В.А. Юнда, А.М. Зубков, Ю.М. Косовцов, В.В. Атаманюк, В.С. Мочерад

Національна академія Сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів

# КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОЇ ЦІЛЕФОНОВОЇ ОБСТАНОВКИ ПРИ САМОНАВЕДЕННІ РАКЕТИ НА НАЗЕМНУ ЦІЛЬ

Запропоновано методику отримання характеристик розсіювання складних радіолокаційних об'єктів шляхом комп'ютерного моделювання мультиспектральної цілефонової обстановки (ЦФО) при наведенні (самонаведенні) ракет на наземні цілі на основі аналізу фізичних закономірностей формування випромінених, розсіяних і відбитих ціллю сигналів в різних діапазонах спектру електромагнітних хвиль, а також їх кореляційного взаємозв'язку з характеристиками формоутворюючої поверхні цілі. Методику апробовано на моделях об'єктів з різною геометрією формоутворюючої поверхні.

Ключові слова: самонаведення, цілефоновий контраст, радіолокаційний канал, інфрачервоний канал.

### Вступ

Постановка проблеми. В роботі [1] показано, що ефективним шляхом забезпечення інваріантності характеристик самонаведення ракети на наземну ціль при зміні знаку цілефонового контрасту є використання багатоспектрального координатора цілі з пріоритетом радіолокаційного каналу, що має найбільшу дальність дії, вседобовий та всепогодний. Безперечний науковий і практичний інтерес представляє оцінка ефективності багатоспектрального самонаведення на початкових етапах проектування шляхом комп'ютерного моделювання. Важливу роль відіграє формування аналітичної моделі сигналів, що приймає головка самонаведення (ГСН) з врахуванням їх кореляції в оптичному, тепловому (інфрачервоному) і радіо діапазонах. При цьому слід в якості опорних використовувати оптичні (візуальні) зображення цілей, комп'ютерна технологія формування яких добре відпрацьована.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналітичні моделі радіолокаційних сигналів від складних цілей, що використовуються значно спрощені [2-6]. Найбільш розповсюджені на теперішній час є різні варіанти так званої моделі "блискучих точок" [7,8]. Найчастіше в цих моделях геометричні особливості цілі або перешкоди не деталізуються і, як правило, враховуються лише габаритні розміри спостережуваних об'єктів. Такий підхід забезпечує якісно вірні інтегральні оцінки ефективної площі розсіювання (ЕПР) цілей та їх фрагментів, діаграм зворотного розсіювання (ДЗР). Недоліки такого підходу особливо помітні при спостереженні просторово протяжних цілей зі складною геометрією, коли необхідно виявити відмінності між цілями або між ціллю і просторово протяжною перешкодою, тобто там, де детальні геометричні характеристики спостережуваних об'єктів (і, відповідно, їх моделей) мають вирішальне значення.

Формулювання мети статті. На основі комп'ютерної 3D графіки отримати розподіл інтенсивності поля (для просторово некогерентного випадку) або напруженості електромагнітного поля (для просторово когерентного випадку) радіо, інфрачервоного і оптичного діапазонів в деякій області спостереження для отримання радіолокаційних характеристик розсіювання складних об'єктів. Слід відмітити, що 3D моделі в комп'ютерному моделюванні відеозображень формуються за допомогою розбиття поверхні об'єктів на елементи простої форми. Подібний метод отримання деяких часткових радіолокаційних характеристик застосовано в роботах [9,10]. Приписуючи кожному елементу поверхні певні характеристики розсіювання електромагнітного поля (когерентний випадок) і певну інтенсивність і/або температуру (некогерентний випадок) можна універсальним способом формувати сигнали різних діапазонів. У своїй основі описуваний підхід розвиває модель "блискучих точок" [8] для детального обліку геометричних особливостей цілей або перешкод.

# Виклад основного матеріалу

Під моделлю ЦФО будемо розуміти аналітичну залежність інтенсивностей полів, що розсіяні (випромінені) наземною ціллю і навколишнім фоном місцевості в спектральному діапазоні роботи парціального каналу, від геометрії (конструкції) цілі, фізичних параметрів її формоутворюючої поверхні, рельєфу і фізичних параметрів місцевості, а також характеристик приземного слою атмосфери.

Введемо наступні, практично виправдані, обмеження:

1. Взаємодія полів цілі і навколишнього фону носить адитивний характер, тобто сумарне поле має вигляд

$$E_{\Sigma}(t,\omega,\vec{\gamma}_{\mu}) = E_{\mu}(t,\omega,\vec{\gamma}_{\mu}) + E_{\phi}(t,\omega)$$
(1)

2. Інтенсивність фону в межах кутів орієнтації цілі  $\vec{\gamma}_{\mu}$  залишається постійною (у другому додатку (1) відсутня залежність від  $\vec{\gamma}_{\mu}$ ).

3. Вплив характеристик приземного слою атмосфери визначається через "коефіцієнт прозорості" відповідної ділянки спектра EMX k<sub>A</sub>:

- в пасивному каналі  $P_{np} = f(r_{u}, k_{A})P_{вип};$ 

– в активному каналі  $P_{IID} = f(2r_{II}, k_A)P_{30HI}$ ,

де Р<sub>пр</sub> – потужність прийнятого ГСН сигналу,

Р<sub>вип</sub> – потужність випроміненого ціллю сигналу (наприклад, теплового),

Р<sub>зонл</sub> – потужність зондуючого сигналу.

4. Необхідні дальність захвата цілі і точність самонаведення можуть бути забезпечені тільки при додатному і достатньо високому енергетичному цілефоновому контрасті (ЦФК).

Сучасний рівень розвитку обчислювальних пристроїв і систем автоматизованого проектування (САПР) дає змогу використовувати для рішення задач математичного моделювання розсіювальних і випромінювальних характеристик об'єктів складної геометричної форми моделі, які засновані на представленні зовнішньої поверхні об'єкта у вигляді сукупності однотипних елементів, що дає змогу з інженерною точністю створити віртуальний образ практично будь-якого цілефонового сюжету.

Основою такої методики є підходи, розвинені у 3D моделюванні оптичних зображень складних об'єктів. У сучасних САПР 3D модель об'єкта конвертується у в полігональну модель, яка представляє собою кінцеву сукупність однотипних плоских елементарних відбивачів (полігонів) з певним набором електродинамічних властивостей, кількість і форма яких може бути різною. Для прикладу, на рис. 1 наведено полігональну модель сфери. Це дає змогу синтезувати геометричну модель об'єкта, який спостерігається, практично будь-якої форми.



Рис. 1. Сфера та її полігональна модель

До основних переваг такого підходу можна віднести наявність бібліотеки широкого класу об'єктів та спеціалізованого програмного забезпечення з генерації їх 3D моделей. Однак недоліками є обмежені можливості досягнення високої точності апроксимації зовнішнього образу об'єкта, які потребують великих витрат на опис складної радіолокаційної цілі, а також на розв'язання задачі чисельними методами. Слід також відмітити, що похибки результатів, отриманих за допомогою фізичної оптики, швидко ростуть по мірі відхилення від напряму дзеркального відбивання. На практиці найчастіше досліджується результуюче поле в одній точці простору, що дає змогу отримувати діаграми зворотного розсіювання (випромінювання) складних об'єктів, або їх часові залежності від динаміки руху.

Перспективним вважається підхід, який базується на дослідженні поля, розсіяного складним об'єктом на поверхні приймальної апертури, як функції несучої частоти зондуючого сигналу та координат фрагментів формоутворювальної поверхні. Такий підхід дає змогу отримати широкий клас локаційних характеристик, зв'язаних з геометричною формою об'єкта, а також проводити мультиспектральний аналіз електромагнітного поля, яке формується об'єктами складної конфігурації. Поле в точці спостереження видається сумою полів, розсіяних (випромінених) однотипними елементарними поверхнями (наприклад, трикутниками), які формують поверхню цілі, з урахуванням їх ДЗР. Недоліком такого підходу є неточне відновлення фазової структури поля на поверхні, однак зберігається зв'язок енергетичних локаційних характеристик з геометричною формою об'єкта та значно зменшується об'єм обчислень. Запропонована методика комп'ютерного моделювання є адекватною альтернативою експериментальним дослідженням, не має обмежень за умовами спостереження і може застосовуватись для відпрацювання технічних рішень на початкових етапах проектування локаційних систем, а також допускає каталогізацію цілей та підстильних поверхонь. Розглянемо докладніше отримання розсіяного об'єктом поля за цією методикою.

У системі координат, пов'язаній зі спостерігачем (рис. 2), елемент об'єкта характеризується:

a) формою (прямокутник, трикутник, ребро і т.п.);

б) геометричними розмірами;

в) координатами центру елемента – (хі, уі, zi);

г) орієнтацією елемента – нормаллю до елемента ni;

д) залежно від форми і розмірів елемента йому приписується індивідуальна ДЗР –  $\sigma_i$  ( $\alpha_i$ ,  $\beta_i$ ,  $\lambda$ ), де  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$  – проекції кута між напрямком на елемент від довільної точки простору (x, y, z) і нормаллю до елементу n<sub>i</sub>,  $\lambda$  – довжина зондуючої хвилі. При врахуванні поляризаційних ефектів  $\sigma_i$  ( $\alpha_i$ ,  $\beta_i$ ,  $\lambda$ ) являє собою поляризаційну матрицю розсіювання.

При формуванні поля некогерентних сигналів, наприклад, в інфрачервоному діапазоні окремому елементу 3D моделі об'єкта спостереження приписується певна температура або відповідна інтенсивність випромінювання.



Рис. 2. Основні параметри елемента 3D моделі об'єкта спостереження

Для довільної точки простору (x, y, z) потрібно визначити:

а) відстань від даної точки до центру елемента

$$R_{i} = \left[ \left( x - x_{i} \right)^{2} + \left( y - y_{i} \right)^{2} + \left( z - z_{i} \right)^{2} \right]^{1/2}; \quad (2)$$

б) проекції кутів ( $\alpha_i$ ,  $\beta_i$ ) між вектором  $R_i$  і нормаллю до поверхні елемента  $n_i$  через параметри (x, y, z), (x<sub>i</sub>, y<sub>i</sub>, z<sub>i</sub>) і  $n_i$ ;

в) додаткові параметри, пов'язані з електродинамічними характеристиками елемента.

На основі експортованих параметрів елементів із 3D моделі в просторово когерентному випадку для виділеної області простору формується напруженість електромагнітного поля

$$E(x, y, z, t) =$$

$$= \sum A / R_i^2 \sigma_i (\alpha_i, \beta_i, \lambda) \exp\{2\mu R_i + i[2kR_i - \omega t]\}, \qquad (3)$$

де А – амплітуда зондуючої хвилі,

- μ коефіцієнт поглинання ЕМХ в атмосфері,
- k хвильове число,
- ω кругова частота зондуючого сигналу,
- t час.

Поля інтенсивностей в некогерентному випадку формуються в деякій області картинної площини з врахуванням поглинання випромінювання в атмосфері

$$I = I_{0i} \exp\{\mu(\lambda)R_i\}, \qquad (4)$$

де  $I_{0i}$  – інтенсивність випромінювання, що відповідає і-му елементу 3D моделі.

В процесі дослідження було розроблено пакет прикладних програм, які дозволяють отримати зображення довільного об'єкта у видимому і інфрачервоному діапазонах. Радіолокаційні зображення цього ж об'єкта формуються із генерованого поля розсіяного сигналу. При цьому, оскільки радіолокаційні системи можуть мати різноманітні структури (когерентні, некогерентні, поляризаційні, просторово одноканальні і багатоканальні), з генерованого поля формуються радіолокаційні зображення відповідної конфігурації.

З метою підтвердження адекватності такого підходу на рис. 3 – 5 представлені ДЗР об'єктів і сцен, для яких відомі аналітичні вирази, а на рис. 6 – 10 представлені ДЗР складного радіолокаційного об'єкта. Обчислення виконувалися в різних ділянках спектру радіохвиль (12 ГГц, 36 ГГц, 95 ГГц).



Рис. 3. Модель куба та його ДЗР



Рис. 4. ДЗР куба при різних частотах зондуючого сигналу та в полярній системі координат



Рис. 5. Сцена з трьох кубів та їх ДЗР



Рис. 6. Модель складного радіолокаційного об'єкту



Рис. 8. ДЗР складного радіолокаційного об'єкта



Рис. 9. ДЗР складного радіолокаційного об'єкта при різних частотах зондуючого сигналу



Рис. 7. Полігональна модель складного радіолокаційного об'єкта



Рис. 10. ДЗР складного радіолокаційного об'єкта в полярній системі координат

При моделюванні радіолокаційних сигналів можна використати результати, що отримані в ході циклу робіт по експериментальному визначенню «портретів» об'єктів наземної техніки за допомогою радіолокаційного вимірювального комплексу міліметрового діапазону РИК-94 [10].

Результати демонструють добре узгодження з характеристиками, отриманими раніше прямими методами (експериментальними дослідженнями або точними розрахунками).

Важливою обставиною необхідно вважати те, що методика, яка пропонується, дозволяє отримати адекватні результати для практично любої сукупності конфігурацій радіолокаційних систем і об'єктів, що спостерігаються, тобто вирішувати всі прикладні задачі, які пов'язані з високоточним самонаведенням (наведенням) ракет на наземні цілі.

### Висновки

1. Запропонована методика математичного моделювання ФЦО є адекватною альтернативою натурним і напівнатурним дослідженням у широкому діапазоні спектра електромагнітних хвиль.

2. Розроблена методика отримання характеристик розсіювання складних радіолокаційних об'єктів шляхом комп'ютерного моделювання не має обмежень по спектральному рознесенню каналів самонаведення.

# Список літератури

1. Зубков А.Н. Самонаведение ракеты на наземную цель при знакопеременном целефоновом контрасте / А.Н. Зубков, В.А. Юнда, И.З. Залуцкая, А.П. Коленников // Військово-технічний збірник. – Львів: АСВ. – 2013. – №2(9) – С. 31-35.

2. Electromagnetic Wave Scattering by Aerialand Ground Radar Objects / Edited by Oleg I. Sukharevsky. – CRC Press Taylor & Francis GRoUp. – 2015. 3. Ufintsev P. Comments on diffraction principles and limitations of RCS Reduction techniques / P. Ufintsev // Proceedings of the IEEE. – Vol. 84 (12). – P. 1830-1851.

4. Борзов А.Б. Математическая модель рассеяния электромагнитных волн на объектах сложной формы / А.Б. Борзов, А.В. Соколов // Электромагнитные волны & электронные системы : сб. науч. тр. – 1998. – № 10. – С. 39-54.

5. Антифеев В.Н. Физические модели радиолокационных полей рассеяния объектов сложной формы / В.Н. Антифеев, А.Б. Борзов, В.Б. Сучков. – М. : МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2003. – 61 с.

6. Небабин В.Г. Методы и техника радиолокационного распознавания / В.Г. Небабин, В.В. Сергеев. – М. : Радио и связь, 1984. – 152 с.

7. Зубков А.Н. К вопросу использования понятия "блестящая точка" в практике радиолокации распределенных целей / Зубков А.Н., Косовцов Ю.Н. // Сборник научных трудов 3-го Межд. радіоелектронного форума. – Х., 2008. – Т. 9. – С. 193-196.

8. Штагер Е.А. Рассеяние радиоволн на телах сложной формы / Е.А. Штагер. – М.: Радио и связь, 1986. – 184 с.

9. Василець В.О. Загальні особливості характеристик розсіяння зразків наземної техніки повітряних сил збройних сил України / В.О. Василець, Я.О. Белевщук // Системи озброєння і військова техніка. — 2009. — № 1 (17). — С. 36-40.

10. Радиолокационный измерительный комплекс миллиметрового диапазона (РИК-94) / А.Н. Зубков, П.В. Федосюк, Ю.Н. Косовцов, В.В. Атаманюк // Труды 1-го Укр. симп. "Физика и техника миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн". – Х., 1991. – Т. 1. – С. 57-58.

Надійшла до редколегії 22.12.2015

**Рецензент:** д-р техн. наук с.н.с. О.М. Купріненко, Національна академія Сухопутних військ ім. гетьмана Петра Сагайдачного, Львів.

#### КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОЙ ЦЕЛЕФОНОВОЙ ОБСТАНОВКИ ПРИ НАВЕДЕНИИ НА НАЗЕМНЫЕ ЦЕЛИ

В.А. Юнда, А.М. Зубков, Ю.М. Косовцов, В.В. Атаманюк, В.С. Мочерад

Предложено методику получения характеристик рассеивания сложных радиолокационных объектов путем компьютерного моделирования мультиспектральной целефоновой обстановки (ЦФО) при наведении (самонаведении) ракет на наземные цели на основе анализа физических закономерностей формирования излученных, рассеянных, и отраженных наземной целю сигналов в различных диапазонах спектра электромагнитных волн, а также их корреляционной взаимосвязи с характеристиками формообразующей поверхности цели. Методика апробирована на моделях объектов с различной геометрией формообразующей поверхности.

Ключевые слова: самонаведение, целефоновый контраст, радиолокационный канал, инфракрасный канал.

#### COMPUTER SIMULATION OF MULTISPECTRAL THE TARGET AND BACKGROUND SITUATION WHEN YOU HOVER ON GROUND TARGETS

V.A. Yunda, A.N. Zubkov, Y.N. Kosovcov, V.V. Atamanyuk, V.S. Mocherad

The technique of computer simulation of multispectral the target and background environment hover (homing) missiles at ground targets based on analysis of the physical laws governing the formation of the radiation scattered and reflected terrestrial purpose to signals in different bands of the electromagnetic spectrum, as well as their correlation relationship with the characteristics of the molding surface purpose. The method was tested on models of objects with different geometry of the molding surface.

Keywords: self-guided, the target and background contrast, radar channel, thermal channel.