

УДК 681.396.96:681.32

В.Д. Карлов¹, К.П. Квіткін¹, Д.В. Карлов¹, О.В. Струцинський²¹ Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків² В/ч А0780, Львів

ВИКОРИСТАННЯ ПІДВЕДЕНИХ РАДІОХВИЛЕВОДІВ ДЛЯ ЗБІЛЬШЕННЯ ДАЛЬНОСТІ ВИЯВЛЕННЯ МАЛОВИСОТНИХ ЦІЛЕЙ НАД МОРЕМ

Сформульовані умови "живлення" підведених тропосферних радіохвильоводів над морем енергією РЛС приморського базування. Наведено співвідношення, що дозволяють для конкретних гідрометеорологічних умов в приморському районі отримати дані про дислокацію РЛС, які забезпечують підвищення дальності виявлення низьколітаючих цілей над морською поверхнею, сформульований метод, що дозволяє збільшити дальність виявлення низьколітаючих цілей з використанням РЛС приморського базування.

Ключові слова: тропосферний радіохвильовід, поширення радіохвиль, низьколітаюча ціль, РЛС приморського базування.

Вступ

Постановка проблеми, аналіз літератури. Одним із завдань, що вирішується сучасною радіолокацією, особливо для держав, кордони яких проходять по морях, є збільшення дальності виявлення маловисотних цілей. Це обумовлено тим, що дальність прямої видимості маловисотних цілей над морем в умовах рівнинного узбережжя не перевищує декілька десятків кілометрів, що не дозволяє привести в бойову готовність засоби знищення цих цілей.

У зв'язку з цим актуальною є задача пошуку шляхів збільшення дальності виявлення цілей на основі використання нетрадиційних методів, до яких можна віднести методи, побудовані на використанні відбиття електромагнітних хвиль на неоднорідностях тропосфери [1], включаючи явище далекого тропосферного поширення радіохвиль [2], а також поширення в тропосферному радіохвильоводі [3]. Як показано в [3], найбільш ефективно використання тропосферних радіохвильоводів можливе при локації цілей над морською поверхнею. При цьому, як обґрунтовується в [2, 3], найбільш ефективно використання для локації цілей забезпечується при знаходженні цілі в приповерхневому радіохвильоводі, висота якого не перевищувала від одного до двох десятків метрів.

Разом з тим, як показано в [4 – 6], у низці випадків цілі над морською поверхнею лоціювалися на висотах в кілька сотень метрів. На наш погляд це можливо шляхом поширення електромагнітних хвиль у підведених радіохвильоводах. Однак, в теперішній час у відомій літературі методологія вибору позицій радіолокаційних систем, що лоцюють цілі завдяки захопленню тропосферним радіохвильоводом електромагнітної енергії, тобто з використанням механізму поширення радіохвиль у підведених радіохвильоводах не розглядалася. Дана стаття призначена для заповнення цієї прогалини.

Мета роботи: сформулювати метод збільшення дальності виявлення низьколітаючих цілей радіотехнічними системами приморського базування на основі використання явища поширення радіохвиль у підведених радіохвильоводах, існуючих над морською поверхнею.

Основна частина

На поширення радіохвиль над морською поверхнею, як обґрунтовано в [1, 2], основний вплив роблять електричні параметри тропосфери вздовж траси локації. Для визначення факту існування радіохвильоводів на практиці використовують [1, 2, 7] модифікований індекс заломлення (M).

Приклади $M(z)$ -профілів наведені на рис. 1 [2, 3, 7]. На $M(z)$ -профілях (рис. 1) стрілками відзначені ділянки, на яких значення $M(z)$ убувають з висотою, що вказує на можливість виникнення на цих ділянках тропосферних радіохвильоводів.

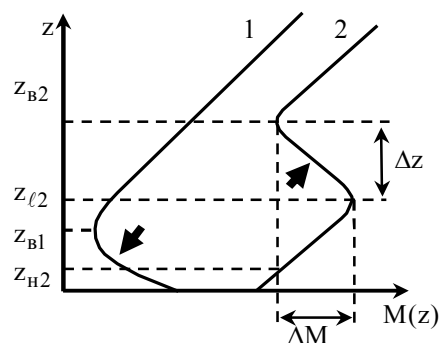


Рис. 1. Приклад висотних M -профілів

Відповідно до [2, 3, 7] верхньою межею тропосферного радіохвильоводу вважають висоту z_b , на якій $dM/dz = 0$, нижньою межею – висоту z_h , на якій $M(z_h) = M(z_b)$. Якщо $z_h = 0$ або такої z_h , для якої

виконується умова $M(z_n) = M(z_b)$, не існує (рис. 1, крива 1), то хвилевід називають приводним. Якщо $z_n > 0$, то хвилевід класифікується як підведений (рис. 1, крива 2).

Товщиною шару інверсії (М-інверсії) називають величину (Δz), в межах якої $dM/dz < 0$.

Інтенсивність тропосферного радіохвелеводу (ΔM) визначають за формулою:

$$\Delta M = M(z_\ell) - M(z_b), \quad (1)$$

де $z_\ell = z_b - \Delta z$.

За даними, опублікованими в [8], характерними, стосовно до акваторії Чорного і Азовського морів, значеннями параметрів підведених радіохвелеводів були $z_b \sim 200-3000$ м, $\Delta z \sim 100-300$ м, $\Delta M \sim 10-30$ N-одиниць.

В [6, 8] був розроблений метод, що дає можливість оцінити віддалення РЛС від межі суша-море, при якому, в конкретних метеорологічних умовах, відбувається "живлення" тропосферних хвелеводних каналів електромагнітною енергією над морською поверхнею.

Звичайно, якщо помістити джерело випромінювання в тропосферний радіохвилевід, то з точки зору загальної теорії, його "живлення" буде найбільш ефективним. Але, як показують результати досліджень [4 – 6], в районі Чорного моря верхня межа тропосферного хвелеводу не постійна, про це свідчать і експериментальні дані, наведені в [8]. Однак, в [4 – 6] аналіз проводився в основному стосовно до випадку сферично шаруватого середовища розповсюдження радіохвиль.

Разом з тим, результати експериментальних досліджень, опубліковані в роботах [8, 9], свідчать про те, що у випадку, коли траса локації проходить в районі берегової межі, то для неї характерна наявність горизонтальних градієнтів показника заломлення, які необхідно враховувати.

У роботі [8] отримано вираз для приведенного коефіцієнта заломлення $N(x, z)$ (x, z – горизонтальна і вертикальна координата, причому (x) направлено перпендикулярно межі "суша-море") у вигляді:

$$N(x, z) = N_0(x) + \Phi(x, z) + g_N \cdot z, \quad (2)$$

де g_N – вертикальний градієнт наведеного коефіцієнта заломлення (N) для стандартної тропосфери ($g_N = -0.04 \text{ м}^{-1}$);

$$N_0(x) = \begin{cases} N_0, & \text{при } x = 0; \\ N_0 + \Delta N, & \text{при } x > 0; \end{cases}$$

N_0 – початкове значення індексу заломлення над сушею;

ΔN – стрибок наведеного коефіцієнта заломлення на межі "суша-море";

$$\begin{aligned} \Phi(x, z) = & \\ = & -\Delta N \cdot \sum_{v=0}^{\infty} \frac{2}{\pi(v+0,5)} \times \\ & \times \exp \left\{ -\frac{x \cdot p(z)}{z_1^2 \cdot u} \cdot \pi^2 (v+0,5)^2 \right\} \cdot \sin \left[\frac{z}{z_1} \cdot \pi(v+0,5) \right], \end{aligned}$$

де $p(z)$ – коефіцієнт турбулентної дифузії. Відповідно до [8], при розрахунках наведеного коефіцієнта заломлення, z_1 обирають рівним 1000 метрів.

Результати експериментальних досліджень [4-6] показали, що у випадку, коли в тропосфері виникають підведені інверсії температури виникають підведені радіохвелеводи, з'являється залежність коефіцієнта турбулентної дифузії від висоти.

На практиці цю залежність враховують співвідношенням [2, 9]:

$$p(z) = p_{\min} + p_0 \left\{ 1 - \exp \left[-(z - z_{\text{инв}})^2 \right] \right\},$$

де p_{\min} – мінімальне значення коефіцієнта турбулентної дифузії (визначається молекулярною дифузиею, для спрощення при моделюванні була обрана мінімальна швидкість вітру $u = 0,1 \text{ м/с}$, відповідно $p_{\min} = 0,1 \text{ м/с}$ [9]);

p_0 – значення коефіцієнта турбулентної дифузії, вимірюваної в приземному шарі;

$z_{\text{инв}}$ – висота знаходження інверсії температури.

В якості вихідних даних були використані результати експериментальних досліджень, отримані в Азово-Чорноморському районі. Зокрема, як впливає з даних [9], вітер в ранкові години в приморських районах дме з берега на море, а у вечірні – з моря на берег. Швидкість вітру u змінювалася від $0,1 \text{ м/с}$ (майже повний штиль) до 10 м/с (стігий бриз).

Стрибок наведеного коефіцієнта заломлення ΔN на кордоні суша-море обирався рівним 30 N-одиниць, що відповідає даним, наведеним у [3, 7] і зазвичай використовується при розрахунку параметрів тропосфери на кордоні суша-море. Величина $p_0 = 60 \text{ м}^2/\text{с}$, $N(z)$ для $u = 0,5 \text{ м/с}$ і $u = 3 \text{ м/с}$ для прикладу наведені на рис. 2, 3.

З наведених на рис. 2, 3 залежностей видно, що при швидкості вітру $u = 0,5 \text{ м/с}$ на висоті 600 м за рахунок турбулентної дифузії виникає підведений радіохвилевід.

З підвищенням швидкості вітру інтенсивність підведеного хвелеводу зменшується.

Оскільки дані на рис. 2, 3 наведені через 400 метрів, то видно, що зі зменшенням швидкості вітру збільшується і відстань від берегової лінії, на якому можуть знаходитися РЛС, енергія яких потрапить в приповерхневий радіохвилевід.

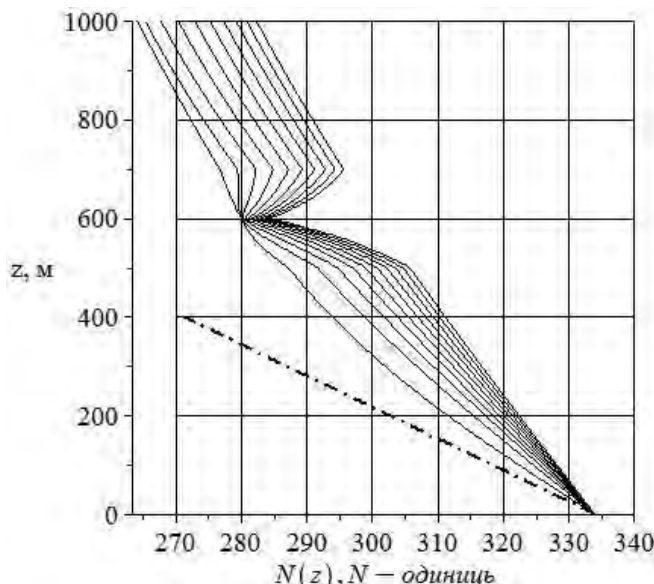


Рис. 2. Результати моделювання $N(z)$ з врахуванням турбулентної дифузії при швидкості вітру $u = 0,5$ м/с

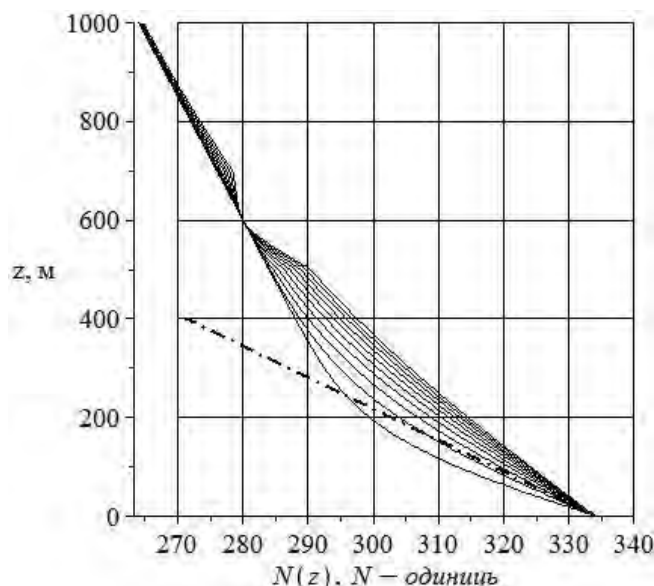


Рис. 3. Результати моделювання $N(z)$ з врахуванням турбулентної дифузії при швидкості вітру $u = 3$ м/с

Дані, наведені на рис. 2, 3, дозволяють розраховувати дальність від берегової лінії, при розміщенні РЛС в межах якої, для неї виконується умова

$$dN/dz < -0,157 \text{ м}^{-1},$$

а значить, виконується умова існування підведеного радіохвильоводу, потрапивши в який, енергія буде поширюватися по законам хвильоводного механізму.

Наприклад, з рис. 2 видно, що при швидкості вітру $u = 0,5$ м/с умові "живлення" задовольняють РЛС, віддалені від берегової лінії до 1600 метрів. При цьому, як обґрунтовано в [4 – 6], дальність виявлення цілей з ЕПР близько 1 м^2 на РЛС 35Ж6 може досягати 250 км.

Підводячи підсумок вищесказаного, можна сформулювати метод збільшення дальності РЛС приморського базування в такому вигляді:

1. В районі берегової лінії здійснюють вимірювання швидкості вітру та визначають коефіцієнт турбулентної дифузії.

2. За номограмами наведеного показника заломлення $N(x, z)$ для конкретних значень швидкості вітру і коефіцієнту турбулентної дифузії визначають максимальне віддалення РЛС від берегової межі, при якому виникло "живлення" тропосферних радіохвильоводів.

3. У системі рознесених по узбережжю РЛС, визначають ті РЛС, віддалення яких від берегової лінії буде менше або дорівнює максимальному від-

даленню, розрахованому за номограмою, при якому забезпечується "живлення" тропосферних радіохвильоводів.

4. В якості ознак здійснення факту "живлення" приповерхневого і підведеного радіохвильоводів використовують наявність сигналів "янгол-луна" на дальностях, що перевищують пряму видимість, а також появи сигналів, відбитих від протилежного місцю дислокації РЛС берега.

5. Виходячи з моделі РЛС, що задовольняє умові "живлення" тропосферного радіохвильоводу, оцінюють дальність локації цілі із заданою ЕПР.

Висновки

При оцінці можливості існування підведених над морською поверхнею радіохвильоводів найбільш ефективним методом є використання наведеного показника заломлення.

Отримання конкретних його значень в різних умовах гідрометеорологічної обстановки в приморському районі дозволяє використовувати сформульований в роботі метод збільшення дальності виявлення маловисотних цілей над морською поверхнею.

Список літератури

1. Гоноровский В.М. *Распространение волн в турбулентной атмосфере [Текст] / В.М. Гоноровский – М.: Наука, 1978. – 272 с.*
2. Чёрный Ф.Б. *Распространение радиоволн [Текст] / Ф.Б. Чёрный – М.: Сов. радио, 1972. – 249 с.*
3. Лобкова Л.М. *Распространение радиоволн над морской поверхностью [Текст] / Л.М. Лобкова – М.: Радио и связь, 1991. – 255 с.*
4. Мисайлов В.Л. *Обнаружение маловысотных целей на загоризонтных дальностях над морским тропосферным волноводом [Текст] / В.Л. Мисайлов,*

Н.Н. Петрушенко // Радиотехника: Всеукраинский межвед. научно-техн. сборник. – 2004. – Вып. 137. – С. 113-117.

5. *Оценка возможностей обнаружения целей при наличии морского тропосферного волновода [Текст] / В.Д. Карлов, Н.Н. Петрушенко, К.П. Квиткин, В.В. Челпанов // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2010. – Вып. 6(87). – С. 91-94.*

6. *Особенности измерения азимута маловисотной цели, что лоцируется за пределами дальности прямой видимости [Текст] / М.М. Петрушенко, В.Д. Карлов, К.П. Квиткин., В.Г. Чернов // Дев'ята наукова конференція Харківського університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба "Новітні технології – для захисту повітряного простору": тези доповідей, 17 – 18 квітня 2013 року. – Х.: ХУПС, 2013. – С. 284.*

7. *Распространение ультракоротких радиоволн над морской поверхностью [Текст] / С.Я. Брауде, В.К. Иванов, И.Е. Островский, И.Н. Фукс // Радиофизика и радиоастрономия. – 1996. – Т. 1, № 2. – С. 171-186.*

8. *Модельне представлення тропосферних радіохвильоводів над морем [Текст] / В.Д. Карлов, М.М. Петрушенко., О.Я. Луковський., К.П. Квиткин, Е.В. Лукашук // Системи озброєння і військова техніка. – Х.: ХУПС, 2009. – Вып. 1(17). – С. 99-102.*

9. *Карлов В.Д. Результаты экспериментальных исследований локации вертолетов, что здійснюють політ на малих висотах над морем [Текст] / В.Д. Карлов, Г.В. Певцов, Д.В. Карлов, В.Л. Мисайлов // Матеріали третьої міжнародної НТК. "Інформаційні проблеми теорії акустичних, радіоелектронних і телекомунікаційних систем УРСТ-2014" НТУ "ХПІ". – Х.: НТУ "ХПІ", 2014. – С. 35.*

Надійшла до редколегії 22.12.2015

Рецензент: д-р техн наук, проф. Л.Ф. Купченко, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИПОДНЯТЫХ РАДИОВОЛНОВОДОВ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ МАЛОВЫСОТНЫХ ЦЕЛЕЙ НАД МОРЕМ

V.D. Karlov, K.P. Kvitkin, D.V. Karlov, O.V. Strutsinskiy

Сформулированы условия запитки приподнятых тропосферных радиоволноводов над морем энергией РЛС приморского базирования. Приведены соотношения, позволяющие для конкретных гидрометеорологических условий в приморском районе получить данные о дислокации РЛС, обеспечивающих повышение дальности обнаружения низколетящих целей над морской поверхностью, сформулирован метод, позволяющий увеличить дальность обнаружения низколетящих целей с использованием РЛС приморского базирования.

Ключевые слова: тропосферный радиоволновод, распространение радиоволн, низколетящая цель, РЛС приморского базирования.

THE ELEVATED RADIO WAVEGUIDES TO INCREASE THE RANGE LOW-ALTITUDE TARGETS DETECTION OVER THE SEA

V.D. Karlov, K.P. Kvitkin, D.V. Karlov, O.V. Strutsinskiy

The conditions of elevated tropospheric radio waveguides powering over the sea energy radar seaside home. Given ratio, allowing for specific meteorological conditions in the coastal area to obtain data on the deployment of the radar that enhance the detection range of low-flying targets over the sea surface, formulated a method to increase the range of detection of low-flying targets using radar seaside home.

Keywords: tropospheric radio waveguides, propagation, low-flying target, radar seaside home.