

Щерба А. А., Мартиненко С. А., Красник Я. В.

ОСОБЛИВОСТІ НАВІГАЦІЇ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ TERPROM

Анотація: розглянуто принцип дії та функціональні особливості навігаційної системи TERPROM. Проведено SWOT-аналіз системи, порівняння з технологіями TERCOM і DSMAC, а також визначено ключові напрями протидії ракетам, оснащеним TERPROM.

Ключові слова: TERPROM, DSMAC, TERCOM, навігаційна корекція, радіовисотомір.

Abstract: the principle of operation and functional features of the TERPROM navigation system. A SWOT analysis of the system is carried out, a comparison with TERCOM and DSMAC technologies is made, and key areas of counteraction to missiles equipped with TERPROM are also identified.

Keywords: TERPROM, DSMAC, TERCOM, GPWS, navigation correction, radio altimeter.

В умовах насиченого протиповітряного захисту та активної радіоелектронної боротьби (РЕБ), яка спрямована на придушення супутникових систем (GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou), критично зростає значення автономних та стійких до завад навігаційних систем [1]. Однією з найбільш передових і надійних технологій цього типу є TERPROM.

TERPROM (TERrain PROfile Matching – зіставлення з профілем рельєфу) – це сучасна військова навігаційна система, яка забезпечує автономну корекцію інерціальної навігаційної системи (ІНС) шляхом зіставлення виміряного профілю висот із бортовою цифровою картою. Вона забезпечує ракеті не лише точність, але й високу скритність завдяки польоту на надмалих висотах, огинаючи рельєф місцевості [2].

Принцип дії та механізм корекції:

збір даних: під час польоту ракета летить на низькій висоті, а її радіовисотомір постійно вимірює одномірний профіль висот над землею;

зіставлення (Matching): отриманий профіль порівнюється з цифровою картою висот (DEM – Digital Elevation Model) маршруту. Алгоритм TERPROM є більш досконалим, ніж у TERCOM, і шукає найкраще співпадіння виміряного профілю з унікальним "відбитком" рельєфу на карті;

автономна корекція: на основі унікальних "відбитків" рельєфу система обчислює точне місцеположення і використовує його для коригування накопиченої помилки ІНС;

додаткові функції: TERPROM часто інтегрується як система попередження про наближення до землі та перешкоди (GPWS – Ground Proximity Warning System), що гарантує безпечний і максимально низький політ.

TERPROM є ключовим елементом навігаційного комплексу крилатих ракет (Storm Shadow, SCALP-EG, SOM), а також широко застосовується на тактичній авіації (F-16, Eurofighter Typhoon) для польотів на низькій висоті.

Таблиця 1 – SWOT-аналіз системи TERPROM

Критерій	Переваги	Недоліки
Стійкість	Висока стійкість до РЕБ, оскільки корекція відбувається автономно на основі радіовисотоміра, а не зовнішніх радіосигналів	Чутливість до рельєфу: неефективна у районах з одноманітним рельєфом, де недостатньо унікальних даних для надійного зіставлення [3]
Скритість	Дозволяє наднизький політ із огинанням рельєфу ("обтікання" рельєфу), що значно ускладнює виявлення традиційними радарам	Вимоги до даних: потрібна точна, актуальна та деталізована цифрова карта висот (DEM) маршруту. Застарілі дані знижують ефективність
Точність	Високоточна корекція ІНС на маршевій ділянці в умовах складного рельєфу	Вартість: створення, оновлення та зберігання необхідних високоякісних DEM-даних є ресурсомістким процесом

Аналіз табл. 1 показує, що ключовим недоліком TERPROM, успадкованим від TERCOM, є залежність від контрасту рельєфу. Якщо місцевість пласка (наприклад, водна поверхня або широка рівнина), профіль висот є одноманітним. В таких умовах алгоритм не може надійно знайти унікальне співпадіння, що призводить до накопичення помилки ІНС та змушує ракету тимчасово покладатися на супутниковий сигнал (якщо він доступний) або зменшує загальну точність [4].

TERPROM є еволюційним розвитком TERCOM, а DSMAC (Digital Scene-Matching Area Correlator) виступає як комплементарна система для фінальної ділянки польоту.

Таблиця 2 – Порівняльний аналіз: TERPROM, TERCOM та DSMAC

Технологія	TERCOM	TERPROM	DSMAC
Тип даних	Профіль висот (виміри радіовисотоміра)	Профіль висот (виміри радіовисотоміра)	Двовимірне зображення (оптичні або радарні дані)
Основна роль	Маршева корекція на низькій висоті	Маршева корекція, огинання рельєфу та безпека польоту (GPWS)	Надвисокоточне термінальне наведення
Стійкість до РЕБ	Менш вразлива до глушіння, ніж GPS	Висока стійкість, автономний принцип роботи	Найвища стійкість до електронних завад, оскільки базується на оптичних даних
Кінцева точність	Висока на марші	Висока на марші	Надзвичайна точність (до декількох метрів)

Порівняльний аналіз табл. 2 розкриває ключові відмінності TERPROM:

у порівнянні з TERCOM: TERPROM використовує більш досконалі алгоритми, що підвищує надійність зіставлення профілю; це, по суті, друге покоління навігації за рельєфом;

у порівнянні з DSMAC: ці системи не є конкурентами, а працюють послідовно в рамках однієї ракети (наприклад, Tomahawk); TERPROM забезпечує скритність та корекцію на марші на основі висотних даних, тоді як DSMAC використовує візуальні характеристики місцевості, порівнюючи фотографію цілі з бортовим еталонним зображенням, щоб забезпечити мінімальну помилку (до декількох метрів) на фінальному етапі; DSMAC є менш вразливою до електронних завад, оскільки базується на оптичних даних [5].

Стійкість TERPROM до РЕБ означає, що протидія має бути зосереджена не лише на придушенні супутникового сигналу, а й на дезінформації ключового сенсора TERPROM – радіовисотоміра. Для боротьби необхідний багатоплановий та комплексний підхід.

Основними напрямками протидії ракетам з TERPROM є:

1. Радіоелектронна боротьба:

- глушіння/спотворення радіовисотомірів: це найбільш прямий і ефективний спосіб боротьби з TERPROM. Якщо радіовисотомір видає хибні дані, система не зможе знайти збіг з картою, припинить коригувати ІНС, що призведе до швидкого накопичення помилки та втрати курсу;

- глушіння GPS є вторинним, оскільки TERPROM сам по собі є стійким до нього.

2. Дезінформація навігаційних систем:

- створення штучних змін рельєфу: оскільки TERPROM залежить від відповідності фактичного профілю карті, створення штучних перешкод або маскування природних рельєфних "відбитків" на ключових ділянках маршруту може спотворити навігаційні дані, спричиняючи помилку у визначенні місця;

- дезінформація карт: впровадження скомпрометованих карт висот у бази даних противника.

3. Розвиток систем раннього виявлення:

- багатопланові радарні мережі: ракети TERPROM летять у зоні "радарної тіні" рельєфу. Для їх виявлення критично важливі радары з довгим хвильовим діапазоном та багатопланові

мережі низьковисотних/мобільних радарів, а також теплові/ІЧ-сенсори, що працюють за межами прямої видимості.

4. Протиракетна оборона

- мобільні ЗРК та комплекси малої дальності: низький профіль польоту зменшує час на реакцію. Для ефективного перехоплення необхідні ЗРК з малою затримкою реакції та високою мобільністю ("Patriot", "Iron Dome").

Таким чином, TERPROM є високотехнологічною навігаційною системою, яка забезпечує автономну корекцію ІНС, скритність та точність польоту в умовах складного рельєфу. Основною вразливістю системи є залежність від контрастності рельєфу та точності DEM-карт. Ефективна протидія TERPROM потребує багаторівневого підходу: РЕБ проти радіовисотоміра, дезінформація рельєфу, розвиток систем раннього виявлення та мобільних ЗРК. Врахування особливостей TERPROM є критично важливим для планування оборони та модернізації засобів виявлення і перехоплення високоточних ракет.

Список використаних джерел:

1. Robins, Alan J. Recent Developments in the TERPROM Integrated Navigation System, *Proceedings of the 44th Annual Meeting of The Institute of Navigation*, Annapolis, Maryland, June 1988, pp. 58-66.

2. Cowie M., Wilkinson N. The TERPROM Digital Terrain System. *Journal of Aerospace Sciences & Technologies*. 2009. Vol. 61 (1). P. 259–270.

3. Навігація за рельєфом (ракетна зброя). URL: <https://www.collinsaerospace.com/> (дата звернення: 05.11.2025).

4. Щерба А.А. Особливості навігації за технологією TERCOM. *Актуальні проблеми діяльності складових сектору безпеки і оборони* : тези доп. всеукр. наук.-пр. конф., 24 жовт. 2024 р., Харків : Вид-во НАНУ, 2024. С. 523–525.

5. Щерба А.А. Особливості навігації за технологією DSMAC. *Спільні дії військових формувань і правоохоронних органів держави* : зб. тез доп. VI міжн. наук.-пр. конф., 18 жовт. 2024 р., Одеса : Вид-во ВА, 2024. С. 215-217.

Щерба Андрій Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент, провідний науковий співробітник науково-дослідного відділу (ракетних військ та артилерії) Наукового центру Сухопутних військ Національної академії сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів, e-mail shch_ay@ukr.net, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-4696-3780>

Мартиненко Сергій Анатолійович – начальник науково-дослідного відділу (ракетних військ та артилерії) Наукового центру Сухопутних військ Національної академії сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів, e-mail sam2604@ukr.net, ORCID <https://orcid.org/0000-0003-3790-2756>

Красник Ярослав Васильович – старший науковий співробітник науково-дослідного відділу (ракетних військ та артилерії) Наукового центру сухопутних військ Національної академії сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів, e-mail rao.nz.sv.lviv@i.ua, ORCID <https://orcid.org/0000-0001-9872-3984>

Shcherba Andriy Anatoliyovych – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher of the Army Scientific Center of the Hetman Petro Sahaidachny National Army Academy, Lviv, e-mail shch_ay@ukr.net, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-4696-3780>

Martynenko Serhiy Anatoliyovych – Head of the Research Department (Missile Forces and Artillery) of the Army Scientific Center of the Hetman Petro Sahaidachny National Army Academy, Lviv, e-mail sam2604@ukr.net, ORCID <https://orcid.org/0000-0003-3790-2756>

Krasnyk Yaroslav Vasyliovych – Senior of the Research Department (Missile Forces and Artillery) of the Army Scientific Center of the Hetman Petro Sahaidachny National Army Academy, Lviv, e-mail rao.nz.sv.lviv@i.ua, ORCID <https://orcid.org/0000-0001-9872-3984>