналів у БЕК у процесі випробування конкретної спрямованої антени, а саме [1,7]:

- метод порівняння діаграм;
- метод визначення коефіцієнта стоячої хвилі у вільному просторі;
- метод когерентної Фур'є-оптики або
- радіоголографічний метод.

Враховуючи, що задня стінка БЕК є основне джерело паразитних відбиттів, то у нашому випадку вона виготовлена у вигляді рупора, покритого РПМ типу В2-Ф3 із коефіцієнтом відбиття за потужністю $K_M = 0,05$ (-13 дБ).

Розміри застосовуваної БЕК вибиралися з умови, що вимірювання моделей прихованих об'єктів повинні проводитися на відстані від приймально-передавальних антен порядку $R = 60-70$ см. Така відстань задовольняє критерію дальньої зони для застосовуваних антен рупорного типу з розкритом 8×8 см² або 15×16 см² і з робочим обсягом близько 4100 см³ за середньої довжини хвилі 4 см.

Згідно з цими умовами БЕК у вигляді зрізаної чотирикутної піраміди мала такі розміри: висота камери – 220 см, нижній перетин камери 40×40 см², висота рупора задньої стінки БЕК – $h = 30$ см.

Для кріплення й переміщення моделей радіолокаційних цілей було змонтовано спеціально розроблений координатник. Для заміни моделей передбачено відкидну стінку. На задній стінці БЕК безпосередньо кріпилися хвилеводні елементи приймально-передавального тракту установки.

За $L = 4,3$ см КБЕ камери склав 47 дБ, а за $L = 3$ см відповідно 50 дБ. В інших точках робочого діапазону КБЕ був не гірший 35 дБ. Відбитий сигнал від вимірюваних моделей перевершував фоновий сигнал, до складу якого входив і сигнал, відбитий від опори кріплення моделі, на 50 дБ. При цьому емпірично обмірювана розв'язка між приймальною (4) й передавальною (5) антенами, відстань між крайками апертур яких 0,5 см, склала відповідно 6 дБ і 48 дБ на довжинах хвиль 4,3 см і 3 см (рис.2).

Для процесу створення банку образів типових моделей прихованих об'єктів і достовірності ТТК КВА запропонована лабораторна установка з БЕК, функціональна схема якої наведена на рис.1.

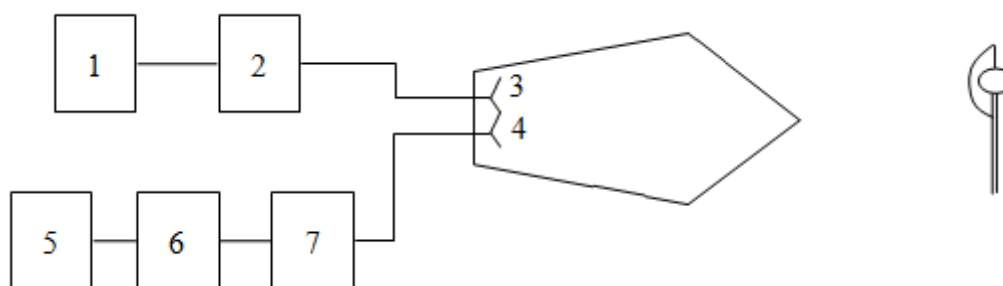


Рисунок 1 – Функціональна схема лабораторної установки з БЕК

Робота експериментальної установки здійснювалася в такий спосіб.

Надвисокочастотна енергія від генератора 1 через феритовий вентиль 2 потрапляє на передавальну антену 3, умонтовану всередині БЕК, і, випромінюючись, падає на модель радіолокаційної цілі, закріпленої на опорі. Далі, відбитий сигнал від моделі надходить на приймальну антену 4, а потім, через узгоджувальний трансформатор 7 – на

детекторну секцію 6. Продетектований сигнал підсилюється підсилювачем 5 і фіксується або стрілочним приладом підсилювача, або самописним потенціометром і осцилографічним індикатором. За переходу від одного частотного діапазону вимірювань до іншого проводилася відповідна зміна рупорних антен.

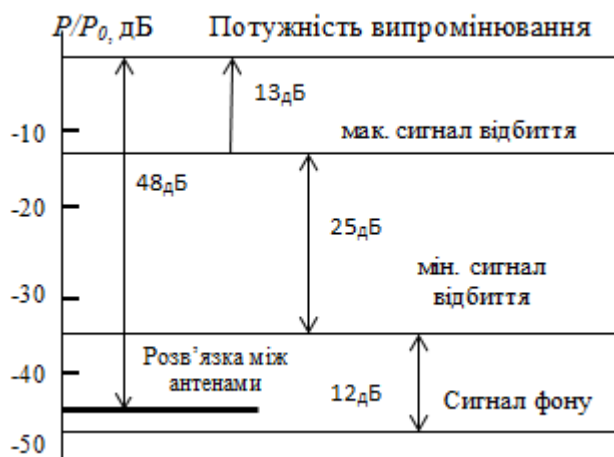


Рисунок 2 – Графік потужності випромінювання

Метод вимірювання ефективної поверхні зразкового розсіювання (ЕПЗР) моделей на даній установці заснований на вимірюванні потужностей у дальній зоні відповідно до рівняння радіолокації, записаного у вигляді, що задовольняла критерію дальньої зони, тобто:

$$R \geq pA^2 / L, \quad (7)$$

де $p > 1$; A – довжина найбільшої сторони апертури випромінювальної антени; L – довжина хвилі.

Зокрема, у випадку вимірювання ЕПЗР опуклих тіл дана відстань може бути значно меншою, ніж та, яка визначається за формулою (7) [1,7]. Це обумовлено тим, що поле трансформується до плоского фронту хвилі в міру його локалізації до осі симетрії антени. Більше того, за визначення ЕПЗР реальних об'єктів на надвисоких частотах (НВЧ) в лабораторних умовах доцільно використовувати моделювання. У цьому випадку повинні виконуватися так звані умови електродинамічного моделювання [1,7], які можуть бути записані у вигляді таких співвідношень:

$$e = e_m; \quad m = m_m; \quad f / f_m = L / L_m = \ell / \ell_m = M; \quad S = S_m M^2, \quad (8)$$

де e і m – відповідно діелектрична й магнітна проникності об'єкта дослідження; e_m і m_m – відповідно діелектрична й магнітна проникності моделі тіла; f і L – відповідно частота й довжина хвилі радіолокаційної станції; f_m і L_m – відповідно частота й довжина хвилі моделі РЛС; ℓ і ℓ_m – відповідно розміри тіла і його моделі; M – масштаб моделі; S і S_m – відповідно ЕПЗР досліджуваного об'єкта і його моделі.

Очевидно, що, вибираючи схему лабораторних установок у процесі вимірювання ЕПЗР моделей цілей, необхідно забезпечувати належну розв'язку між НВЧ-генератором і приймачем установки. Причому схема приймально-передавального тракту з однією антеною дозволяє лише з прийнятною точністю робити вимірювання щодо більших значень ЕПЗР.

У разі вимірювання малих значень ЕПЗР навіть у вузькому діапазоні частот супутні похибки найчастіше виходять за рамки прийнятних, оскільки сучасні розв'язувальні обладнання (спрямовані відгалужувачі, подвійні трійникові мости, циркулятори) не забезпечують належного розв'язання між передавальними й приймальними трактами. З огляду на це усі наведені нижче результати експериментального дослідження ЕПЗР об'єктів/цілей були одержані на лабораторній установці з двома антенами: передавальною і приймальною, розташованими поруч, що автоматично забезпечувало розв'язку між відповідними каналами не менше 30 дБ.

При цьому, зважаючи на квадратичність вольтамперної характеристики детектора, фіксувалися величини, безпосередньо пропорційні відбитим потужностям. Як оцінки експериментальної установки були проведені вимірювання напруженості електромагнітного поля на осі БЕК, відбитого від пасивного відбивача у вигляді металевого диска радіусом $R_l = 3,3$ см, який переміщувався по осі БЕК (рис.3).

Залежність потужності відбитого сигналу $P^{(-)}$, нормованої до потужності випромінюваного сигналу $P^{(+)}$, від відстані R показана на рис.3, де крива 1 відповідає експериментальним вимірюванням у БЕК; крива 2 – розрахована за формулою, записаному у вигляді рівнянні радіолокації [1,7],

$$P^{(+)} / P^{(-)} = \frac{G^2 L^2 S}{(4\pi)^2 R^4}, \quad (9)$$

де $P^{(+)}$ – випромінювана потужність; $P^{(-)}$ – прийнята (відбита) потужність; G – коефіцієнт підсилення антени; S – величина ЕПЗР об'єкта дифракції; R – відстань від об'єкта до апертури приймальної антени.

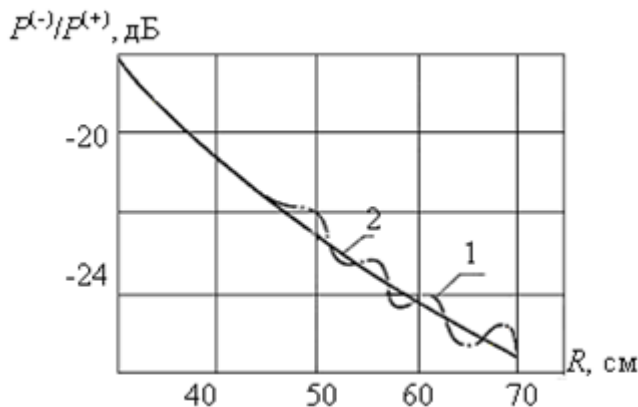


Рисунок 3 – Напруженості електромагнітного поля на осі БЕК

Порівняння кривих показує, що відхилення експериментальної кривої 1 від кривої 2 не перевищує 2 дБ. При цьому до основних похибок у вимірюваннях діаграм зразкового розсіювання (ДЗР) моделей на даній експериментальній установці варто віднести такі:

- похибка, спричинена наявністю фону від стінок БЕК, яка не перевищувала 2,5 дБ;
- похибка, пов'язана з просочуванням паразитного сигналу НВЧ потужності з передавальної антени в приймальну;
- похибка, обумовлена варіацією фази від осі випромінювання до периферії, що не перевищувала $\pi/4$, а також зміною амплітуди на периферії розсіювача, яка не перевищувала 2 дБ.

Інтегральну оцінку похибки даної установки нескладно здійснити, порівнюючи розрахункові значення ЕПР моделей конкретного виду об'єктів з їх експериментально одержаними. У нашому випадку таку оцінку було здійснено для моделей, що являють собою металевий циліндр радіусом $R_l = 1,5$ см і довжиною $L = 5$ см, металеву сферу радіуса 3 см, а також металевий диск радіусом 3,3 см на частоті 10 ГГц.

Так, розрахунковим значенням ЕПЗР металевого диска радіусом 3,3 см за нормального падіння на нього електромагнітної хвилі становить 1630 см^2 . Водночас для цього ж диска, розташованого на відстані $R=70$ см від апертури антен по осі випромінювання, вимірюване значення $P^{(-)}/P^{(+)}$ було визначено у вигляді значення $7 \cdot 10^{-4}$. Звідси, використовуючи рівняння радіолокації у вигляді (9), одержимо емпіричну величину ЕПЗР металевого диска з радіусом 3,3 см за нормального падіння електромагнітної хвилі, що дорівнює 1400 см^2 .

Отже, зіставляючи значення диска, одержані розрахунковим і емпіричним шляхом, бачимо, що вони різняться на 14%. Крім того, використовуючи металевий диск як еталонний розсіювач, можна здійснювати оцінку поведінки ЕПЗР моделей більш складної геометрії [1]. В цілому у подальшому процесі вимірювання ЕПЗР моделей каліброваних цілей (у вигляді сфери та циліндра) ця експериментальна установка, БЕК якої обладує також високим рівнем екранування, показала якісні результати.

Висновки. Проведено всебічне математичне моделювання в інформаційно-вимірювальній системі митного контролю, яке дозволило провести більш достовірний необхідний режим атестації задіяної КВА не тільки з точки зору їх інформаційної захищеності через виявлення власних супутніх паразитних електромагнітних випромінювань і наведень, а й по контрольним вимірам ЕПЗР каліброваних об'єктів. Це надало можливість забезпечити контроль за рівнем достовірності вимірювань за допомогою цієї КВА через апостеріорне їх підтвердження або спростування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Тарасенко Ю.С. Фізичні основи радіолокації. Дніпро: Пороги, 2011. 487 с.
2. Маслов М.Ю., Самоков Л.М., Скачков Д.В. Испытательная безэховая камера диапазона 30..1200 МГц. Технологии информационного общества. Спецвыпуск Т-Comm, август 2009. С. 123-128.
3. Наконечный В.С., Присяжный А.Е., Побережный А.А. Электродинамическое моделирование с использованием безэховых камер СВЧ. Методика оценки коэффициента безэховости. Харківський університет повітряних сил. Системи обробки інформації. 2005, Вип. 9 (49). С. 116-123.
4. Балабуха Н.П., Меньших Н.Л., Солосин В.С. Электромагнитное моделирование низкочастотной рупорной безэховой камеры. Пятнадцатая ежегодная научная конференция ИТПЭ РАН при поддержке IEEE-APS-LEOS-CHARTER Сборник тезисов докладов. Под ред. д.ф.-м.н. В.Н. Киселя.– М.: ИТПЭ РАН. 2014. С. 51-53.
5. Никитенко А.В., Зубов А.С., Булычев Е.В. Моделирование отражения электромагнитных волн от радиопоглощающего материала пирамедальной формы. Пятнадцатая ежегодная научная конференция ИТПЭ РАН при поддержке IEEE-APS-LEOS-CHARTER Сборник тезисов докладов. Под ред. д.ф.-м.н. В.Н. Киселя. М.: ИТПЭ РАН. 2014. 43 с.
6. Строганова Е.П. Развитие принципа достоверности подтверждения соответствия. // Технологии информационного общества. Спецвыпуск Т-Comm, август 2009. С.138-140.
7. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория. Справочник /под ред. Я.Д. Ширмана. М.: Радиотехника, 2007. 512 с.

Надійшла до редколегії 16.12.2020.