

Борисенко О. В., Залевський Г. С.

ВИКОРИСТАННЯ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ РЛС МЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ ХВИЛЬ

Анотація. У роботі представлено електродинамічну модель сигналу, відбитого рухомою крилатою ракетою (КР) на виході антенної решітки (АР) радіолокаційної станції (РЛС) метрового діапазону хвиль. В основу моделі покладено метод інтегрального рівняння магнітного поля (ІРМП), який дозволяє з високою точністю отримувати характеристики вторинного випромінювання (ХВВ) ідеально провідних об'єктів резонансних розмірів. Створена електродинамічна модель забезпечує дослідження сигналів, відбитих рухомими повітряними об'єктами, при заданих параметрах траєкторії цілі, параметрах зондувального сигналу та заданій моделі АР метрового діапазону хвиль. Результати моделювання показали залежність енергетичних характеристик відбитого сигналу від типу траєкторії (діаметральна, дотична, проміжна) та центральної частоти зондувального сигналу. Встановлено, що для різних типів КР максимуми відбитої енергії спостерігаються на різних частотах, що обґрунтовує доцільність впровадження алгоритмів адаптивної зміни частоти зондування в РЛС типу П-18 «Малахіт».

Ключові слова: енергія відбитого сигналу, інтегральне рівняння магнітного поля, крилата ракета, математичне моделювання, радіолокатор метрового діапазону хвиль.

Abstract. The paper presents an electrodynamic model of the signal reflected by a moving cruise missile at the output of the antenna array of the VHF band radar antenna array. The model is based on the magnetic field integral equation method, which allows for high-accuracy computation of the secondary radiation of perfectly conducting objects of resonant sizes..

The created electrodynamic model enables the study of signals reflected by moving air objects under specified target trajectory parameters, probing signal parameters, and the specified model of the VHF band radar antenna array.

The modeling results showed the dependence of the energy characteristics of the reflected signal on the type of trajectory (diametric, tangential, intermediate) and the central frequency of the sounding signal. It has been established that for different types of cruise missiles, the maximums of reflected energy are observed at different frequencies, which justifies the feasibility of implementing algorithms for adaptively changing the sensing frequency in radars of the P-18 "Malachite" type.

Keywords: cruise missile, magnetic field integral equation, mathematical modeling, reflected signal energy, VHF band radar

Вступ

В умовах російсько-української війни РЛС метрового діапазону хвиль такі як П-18, П-18МА, П-18 "Малахіт" залишаються основним джерелом інформації про повітряну обстановку, забезпечуючи виявлення та супроводження широкого спектра повітряних цілей у складній обстановці. Радіолокаційна розвідка ведеться за умов інтенсивної радіоелектронної протидії, складних погодних умовах, при постійній зміні тактики застосування засобів повітряного нападу та в умовах впливу засобів вогневого ураження противника. Отже, підвищення ефективності виявлення повітряних цілей у тому числі і КР метровими РЛС є актуальним завданням, яке потребує створення інструментів оцінювання рівня прийнятої енергії відбитого ціллю сигналу з урахуванням типу повітряного об'єкта, траєкторії польоту, ракурсу відносно РЛС, частоти та структури зондувального сигналу а також параметрів АР. З цією метою розроблено електродинамічну модель сигналу, відбитого рухомою КР, на виході АР РЛС метрового діапазону хвиль, яка заснована на електродному методі ІРМП [1, 2]. Модель практично реалізована у програмному середовищі Mathcad 15. Розрахунок ХВВ повітряних об'єктів здійснюється у середовищі мови програмування Fortran.

Результати дослідження

Розроблена модель сигналу, відбитого КР, на виході АР РЛС метрового діапазону має блочно-модульну структуру та складається з п'яти основних блоків. Структурна схема моделі зображена на рисунку 1. Архітектура моделі дозволяє гнучко змінювати вхідні параметри для різних сценаріїв і робить модель універсальною.

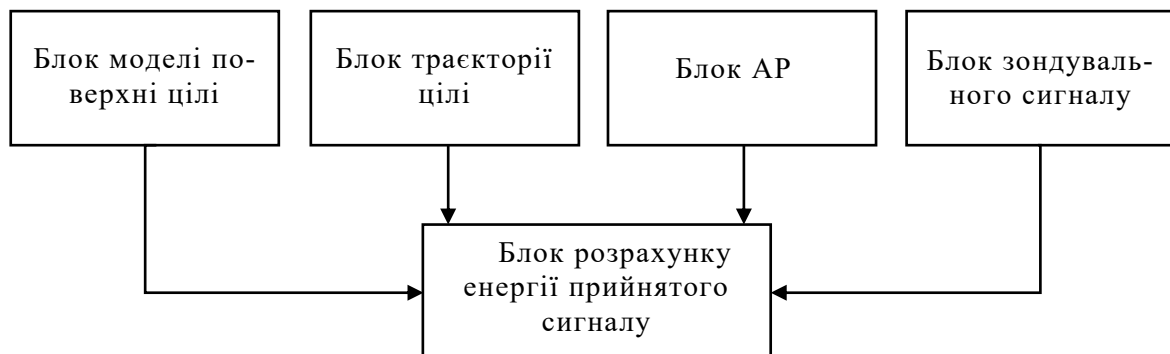


Рис. 1. Структурна схема моделі сигналу, відбитого КР, на виході АР

Склад моделі:

1. Блок моделі поверхні цілі - призначений для створення дискретизованих комп'ютерних моделей повітряних цілей та їх адаптації до обраного електродинамічного методу розрахунку ХВВ [3].

2. Блок траєкторії цілі - у блоці за вхідними даними (висота, швидкість польоту, початкові/кінцеві координати, темп оновлення, рівняння руху тощо) формується масив точок опромінення цілі, для яких визначаються дальності та кути ракурсу цілі відносно РЛС для кожної точки її дискретної траєкторії. Це забезпечує врахування змін ефективної поверхні розсіювання цілі залежно від її ракурсу.

3. Блок АР - забезпечує створення АР довільної конфігурації (число і розміщення випромінювачів) з можливістю задавати довільний амплітудно-фазовий розподіл у її розкритті, робочу частоту, висоту встановлення АР над рівнем підстильної поверхні, та режими сканування. На виході блоку формується масив даних з координатами точок прийому, що відповідають просторовому положенню елементів АР [4].

4. Блок зондувального сигналу - дозволяє моделювати зондувальні сигнали різної складності з такими змінюваними параметрами як центральна частота, ширина спектра, крок дискретизації, кількість частотних дискрет тощо і формує необхідні для подальшого розрахунку частотні сітки (зондувальні сигнали у дискретній формі).

5. Блок розрахунку енергії прийнятого сигналу - інтегрує дані з попередніх блоків, обчислює комплексні амплітуди прийнятих сигналів, та підсумовує їх з урахуванням фазових зсувів і амплітудно-фазового розподілу в АР. Результатом розрахунку є сигнал на виході АР, за яким визначається енергія прийнятого сигналу та її зміна на траєкторії руху цілі [5].

Результати моделювання енергії сигналу, відбитого рухомою КР, на виході АР РЛС П-18 (П-18 "Малахіт") [6] метрового діапазону хвиль для різних траєкторій польоту показують залежність рівня прийнятої енергії від типу траєкторії (діаметральна, дотична, проміжна) та від центральної частоти зондувального лінійно-частотно модульованого сигналу в межах робочого діапазону частот РЛС. Моделювання дозволяє визначити конкретні частоти, при яких відбита енергія на етапах виявлення і супроводження КР набуває максимальних значень. Встановлено, що для різних типів ракет та траєкторій їх польоту максимумами відбитої енергії спостерігаються на різних частотах, що обґрунтовує доцільність модернізації програмного забезпечення існуючих РЛС, зокрема П-18 "Малахіт", шляхом впровадження алгоритмів адаптивної зміни центральної частоти зондувального сигналу залежно від траєкторії польоту (ракурсу відносно РЛС), режиму роботи (пошук або супровід) та типу цілі. Створення бази даних з діаграмами зворотного випромінювання повітряних цілей за допомогою розробленої моделі та впровадження зазначених адаптивних алгоритмів забезпечить суттєве підвищення ефективності наявних РЛС метрового діапазону та буде корисним на етапі розробки перспективних засобів радіолокації.

Список використаних джерел:

1. Sukharevsky, O., Zalevsky, G. and Vasilets, V. (2016), Modeling of Ultra wideband (UWB) Impulse Scattering by Aerial and Subsurface Resonant Objects Based on Integral Equation Solving, Advanced Ultra wideband Radar: Signals, Targets, and Applications, London, New York, J.D. Taylor ed. Boca Raton, pp. 195-235. <https://doi.org/10.1201/9781315374130>.

2. Вторинне випромінювання безпілотних літальних апаратів (математичне моделювання) : монографія / О.І. Сухаревський та ін. ; за ред. О.І. Сухаревського. Харків : ХАІ, 2022. 270 с.

3. Борисенко О. В. Характеристики вторинного випромінювання крилатих ракет ЗМ-14 “Калибр” та Х-101 у метровому діапазоні хвиль. Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2024. № 1 (54). С. 78–86. <https://doi.org/10.30748/nitps.2024.54.09>

4. Борисенко О.В., Залевський Г.С. Електродинамічна модель плоскої фазованої антенної решітки радіолокаційної станції метрового діапазону хвиль. Системи озброєння і військова техніка. 2024. № 3(79). С. 42-53. <https://doi.org/10.30748/soivt.2024.79.05>.

5. Борисенко О. В., Залевський Г. С. Модель сигналу, відбитого крилатою ракетою, на виході антенної решітки РЛС метрового діапазону хвиль. Системи обробки інформації. 2025. № 2(181). С. 68-77. <https://doi.org/10.30748/soi.2025.181.08>.

6. Мобільна радіолокаційна станція П-18 Будова, принцип дії систем та пристроїв. : Навч. посіб. / В. Тхоржевський та ін. Київ : ТОВ "Чайка-Всесвіт", 2006. 162 с.

Борисенко Олександр Васильович – ад’юнкт науково-організаційного відділу, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, вул. Сумська, 77/79, інд. 61023, e-mail: a.v.borisenko1980@ukr.net ORCID <https://orcid.org/0000-0003-0810-4616>

Залевський Геннадій Станіславович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, начальник кафедри, Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків, вул. Сумська, 77/79, інд. 61023, e-mail: gennadiy.zalevsky@gmail.com ORCID <https://orcid.org/0000-0002-6173-0571>

Oleksandr Borysenko – Post-Graduate of scientific and organizational department, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Sumska St., 77/79, Ind. 61023, e-mail: a.v.borisenko1980@ukr.net ORCID <https://orcid.org/0000-0003-0810-4616>

Zalevsky Gennady Stanislavovych – Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Head of department, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Sumska St., 77/79, Ind. 61023, e-mail: gennadiy.zalevsky@gmail.com ORCID <https://orcid.org/0000-0002-6173-0571>