



С. А. Горелишев



П. Ю. Волков



О. А. Олещенко

ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДІОЛОКАЦІЙНОГО РОЗСІЮВАННЯ ОСОБИ-ПОРУШНИКА У СИСТЕМІ ПРИХОВАНОВОГО РАДІОЛОКАЦІЙНОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ

Розглянуто питання розрахунку бістатичної ефективної поверхні розсіювання діелектричного об'єкта (особи-порушника), який знаходиться у зоні охорони важливого державного об'єкта. Система охорони побудована за допомогою використання технічних засобів, які спроектовані за принципами напівактивної бістатичної радіолокації. Запропоновано методика оцінювання можливості радіолокаційного спостереження діелектричних об'єктів у полі підсвічування телевізійної і стільникової мереж. Отримано бістатичні залежності ефективної поверхні розсіювання порушника та середні значення ефективної поверхні розсіювання у секторах бістатичних кутів при різних азимутах та різних частотах зондування. У процесі аналізу залежності ефективної поверхні розсіювання оцінено усереднені значення рівня розсіяного сигналу. Проведено верифікацію результатів цієї методики на прикладі об'єктів простої форми. Отримані залежності радіолокаційної помітності особи-порушника дасть змогу обґрунтувати технічні вимоги до побудови системи прихованого спостереження за зоною охорони важливих державних об'єктів.

Ключові слова: напівактивна бістатична радіолокація, ефективна поверхня розсіювання, діелектричний об'єкт, порушник, джерело підсвічування.

Постановка проблеми. В останні часи у країні набули поширення прояви екстремізму, що провокують нестабільність у суспільстві, породжують сепаратистські настрої та формують сприятливі умови для реалізації протиправних дій. Особливу небезпеку становлять злочинні несанкціоновані дії фізичних осіб (порушників) або незаконних збройних формувань (НЗФ) щодо нападу на важливі державні об'єкти (ВДО) [1, 2]. Результати їх дій можуть бути катастрофічними, аж до створення надзвичайної ситуації на цих об'єктах [3].

У повсякденній діяльності на військовій частині Національної гвардії України (НГУ) покладені завдання щодо забезпечення охорони ВДО [4], ефективність виконання яких залежить від технічної оснащеності системи охорони та підготовленості особового складу. Сучасними тенденціями побудови систем фізичного захисту (СФЗ) ВДО є комплексування інженерних загороджень, периметрових засобів сигналізації та засобів прихованого виявлення, які повинні

забезпечити отримання інформації про наближення порушника до ВДО на «далеких» підступах.

Як наведені вище засоби можна використовувати технічні засоби, які побудовані за принципом напівактивної бістатичної радіолокації з використанням джерела зовнішнього підсвічування. Для виконання завдання виявлення порушників необхідно мати апріорну інформацію щодо радіолокаційної помітності об'єктів локації за різних умов. Особа-порушник розглядається як діелектричний об'єкт з електрофізичними властивостями біологічних тканин, що значно ускладнює виконання цього завдання.

Таким чином, виникає актуальне завдання отримання залежностей характеристик вторинного розсіювання (ХВР) [зокрема, ефективної поверхні розсіювання (ЕПР)] особи-порушника, які впливають на вимоги до побудови системи прихованого спостереження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Стрімкий розвиток обчислювальної техніки сприяє появі нових ефективних методів

математичного моделювання, які потребують високої швидкодії та великих обсягів як оперативної, так і дискової пам'яті [5–10]. Математичне моделювання порівняно з іншими методами отримання характеристик вторинного розсіювання радіолокаційних об'єктів (РЛО) має низку суттєвих переваг – незначні фінансові і матеріальні витрати, різноманітність сценаріїв та ін. Однак використання методів математичного розрахунку потребує виконання більш жорстких вимог щодо точності відтворення характеристик розсіювання.

Асимптотичний високочастотний метод математичного моделювання ХВР аеродинамічних повітряних та наземних об'єктів великих електричних розмірів детально описаний у працях [5, 6, 8, 11, 12, 13]. Однак розміри особи-порушника, яка розглядається як об'єкт локації, у діапазоні довжин хвиль телепередавачів Т2 порівняні із довжиною хвилі і ці методи розрахунку не дають змоги проводити обчислення з високою точністю.

У публікаціях [9, 14, 15, 16] запропоновано метод розрахунку ХВР резонансних об'єктів, поверхня яких може вважатися ідеально провідною, у вільному просторі. Цей метод ґрунтується на розв'язанні інтегрального рівняння (ІР) магнітного поля. Однак у цих працях не розглядаються діелектричні об'єкти резонансних розмірів.

Метод розрахунку ХВР діелектричного об'єкта резонансних розмірів, розташованого в однорідному просторі, який базується на розв'язанні системи ІР типу Мюлера (СІРМ), наведено у публікаціях [17, 18, 19] та отримано деякі залежності ХВР цих РЛО. Проте у працях не розглядається ситуація бістатичного зондування, яка характерна для завдання прихованого виявлення у зоні охорони ВДО. Крім того, діелектричний об'єкт з електрофізичними властивостями біологічних тканин взагалі не розглядається як об'єкт бістатичної локації.

Таким чином, аналіз джерел, наведених вище, виявили необхідність отримання бістатичних ХВР особи-порушника та виявлення залежностей від конфігурації системи прихованого спостереження при зовнішньому підсвічуванні.

Мета статті – отримання залежностей бістатичної ефективної поверхні розсіювання порушників від конфігурації системи прихованого спостереження при підсвічуванні сигналами телевізійної і стільникової мереж та їх аналіз.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

1) запропонувати методику оцінювання характеристик вторинного радіолокаційного розсіювання об'єктів з діелектричною поверхнею у полі підсвічування телевізійної і стільникової мереж;

2) провести аналіз залежностей бістатичної ефективної поверхні розсіювання моделі порушника у межах дециметрового діапазону частот;

3) провести верифікацію результатів розрахунку.

Виклад основного матеріалу. Методика оцінювання характеристик вторинного радіолокаційного розсіювання об'єктів з діелектричною поверхнею. Характеристики вторинного розсіювання об'єктів локації залежать від діапазону частот, електричних розмірів, матеріалу і складності форми об'єкта [5–19]. Проведений аналіз джерел показав, що під час моделювання ХВР діелектричних об'єктів резонансних розмірів низку переваг мають методи, засновані на розв'язанні СІРМ.

Щільності еквівалентних електричного \vec{J}^e і магнітного \vec{J}^m струмів на поверхні S діелектричного об'єкта V_2 , розташованого в однорідному просторі V_1 , можна знайти за допомогою СІРМ [17, 20]:

$$\begin{cases} (\vec{\tau}_q^0 \times \vec{v}^0) \cdot \vec{J}^m(\vec{Q}_0) \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \\ + 2(i\omega)^{-1} \int_S [\Delta \vec{H}_{21}^e(\vec{\tau}_q^0) \cdot \vec{J}^m(\vec{Q}) \varepsilon_2 + \varepsilon_0^{-1} \Delta \vec{D}_{21}^e(\vec{\tau}_q^0) \cdot \vec{J}^e(\vec{Q})] ds_Q = -2\varepsilon_1 \vec{\tau}_q^0 \cdot \vec{E}_1^0(\vec{Q}_0), \\ -(\vec{\tau}_q^0 \times \vec{v}^0) \cdot \vec{J}^e(\vec{Q}_0) + \\ + (i\omega)^{-1} \int_S [\Delta \vec{H}_{21}^m(\vec{\tau}_q^0) \cdot \vec{J}^m(\vec{Q}) + \Delta \vec{E}_{21}^m(\vec{\tau}_q^0) \cdot \vec{J}^e(\vec{Q})] ds_Q = \vec{\tau}_q^0 \cdot \vec{H}_1^0(\vec{Q}_0), \end{cases} \quad (1)$$

де у випадку діелектричного розсіювача \vec{v}^0 є зовнішньою до S нормаллю;

$$\Delta \vec{H}_{21}^e(\vec{Q}|\vec{Q}_0, \vec{\tau}_q^0) \equiv \Delta \vec{H}_{21}^e(\vec{\tau}_q^0) = \vec{H}_2^e(\vec{Q}|\vec{Q}_0, \vec{\tau}_q^0) - \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \vec{H}_1^e(\vec{Q}|\vec{Q}_0, \vec{\tau}_q^0), \quad (2)$$

$$\Delta \vec{D}_{21}^e(\vec{Q}|\vec{Q}_0, \vec{\tau}_q^0) \equiv \Delta \vec{D}_{21}^e(\vec{\tau}_q^0) = \vec{D}_2^e(\vec{Q}|\vec{Q}_0, \vec{\tau}_q^0) - \vec{D}_1^e(\vec{Q}|\vec{Q}_0, \vec{\tau}_q^0), \quad (3)$$

$$\Delta \vec{H}_{21}^m(\vec{Q}|\vec{Q}_0, \vec{\tau}_q^0) \equiv \Delta \vec{H}_{21}^m(\vec{\tau}_q^0) = \vec{H}_2^m(\vec{Q}|\vec{Q}_0, \vec{\tau}_q^0) - \vec{H}_1^m(\vec{Q}|\vec{Q}_0, \vec{\tau}_q^0), \quad (4)$$

$$\Delta \vec{E}_{21}^m(\vec{Q}|\vec{Q}_0, \vec{\tau}_q^0) \equiv \Delta \vec{E}_{21}^m(\vec{\tau}_q^0) = \vec{E}_2^m(\vec{Q}|\vec{Q}_0, \vec{\tau}_q^0) - \vec{E}_1^m(\vec{Q}|\vec{Q}_0, \vec{\tau}_q^0), \quad (5)$$

де $(\vec{E}_{1(2)}^{e(m)}, \vec{H}_{1(2)}^{e(m)})$ – складові електромагнітного поля (ЕМП) електричного та магнітного точкових диполів за умови, що області V_1 і V_2

заповнені однорідним матеріалом із діелектричною проникністю $\varepsilon_{1(2)}$;

$\vec{D}_\alpha^e = \varepsilon_0 \varepsilon_\alpha \vec{E}_\alpha^e$ – вектор електричної індукції поля електричного диполя.

Після того, як поверхневі щільності еквівалентних електричного \vec{j}^e і магнітного \vec{j}^m струмів знайдені, електромагнітне поле (\vec{E}, \vec{H}) , розсіяне шуканим діелектричним об'єктом V_2 в однорідному просторі V_1 можна визначити за допомогою інтегральних подань [17, 20]:

$$i\omega \vec{p}^{mp} \cdot (\vec{E}(\vec{Q}_{mp}) - \vec{E}_i(\vec{Q}_{mp})) = \int_S [\Delta \vec{H}_{21}^e(\vec{p}^{mp}) \cdot \vec{j}^m(\vec{Q}) + \Delta \vec{E}_{21}^e(\vec{p}^{mp}) \cdot \vec{j}^e(\vec{Q})] ds_Q, \quad (6)$$

$$-i\omega \vec{p}^{mp} \cdot (\vec{H}(\vec{Q}_{mp}) - \vec{H}_i(\vec{Q}_{mp})) = \int_S [\Delta \vec{H}_{21}^m(\vec{p}^{mp}) \cdot \vec{j}^m(\vec{Q}) + \Delta \vec{E}_{21}^m(\vec{p}^{mp}) \cdot \vec{j}^e(\vec{Q})] ds_Q, \quad (7)$$

де $\vec{Q}_{mp} \in V_1$ ($\vec{Q}_{mp} \notin V_2 \cup S$) – точка, в якій обчислюється розсіяне поле.

Система рівнянь (1) дискретизується і зводиться до відповідних систем лінійних рівнянь.

На основі математичних співвідношень (1), (6), (7) розроблено методику оцінювання можливості радіолокаційного спостереження діелектричних об'єктів у полі підсвічування телевізійної і стільникової мереж. На рисунку 1 подано блок-схему алгоритму розрахунку ХВР об'єктів під час бістатичного прийому.

Поверхня діелектричного розсіювача (особи-порушника) апроксимується ділянками еліпсоїдів з відповідними електрофізичними характеристиками біологічного об'єкта.

Постановка завдання моделювання наведена на рис. 2. На площині $z = 0$ у вільному півпросторі V_1 знаходиться особа-порушник (область V_2) з поверхнею S . Области V_1 , V_2 є однорідними з відповідними відносними діелектричними проникностями $\varepsilon_1 = 1$, $\varepsilon_2 = \varepsilon_2' + i\varepsilon_2''$. Комплексна проникність ε_2 є функцією частоти. У всіх областях відносна магнітна проникність $\mu = 1$.

Особа-порушник (V_2) опромінюється антеною передавача Т2 (точка A_1). Передавач породжує ЕМП (\vec{E}^0, \vec{H}^0) . Прийом відбитого сигналу від особи-порушника здійснюється антеною пасивного радіолокатора (точка A_2). Вхідними даними для моделювання є кути опромінення об'єкта в азимутальній β_{opr} і

кутомісній ε_{opr} площинах та кути спостереження відбитого сигналу β_{pr} , ε_{pr} . В азимутальній площині кути відкладаються від напрямку «приймач – особа-порушник». У кутomisній площині кути ε_{opr} , ε_{pr} відкладаються від осі Z та залежать від висот антени передавача (A_1) і приймача (A_2) та розташування особи-порушника. Бістатичний кут \mathcal{Y} залежить від напрямку на передавача та приймача в азимутальній площині.

Як частоти зовнішнього підсвічування використовувалися частоти цифрових пакетів Т2 та частота мобільного зв'язку GSM.



Рисунок 1 – Блок-схема алгоритму розрахунку ХВР діелектричних об'єктів

Результати розрахунку бістатичної ефективної поверхні розсіювання моделі порушника та їх аналіз. Як приклад розглянуто приховане спостереження зони охорони ВДО у м. Золочів Харківської області (висота приймальної антени – 3 м). Ретранслятор телевізійної мережі Т2 знаходиться у м. Нехотєєвка Белгородської області (висота антени – 72 м). Відстань між передавачем A_1 і приймачем A_2 складає 25 км. Особа-порушник знаходиться на дальності 5 км від приймача A_2 . Поверхня моделі порушника апроксимована ділянками 22 діелектричних еліпсоїдів (див. рис. 3, б).

Моделювання проводилося за допомогою розробленого пакета програм на основі сучасної мови програмування Visual Studio Fortran. У результаті моделювання отримано залежності ЕПР особи-порушника за різних умов опромінення і прийому та за різних частот зовнішнього підсвічування.

У таблиці 1 наведено основні геометричні характеристики зазначеного об'єкта.

Таблиця 1 – Характеристики особи-порушника

Характеристика	Значення, м
Зріст	1,8
Ширина	0,65
Товщина	0,21

Розрахунки ефективної поверхні розсіювання проводилися без урахування впливу підстилаючої поверхні. Вплив підстилаючої поверхні призводить до незначних флуктуацій ЕПР відносно випадку вільного простору [21].

Азимут $\beta_{\text{опр}}$ змінювався від 180° до 210° , тобто передавач розташовувався у задній півсфері порушника. Приймач переміщався таким чином, що азимут $\beta_{\text{пр}}$ змінювався через 1° та охоплював усю передню півсферу об'єкта. Кут місця становив $\varepsilon_{\text{опр}} = 89,977^\circ$ та $\varepsilon_{\text{пр}} = 89,794^\circ$.

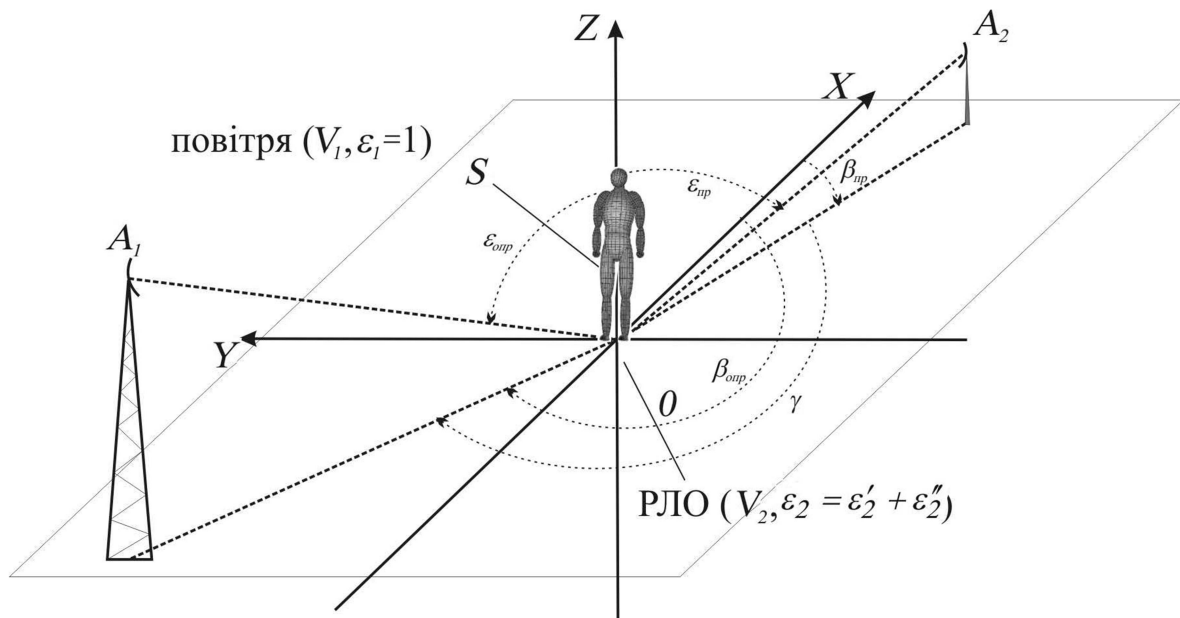


Рисунок 2 – Умови моделювання ХВР особи-порушника

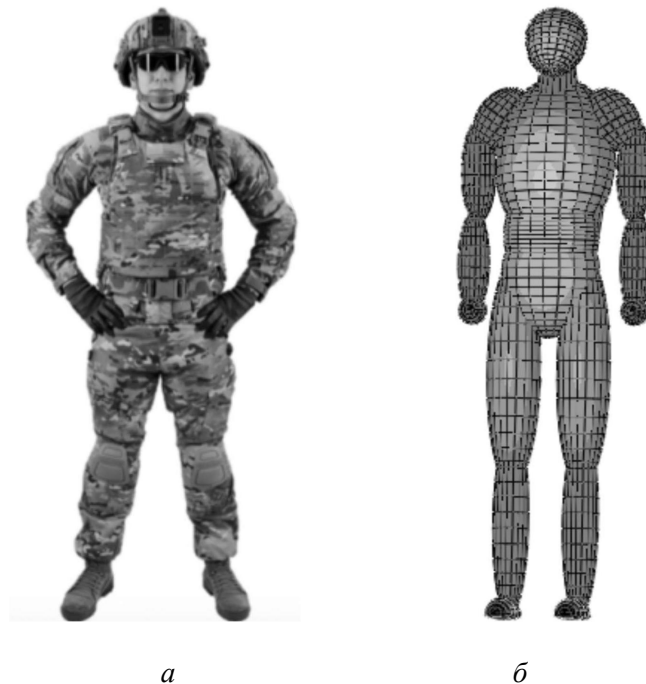


Рисунок 3 – Модель порушника: *а* – зовнішній вигляд; *б* – модель поверхні особи-порушника

На рисунку 4 наведено залежності бістатичної ЕПР особи-порушника від кута розносу \mathcal{U} при азимуті зондування $\beta_{\text{опр}} = 180^\circ$ (див. рис. 4, *а*) та 210° (рис. 4, *б*). Обчислення проводилися на частоті цифрового пакета МХ1 $f_0 = 586$ МГц ($\lambda_0 \approx 0,512$ м). Дані отримано для двох ортогональних поляризацій [горизонтальна поляризація (ГП) – сіра лінія та вертикальна поляризація (ВП) – чорна лінія].

По осі абсцис відкладені значення бістатичного кута \mathcal{U} , по осі ординат – значення ЕПР. У таблицях 2, 3 наведено середні значення ЕПР моделі особи-порушника у секторах бістатичних кутів при відповідних азимутах опромінювання.

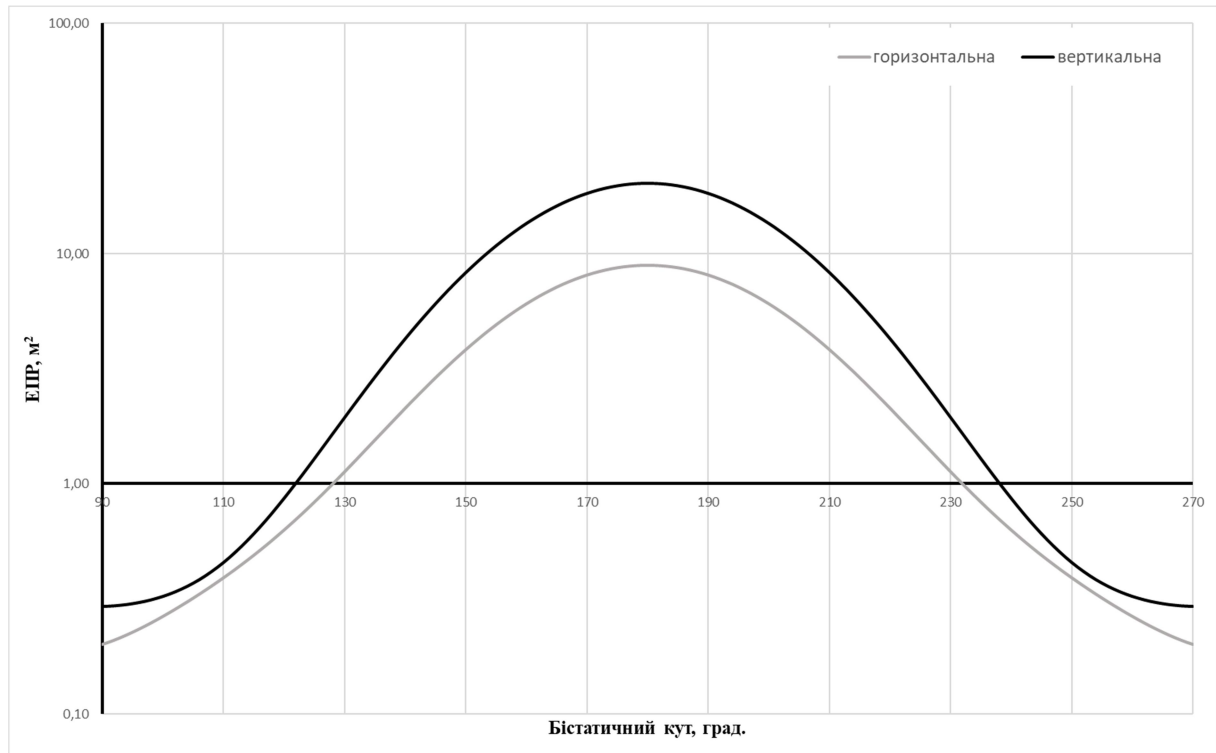
Як свідчать результати розрахунку (рис. 4, табл. 2, 3) бістатичні ЕПР особи-порушника на заданій частоті і розглянутих азимутах підсвічування залежать від поляризації ЕМП. Енергетичний вигравш зондування РЛО отримуємо під час використання хвиль вертикальної поляризації, незважаючи на напрямок прийому та зондування у зв'язку з тим, що електричні розміри особи-порушника у вертикальній площині значно більші, ніж у горизонтальній.

Крім того, на розглянутих довжинах хвилі РЛО має електричні розміри, порівнювані з її довжиною хвилі, і тому залежності ЕПР мають

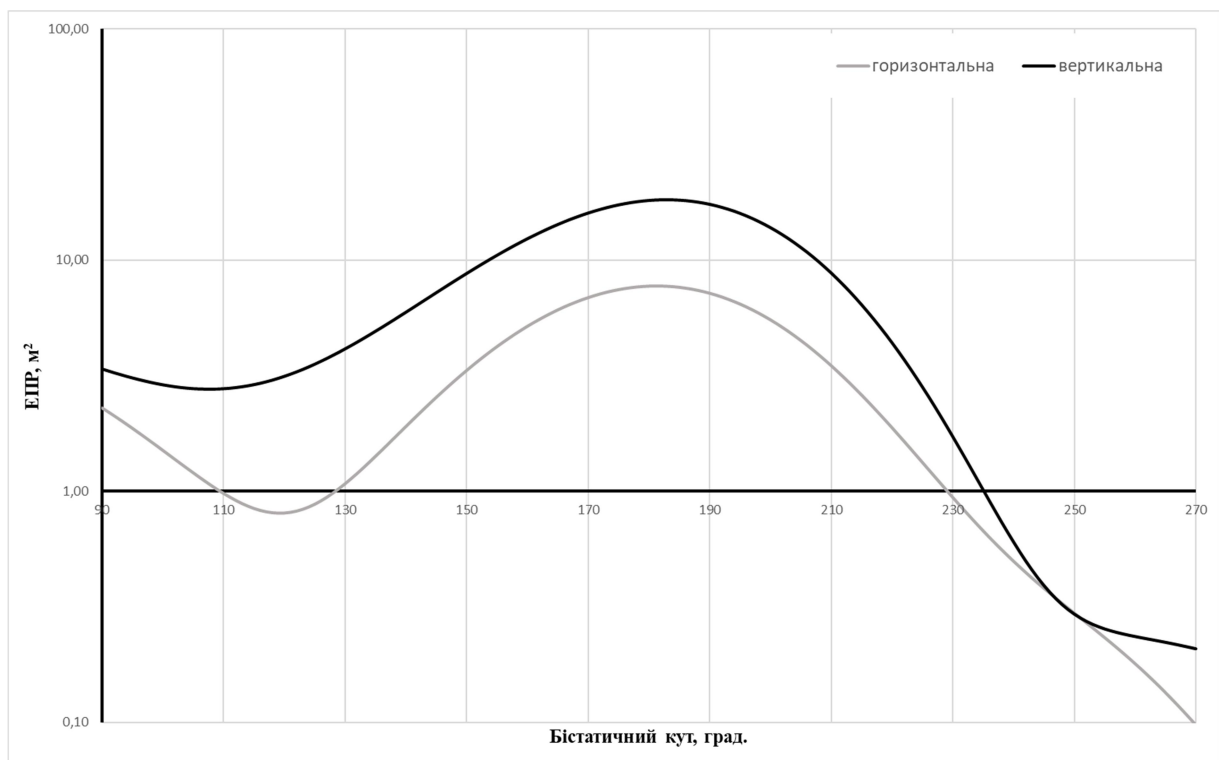
доволі плавний характер. Ефект так званої «просвітної» локації проявляється за діапазону бістатичних кутів від 170° до 190° , де ЕПР збільшується у 3-4 рази та може у вузьких азимутальних секторах досягати значень до 18 м^2 . Причому збільшення значень бістатичної ЕПР спостерігається при всіх кутах підсвічування передавачем Т2.

При підсвічуванні $\beta_{\text{опр}} = 180^\circ$ спостерігається осьова симетрія отриманих залежностей ЕПР (рис. 4, *а*) щодо бістатичного кута $\mathcal{U} = 180^\circ$. У разі зміни напрямку підсвічування $\beta_{\text{опр}}$ симетричність залежностей зникає і необхідно розглядати певні сектори азимутів. При $\beta_{\text{опр}} = 210^\circ$ (рис. 4, *б*) спостерігається збільшення значення ЕПР при бістатичних кутах 90° – 134° у 2-3 рази із середнім значенням ЕПР $1,32$ (ГП) і $3,24 \text{ м}^2$ (ВП).

На рисунку 5, *а* подано бістатичну залежність ЕПР особи-порушника на частоті іншого цифрового пакета телебачення Т2 $f_0 = 474$ МГц ($\lambda_0 \approx 0,632$ м), а на рис. 5, *б* – на частоті стільникового зв'язку 2G стандарту GSM900 – $f_0 = 900$ МГц ($\lambda_0 \approx 0,333$ м). Обчислення проводилися при азимуті опромінювання $\beta_{\text{опр}} = 180^\circ$.

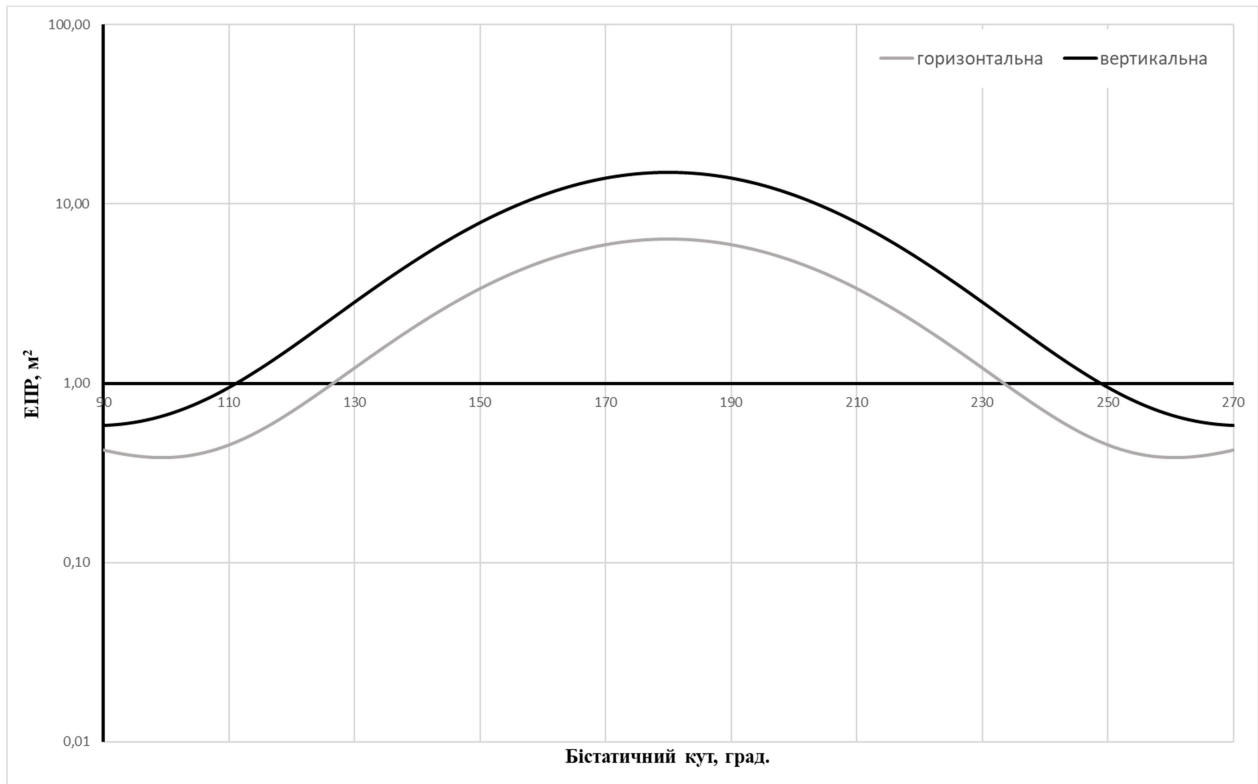


а

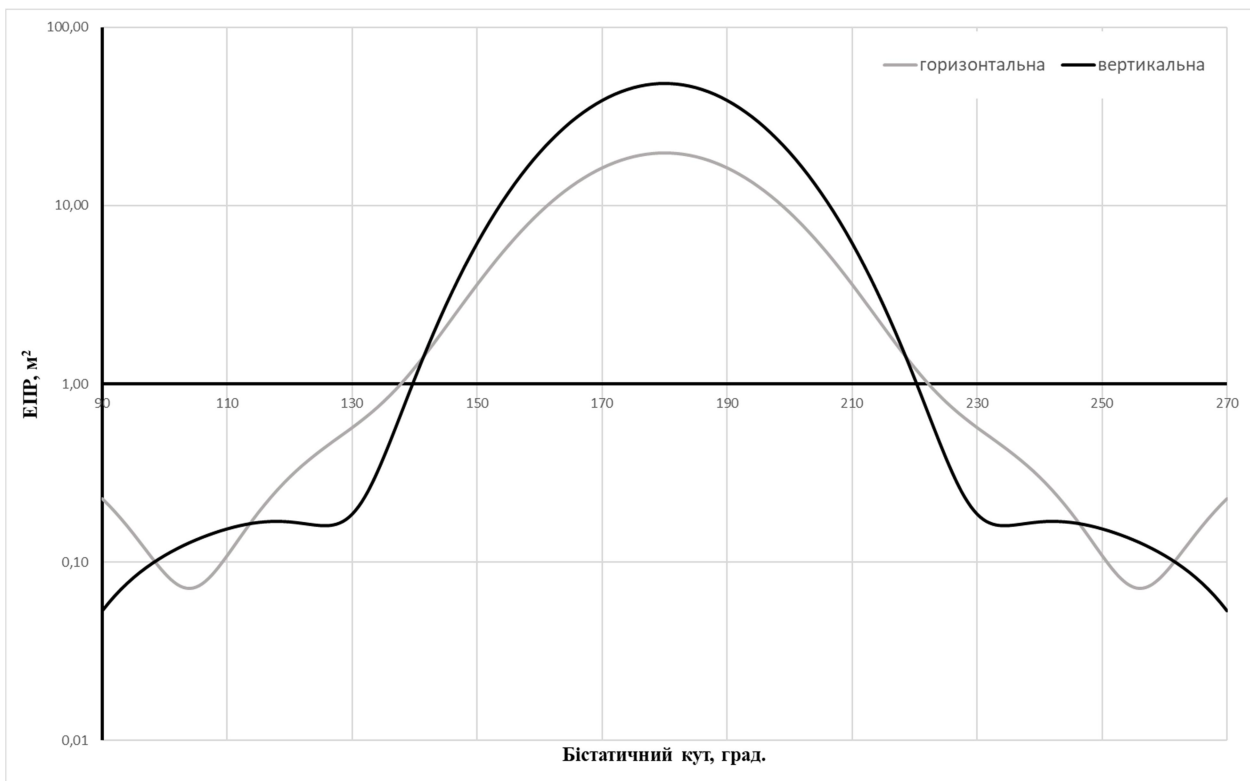


б

Рисунок 4 – Бістатична ЕПР особи-порушника при $f_0 = 586$ МГц: а – $\beta_{\text{опр}} = 180^\circ$; б – $\beta_{\text{опр}} = 210^\circ$



a



б

Рисунок 5 – Бістатична ЕПР особи-порушника при $\beta_{\text{опр}} = 180^\circ$: *a* – $f_0 = 474$ МГц; *б* – $f_0 = 900$ МГц

Таблиця 2 – Середня бістатична ЕПР особи порушника при $f_0 = 586$ МГц, $\beta_{\text{опр}} = 180^\circ$

Поляризація	Значення ЕПР, м ²				
	Бістатичний кут, град.				
	90...134	135...164	165...195	196...225	226...270
Горизонтальна	0,56	3,93	8,26	3,93	0,56
Вертикальна	0,82	8,51	18,69	8,51	0,82

Таблиця 3 – Середня бістатична ЕПР особи-порушника при $f_0 = 586$ МГц, $\beta_{\text{опр}} = 210^\circ$

Поляризація	Значення ЕПР, м ²				
	Бістатичний кут, град.				
	90...134	135...164	15...195	196...225	226...270
Горизонтальна	1,22	3,40	7,16	3,54	0,43
Вертикальна	3,24	8,90	17,01	8,80	0,65

Середні значення ЕПР розглянутої моделі особи-порушника в секторах бістатичних кутів за відповідних частот наведені у табл. 4, 5.

Порівняння отриманих даних моделювання (див. рис. 5, табл. 4, 5) свідчать про збільшення інтенсивності вторинного випромінювання РЛО у разі збільшення частоти підсвічування. Особливо зазначене збільшення спостерігається на частоті $f_0 = 900$ МГц, де середня ЕПР у діапазонах бістатичних кутів $150^\circ\text{--}190^\circ$ у 3-4 рази перевищує аналогічні показники на інших частотах.

Зі збільшенням частоти підсвічування спостерігається зменшення ширини центрального піку, в якому проявляється ефект «просвітної» локації, до 50° . Крім того, на частоті стільникового зв'язку $f_0 = 900$ МГц (рис. 5, б) спостерігається ефект появи незначних нових піків ЕПР у діапазонах $90^\circ\text{--}130^\circ$ і $240^\circ\text{--}270^\circ$.

Виходячи з наведеного вище, доцільно будувати систему прихованого спостереження, використовуючи бістатичні кути у діапазоні від $165^\circ\text{--}195^\circ$, і як приймальну використовувати

антену із шириною діаграми спрямованості за азимутом не менше ніж 30° .

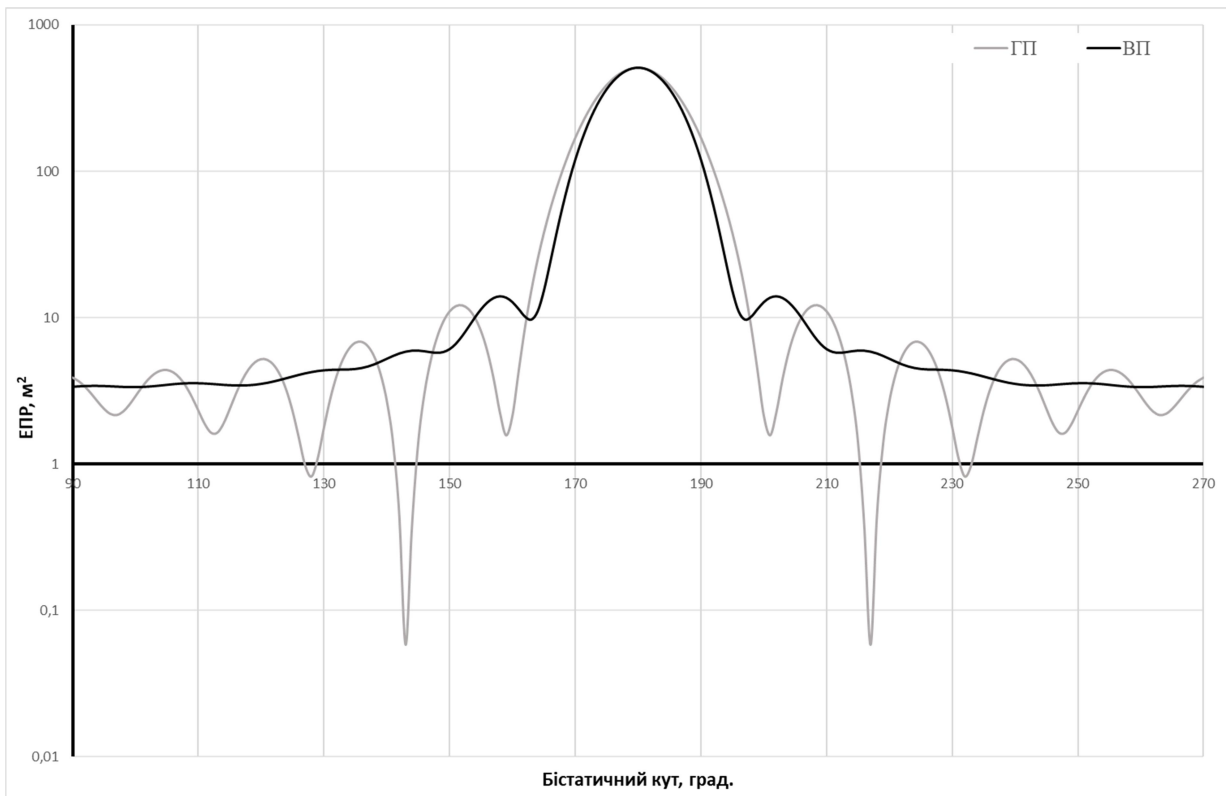
Верифікація результатів розрахунку. Для підтвердження вірогідності математичних розрахунків проведено верифікацію на прикладі об'єктів простої форми – куля радіусом 1 м. На рисунку 6 наведено графіки залежностей значень ЕПР для ГП і ВП для відповідних частот при $\beta_{\text{опр}} = 180^\circ$, які отримані методом ІР.

Теоретичні дослідження [22] показали, що у разі опромінення тіл простої форми плоскими електромагнітними хвилями при $0^\circ < \gamma < 50^\circ$ спостерігається повільне зростання середнього значення бістатичних ЕПР. При $50^\circ < \gamma < 110^\circ$ бістатична ЕПР швидко зростає. Коли γ досягає «просвітного» кута ($\gamma = 180^\circ$), ЕПР різко збільшується та обчислюється за такою формулою:

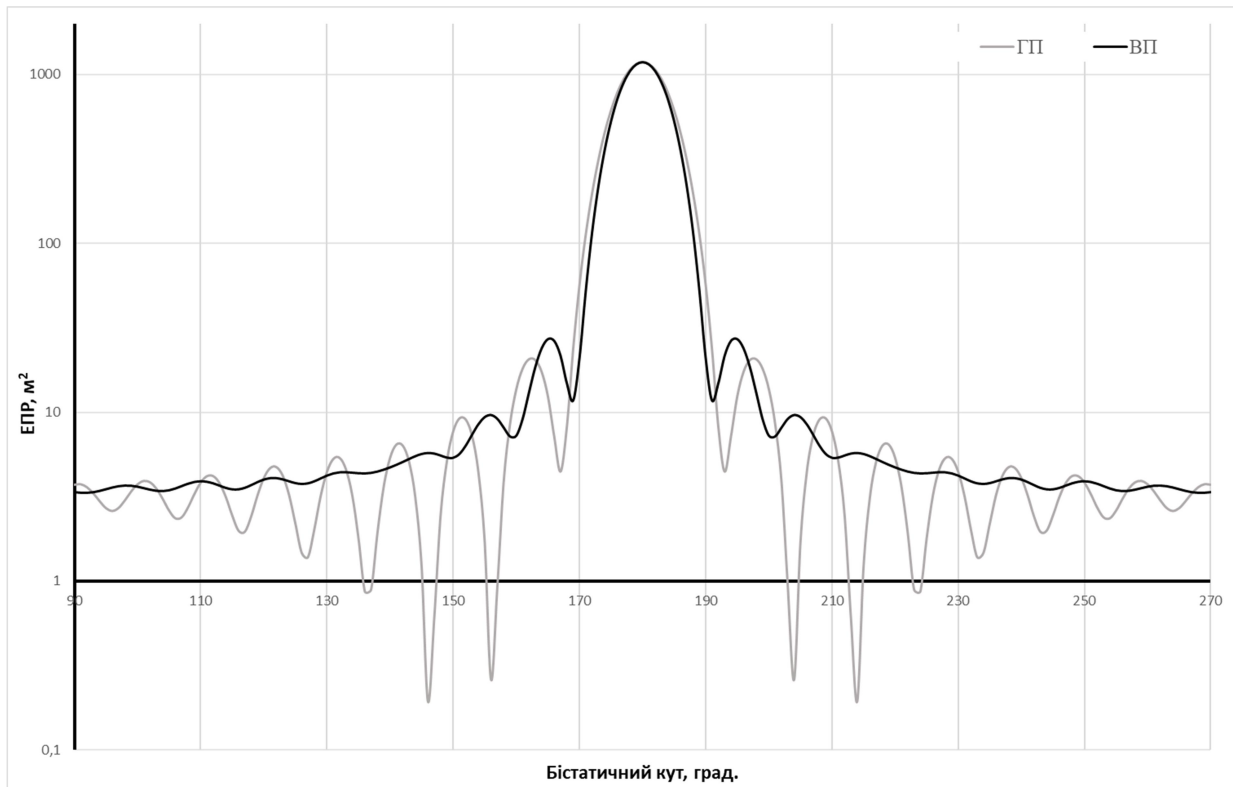
$$\bar{\sigma}(\gamma = 180^\circ) = 4\pi^3 r^4 \lambda^{-2}. \quad (8)$$

Таблиця 4 – Середня бістатична ЕПР особи-порушника при $f_0 = 474$ МГц, $\beta_{\text{опр}} = 180^\circ$

Поляризація	Значення ЕПР, м ²				
	Бістатичний кут, град.				
	90...134	135...164	165...195	196...225	226...270
Горизонтальна	0,65	3,36	6,01	3,36	0,65
Вертикальна	1,39	7,85	14,16	7,85	1,39



а



б

Рисунок 6 – Бістатична ЕПР кулі радіусом 1 м: *а* – частота 586 МГц; *б* – частота 900 МГц

Таблиця 5 – Середня бістатична ЕПР особи-порушника при $f_0 = 900$ МГц, $\beta_{\text{опр}} = 180^\circ$

Поляризація	Значення ЕПР, м ²				
	Бістатичний кут, град.				
	90...134	135...164	165...195	196...225	226...270
Горизонтальна	0,26	4,57	1,11	4,57	0,26
Вертикальна	0,15	8,79	40,89	8,79	0,15

Таблиця 6 – Порівняння отриманих значень бістатичних ЕПР кулі

	Радіус 1 м			
	$f_0 = 586$ МГц		$f_0 = 900$ МГц	
	ГП	ВП	ГП	ВП
Аналітичний вираз, м ²	473,87	473,87	1117,77	1117,77
Метод IP, м ²	497,18	497,15	1169,96	1169,95
Відносна похибка, %	4,92	4,92	4,67	4,67

Для кулі радіусом 1 м аналітичним методом отримані $\bar{\sigma}(\gamma=180^\circ)$ для частоти 586 МГц – 473,87 м² і 900 МГц – 1117,77 м². Порівняння результатів аналітичних розрахунків і значень, отриманих запропонованим методом IP у точці $\gamma=180^\circ$, наведено в табл. 6.

Відносна похибка порівняння бістатичних ЕПР при $\gamma=180^\circ$ становить не більше 5 %, що свідчить про вірогідність запропонованого методу.

Висновки

Таким чином, отримані залежності бістатичної радіолокаційної помітності діелектричного об'єкта з електрофізичними властивостями біологічних тканин на частотах підсвічування дадуть змогу обґрунтувати вимоги до структури системи прихованого спостереження.

1. Проведений аналіз джерел показав, що у процесі моделювання ХВР діелектричних об'єктів резонансних розмірів низку переваг мають методи, засновані на розв'язанні системи IP типу Мюлера.

Наведено методику розрахунку бістатичної ЕПР діелектричних об'єктів резонансних розмірів у полі підсвічування зовнішніх джерел

підсвічування та блок-схему алгоритму їх обчислення. Проведено постановку завдання та описано вхідні та вихідні дані.

2. Як приклад розглянуто приховане спостереження зони охорони ВДО у м. Золочів Харківської області. Ретранслятор телевізійної мережі Т2 або стільникового зв'язку, який знаходиться у м. Нехотеевка Белгородської області, використовувався як джерело зондування. Об'єкт спостереження – особа-порушник у вигляді загальної діелектричної моделі, яка створена із ділянок 22 еліпсоїдів.

Отримано бістатичні залежності ЕПР особи-порушника та середні значення ЕПР у секторах бістатичних кутів при азимуті зондування $\beta_{\text{опр}} = 180^\circ$ та 210° . Обчислення проводилися на частотах цифрових пакетів $f_0 = 474$ МГц, 586 МГц та на частоті стільникового зв'язку 2G стандарту GSM900 – $f_0 = 900$ МГц. Як свідчать результати розрахунку радіолокаційної помітності особи-порушника, значення ЕПР суттєво залежать від поляризації ЕМП. Енергетичний вигравш отримуємо під час використання хвиль вертикальної поляризації. Крім того, ефект так званої «просвітної» локації має місце і для діелектричного об'єкта. Так, при кутах γ від 170° до 190° ЕПР об'єкта

значно збільшується та може досягати значень до 40 м². Ці ефекти необхідно враховувати під час побудови прихованого спостереження за зоною охорони.

3. Проведено верифікацію результатів наведеної методики на прикладі об'єктів простої форми – кулі радіусом 1 м. Встановлено, що відносна похибка обчислення (аналітичним методом та методом IP) бістатичних ЕПР кулі становить не більше 5 %, що свідчить про вірогідність запропонованого методу.

Однак у зоні охорони ВДО особа-порушник буде озброєна та мати засоби індивідуального бронезахисту. В такому випадку РЛО розглядається як комбінований об'єкт резонансних розмірів. Під час розрахунку ЕПР необхідно враховувати взаємодію діелектричних та ідеально провідних ділянок поверхні об'єкта локації. Для цих об'єктів також необхідно отримати залежності ХВР, які ще не висвітлені у наукових джерелах. Однак це завдання досить трудомістке.

Перелік джерел посилання

1. Орехов А. Л. Малая война. Организация и тактика боевых действий малых подразделений. Минск : Харвест, 1998. 509 с.

2. Военні аспекти протидії «гібридній» агресії: досвід України : монографія / за заг. ред. А. М. Сиротенка. Київ : НУОУ, 2020. 176 с.

3. Моделювання надзвичайних або кризових ситуацій під час виконання завдань бойової служби з охорони важливих державних об'єктів. Оцінка ефективності прийнятих рішень командирами підрозділів: звіт про НДР («Орхідея») (остаточний) / НА НГУ ; кер. Г. А. Дробаха. – 0116U003652. Харків, 2017. 190 с.

4. Про Національну гвардію України: Закон України від 13.03.2014 р. № 876-VII. *Відомості Верховної Ради України*. 2014. №17. Ст. 594.

5. Knott E. F., Shaeffer J. F., Tuley M. T. Radar Cross Section. 2nd ed. Boston, London : Artech House, 1993. 611 p.

6. Shirman Ya. D. Computer Simulation of Aerial Target Radar Scattering Recognition, Detection and Tracking. Norwood, USA : Artech House, 2002. 382 p.

7. Уфимцев П. Я. Теория дифракционных краевых волн в электродинамике. Москва : Бином, 2007. 366 с.

8. Nechitaylo S. V., Orlenko V. M., Sukharevsky O. I., Vasilets V. A. Electromagnetic

Wave Scattering by Aerial and Ground Radar Objects. Boca Raton, USA: SRC Press Taylor & Francis Group, 2014. 334 p.

9. Залевский Г. С., Сухаревский О. И. Расчет характеристик рассеяния воздушных радиолокационных объектов резонансных размеров, основанный на итерационном алгоритме. *Известия вузов. Радиоэлектроника*. 2014. Т. 57. № 6. С. 13–25.

10. Рассеяние электромагнитных волн воздушными и наземными радиолокационными объектами : монография / О. И. Сухаревский и др. ; под ред. О. И. Сухаревского. Харьков : ХУ ВС, 2009. 468 с.

11. Sukharevsky O. I., Gorelyshev S. A., Vasilets V. A. UWB Pulse Backscattering from Objects Located near Uniform Half-Space. *Ultrawideband Radar: Applications and Design*. CRC Press Taylor & Francis Group. Boca Raton, 2012. P. 253–284.

12. Fabbro V. Three-dimensional backscattering by a target above the sea surface. *Electromagnetics*. 2001. № 21(6). P. 451–466.

13. Johnson J. T. A study of the four-path model for scattering from an object above a half-space. *Microwave and Optical Technology Letters*. 2001. № 30(2). P. 130–134.

14. Сухаревский О. И., Залевский Г. С., Нечитайло С. В. Моделирование характеристик рассеяния воздушных объектов резонансных размеров в метровом диапазоне волн. *Известия вузов. Радиоэлектроника*. 2010. Т. 53. № 4. С. 51–57.

15. Zalevsky G. S., Sukharevsky O. I. Secondary Emission Characteristics of Resonant Perfectly Conducting Objects of Simple Shape. *Proceedings of International Conference on Antenna Theory and Techniques, ICATT'13*. Odessa, 16-20 Sept. 2013. Odessa, 2013. P. 145–147.

16. Залевский Г. С., Василец В. А., Сухаревский О. И. Радиолокационные дальностные портреты крылатых ракет в различных диапазонах длин волн. *Прикладная радиоэлектроника*. 2014. Т. 13. № 1. С. 20–28.

17. Залевский Г. С. Метод расчета характеристик рассеяния диэлектрических объектов резонансных размеров. *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил*. 2014. Вип. 2(39). С. 66–69.

18. Залевский Г. С., Музыченко А. В., Сухаревский О. И. Метод радиолокационного обнаружения и идентификации металлических и диэлектрических объектов резонансных размеров, расположенных в диэлектрической

среде. *Известия вузов. Радиоэлектроника*. 2012. Т. 55. № 9. С. 11–25.

19. Zalevsky G. S., Muzychenko A. V., Sukharevsky O. I. Method of Radar Detection and Identification of Metal and Dielectric Objects with Resonant Sizes Located in Dielectric Medium. *Radioelectronics and Communications Systems*. 2012. Vol. 55. № 9. P. 393–404.

20. 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. *Advanced Ultrawideband Radar: Signals, Targets and Applications* / edited by J. D. Taylor.

Boca Raton, London, New York: CRC Press Taylor & Francis Group, 2016. Chapter 5. P. 195–235.

21. Залевский Г. С., Сухаревский О. И. Метод расчета характеристик вторичного излучения наземных радиолокационных объектов резонансных размеров. *Системи озброєння і військова техніка*. 2014. №1. С. 112–121.

22. Бакулев П. А. Радиолокационные системы : учебник для вузов. Москва : Радиотехника, 2004. 320 с.

Стаття надійшла до редакції 17.11.2021 р.

УДК 621.396.96

С. А. Горелишев, П. Ю. Волков, А. А. Олещенко

ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИОЛОКАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ ОСОБЫ-НАРУШИТЕЛЯ В СИСТЕМЕ СКРЫТОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ

Рассмотрены вопросы расчета бистатической эффективной поверхности рассеяния диэлектрического объекта (особы-нарушителя), который находится в зоне охраны важного государственного объекта. Система охраны построена на основе использования технических средств, которые спроектированы по принципам полупассивной бистатической радиолокации. Предложена методика оценивания возможности радиолокационного наблюдения диэлектрических объектов в поле подсвета телевизионной и мобильной сети. Получены бистатические зависимости эффективной поверхности рассеяния нарушителя и средние значения эффективной поверхности рассеяния в секторах бистатических углов при различных азимутах и различных частотах зондирования. При анализе зависимостей эффективной поверхности рассеяния оценены усредненные значения уровня рассеянного сигнала. Проведена верификация результатов данной методики на примере объектов простой формы. Полученные зависимости радиолокационной заметности особы-нарушителя позволяют обосновать технические требования к построению системы скрытого наблюдения за зоной охраны важных государственных объектов.

Ключевые слова: полупассивная бистатическая радиолокация, эффективная поверхность рассеяния, диэлектрический объект, нарушитель, источник подсвета.

UDC 621.396.96

S. Horielyshev, P. Volkov, O. Oleschenko

CHARACTERISTICS OF RADAR SCATTERING OF THE VIOLATING PERSON IN THE SYSTEM OF HIDDEN RADAR OBSERVATION

Criminal unauthorized actions of individuals (violators) or illegal armed groups are particularly dangerous because they are aimed to attack important government facilities. The current trends in the construction of physical protection systems of important government facilities are based on the use of technical means built on the principle of semi-active bistatic radar using an external illumination source. To perform the task of violators detection, it is necessary to obtain a priori information about the radar visibility of location objects under various conditions. The offending person is considered as a dielectric

object with electrophysical properties of biological tissues, which greatly complicates the solution of this problem.

To obtain this data, we used mathematical modeling, which is based on the solution of a system of integral equations of the Mueller type. A method for assessing the possibility of radar observation of dielectric objects in the field of illumination of television and cellular networks has been developed. The problem is set and the input and output data are described.

The article considers, as an example, covert surveillance of the important government facilities protection zone in the city of Zolochiv, Kharkiv region. The T2 TV network repeater located in Nekhoteevka, Belgorod region or a cellular repeater was used as a radiation source. The object of observation is a violator in the form of a general dielectric model with the parameters of permeability of a biological object. The bistatic dependences of the radar cross-section of the exciter and the average values of the radar cross-section in the sectors of the bistatic angles at different azimuths and different probing frequencies are obtained. When analyzing the radar cross-section dependence, the average values of the scattered signal level are estimated. The results of this technique were verified on the example of objects of simple form.

The obtained dependences of the radar visibility of the offender, who are in the area of responsibility, on the frequencies of the T2 transmitter and cellular communication will allow to substantiate the technical requirements for the construction of a covert surveillance system and signal processing algorithms.

Keywords: *semi-active bistatic radar, radar cross-section, dielectric object, violator, light source.*

Горєлишев Станіслав Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри тактики Національної академії Національної гвардії України
<https://orcid.org/0000-0003-1689-0901>

Волков Павло Юрійович – ад'юнкт Національної академії Національної гвардії України
<https://orcid.org/0000-0003-1238-9730>

Олещенко Олександр Анатолійович – кандидат військових наук, виконуючий обов'язки директора департаменту планування застосування Головного управління Національної гвардії України
<https://orcid.org/0000-0001-6324-7981>