

УДК 621.396.967.15

В.Д. Карлов<sup>1</sup>, Н.Н. Петрушенко<sup>2</sup>, О.Я. Луковський<sup>1</sup>, Е.В. Лукашук<sup>3</sup>, К.П. Квіткін<sup>1</sup><sup>1</sup>Харьківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків<sup>2</sup>Командування Повітряних Сил Збройних Сил України, Вінниця<sup>3</sup>ВАТ «АТ Науково-дослідний інститут радіотехнічних вимірювань», Харків**МОДЕЛЬНЕ ПРЕДСТАВЛЕННЯ ТРОПОСФЕРНИХ РАДІОХВИЛЕВОДІВ НАД МОРЕМ**

*У статті розглянуті теоретичні основи існування тропосферних радіохвилеводів над морем. На основі аналізу відомою в теорії розповсюдження радіохвиль літератури показав, що в практиці радіолокації при вивченні процесів, що відбуваються в тропосферних радіохвилеводах над морем найбільш інформативним є модифікований індекс заломлення. Проілюстрована його залежність від гідрометеорологічних параметрів тропосфери і на основі аналізу модельного його уявлення проведена класифікація тропосферних радіохвилеводів, утворення яких можливо над морем. Приводяться параметри радіохвилеводів, що найбільш часто виникають над морем.*

**Ключові слова:** приповерхневий, підведений радіохвилевод; коефіцієнт і індекс заломлення.

**Вступ**

**Постановка проблеми:** в даний час широкого поширення набули станції супутникового зв'язку (НССС), що було обумовлене збільшенням кількості штучних супутників Землі, з кожним з яких необхідно підтримувати радіозв'язок з метою коректування параметрів орбіти і прийому телеметричної інформації. Оскільки, як відомо, НССС дислоковані на побережжі Чорного моря, то в даному випадку необхідно розглядати питання особливості роботи таких систем при дислокації їх на побережжі моря. А як відомо на роботу систем, а саме НССС, істотний вплив надає умови розповсюдження радіохвиль (РРВ) над морем.

При цьому умови функціонування НССС істотно залежать від наявності або відсутності тропосферних радіохвилеводів, оскільки при їх наявності істотно змінюється завадовий фон роботи станції супутникового зв'язку.

**Мета статті:** розглянути можливість існування тропосферних радіохвилеводів над морем.

**Основна частина**

У теорії РРВ властивості середовища розповсюдження характеризують електричними параметрами [1 – 9]. Як такі параметри розглядають діелектричну ( $\epsilon$ ) і магнітну ( $\mu$ ) проникність середовища. У практиці радіолокації найбільше застосування отримав [9] коефіцієнт заломлення  $n = \sqrt{\mu \cdot \epsilon}$ . Стосовно розгляду тропосферних радіохвилеводів над морем приймають  $\mu \approx 1$  [9] і коефіцієнт заломлення розраховують по формулі  $n = \sqrt{\epsilon}$ .

У відомих роботах під моделлю тропосферних радіохвилеводів над морем [1, 2], розуміють просторово-часову залежність коефіцієнта заломлення  $n(\vec{r}, t)$  від координат  $\vec{r}(x, y, z)$  і часу  $t$ . Просторово-часові зміни коефіцієнта заломлення  $n(\vec{r}, t)$  можуть бути регулярними і нерегулярними. Природа регулярних і нерегулярних змін коефіцієнта заломлення досить детально вивчена [2, 9]. У [2, 9] відмічено, що прогнозування умов РРВ в тропосферних

радіохвильоводах над морем в значній мірі визначається повнотою математичного опису можливих змін коефіцієнта заломлення  $n(\vec{r}, t)$ .

Враховуючи, що просторово-часова структура коефіцієнта заломлення залежить від температури, тиску ( $p$ ) і вологості ( $e$ ) повітря в приводному шарі тропосфери, а ці параметри є випадковими, то коефіцієнт заломлення утворює в загальному випадку випадкове поле, просторово-часові масштаби змін якого в межах приводного шару тропосфери можуть відповідати інтервалу від  $10^{-8}$  см до  $10^{-1}$  см і від  $10^{-6}$  с до  $10^{-1}$  с [1]. Дослідження частотного спектру турбулентних флуктуацій метеопараметрів ( $T$ ,  $p$ ,  $e$ , швидкості вітру  $u$ ) над морською поверхнею, результати яких приведені в [1], свідчать про те, що енергетичний спектр  $n(\vec{r}, t)$  має три характерні області. До першої області віднесені великомасштабні квазидвовимірні флуктуації на частотах  $f \sim 10^{-6} - 10^{-4}$  Гц. Друга область з низькою інтенсивністю (названа мезометеорологічним мінімумом) містить флуктуації, на частотах  $f \sim 10^{-4} - 10^{-3}$  Гц. До третьої області віднесені дрібномасштабні флуктуації на частотах  $f$  вище  $10^{-3}$  Гц.

З математичної точки зору завдання про РРВ в тропосферному радіохвильоводі над морем повинне розглядатися як завдання РРВ в неоднорідному середовищі і зводиться до вирішення стохастического хвильового рівняння з діелектричною проникністю  $\varepsilon(\vec{r}, t) = n^2(\vec{r}, t)$ . З прийнятною для інженерної практики точністю вирішення рівняння шукають в рамках квазістационарного наближення. При цьому діелектричну проникність представляють у вигляді:

$$\varepsilon(\vec{r}, t) = \varepsilon_0(z) + \delta\varepsilon(\vec{r}, t),$$

де  $\varepsilon_0(z)$  – середня характеристика діелектричної проникності;  $\delta\varepsilon(\vec{r}, t)$  – випадкова складова діелектричної проникності.

В рамках такого уявлення  $\varepsilon_0(z)$  описує великомасштабні структури, що є однорідними в горизонтальній площині і що практично не змінюються за час, протягом якого здійснюється вимірювання сигналу. Складова  $\delta\varepsilon(\vec{r}, t)$  характеризує дрібномасштабні структури. Відповідно до [1] складова  $\varepsilon_0(z)$  є "середньою" характеристикою діелектричної проникності тропосфери, при цьому усереднення проведено по ансамблю реалізацій. Набутого усередненого значення  $\varepsilon_0(z)$  є функцією висоти над поверхнею морить.

Оскільки значення коефіцієнта заломлення над поверхнею моря перевищує одиницю на три десяти тисячні частки, в практиці радіолокації вводять замість ( $n$ ) приведений коефіцієнт заломлення, а при

оцінці хвильоводних властивостей тропосфери, використовують модифікований індекс заломлення ( $M$ ) і розглядають його зміни по висоті ( $z$ ) [1, 2, 9]:

$$M(z) = N(z) + 10^6 \cdot \frac{z}{a_3}, \quad (1)$$

де  $m$  – радіус Землі.

У практиці радіолокації співвідношення (1) пов'язують з гідрометеорологічними параметрами тропосфери і визначають співвідношенням [14]:

$$M(z) = \frac{78p}{T} + \frac{3,8 \cdot 10^5 \cdot e}{T^2} + 0,157 \cdot z, \quad (2)$$

У співвідношенні (2) параметри ( $e, p$ ) вимірюють в миллибарах, температуру ( $T$ ) – в градусах Кельвіна, а висоту ( $z$ ) – в метрах.

Відповідно до виду  $M$  – профілю проводиться класифікація умов РРВ [1, 2, 9, 11, 12]. Зокрема, коли на якому-небудь інтервалі висот тропосфери є область в якій, то в цій області [1, 2, 9, 11, 12] утворюється хвильовід. Відповідно до [1, 2, 9] основних параметрів що характеризують тропосферний радіохвильовід над морем є верхня і нижня межа, товщина (потужність) шаруючи інверсії і інтенсивність (величина  $M$ -інверсії) хвильоводу.

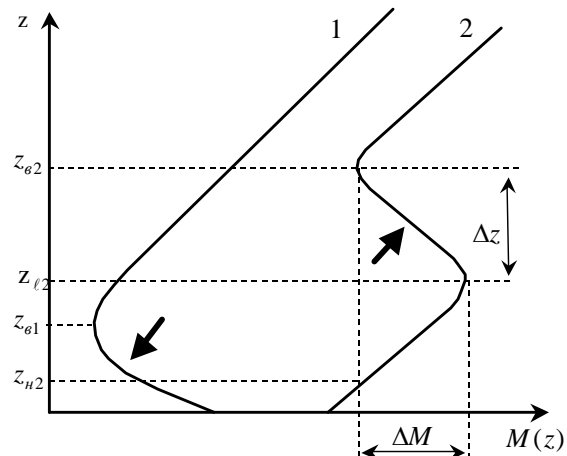


Рис. 1. Приклад висотних - профілів

Приклад  $M(z)$  профілів приведені на рис. 1. На  $M(z)$  профілях (рис. 1) стрілками відмічені ділянки, на яких значення  $M(z)$  убувають з висотою, що вказує на можливість виникнення на цих ділянках тропосферних радіохвильоводів. Відповідно до [1, 2, 9] верхньої межі тропосферного радіохвильоводу вважається висота, на якій  $dM/dz = 0$ . Нижньою межею – висота  $z_n$ , на якій  $M(z_n) = M(z_b)$ . Якщо  $z_n = 0$  або такий  $z_n$ , для якої виконується умова  $M(z_n) = M(z_b)$ , не існує (крива 1, на рис 1), то хвильовід називають приповерхневим. Якщо  $z_n > 0$ , то хвильовід класифікується як підведений (крива 2, на

рис 1). Завтовшки шаруючи інверсії (М-інверсії) називають величину ( $\Delta Z$ ), в межах якої  $dM/dz < 0$ .

Інтенсивність тропосферного радіохвильоводу ( $\Delta M$ ) визначають по формулі:

$$\Delta M = M(z_\ell) - M(z_B),$$

де  $z_\ell = z_B - \Delta z$ .

Стосовно розгляду питання РРВ над морською поверхнею найбільш важливим типом радіохвильовідів є приповерхневий радіохвильовід [1, 2]. Враховуючи, що з висотою гідрометеорологічні параметри тропосфери вбивають, приводний шар часто представляють [2] у вигляді стандартного (нормального) N – профілю, для якого характерне лінійне убавання температури величиною  $6,5^\circ\text{C}$  на один кілометр, при цьому градієнт індексу заломлення складе  $dN/dz = -4 \cdot 10^{-2} \text{ м}^{-1}$ . Оскільки в межах стандартного профілю  $dN/dz = \text{const}$ , то в теорії РРВ для такого середовища вводять поняття радіуса кривизни траєкторії розповсюдження радіохвиль ( $\rho$ ). Стосовно нормальної тропосфери  $\rho = 4a_3$  [13]. Введення  $\rho$  дозволяє звести завдання про РРВ в не-однорідному середовищі в приповерхневому шарі Землі радіусу  $a_3$  до завдання про прямолінійний РРВ, але в приповерхневому шарі Землі з ефективним радіусом  $a_3 = K \cdot a_3$ , де  $K$  – коефіцієнт, визначуваний із співвідношення:

$$K = [1 + a_3 \cdot (dn/dz)]^{-1}.$$

Стосовно нормальної атмосфери  $K = 4/3$ .

При аналізі РРВ в приводному шарі окремо розглядають випадок, коли  $dn/dz = -a_3^{-1}$ , який відповідає випадку "плоскої" Землі і визначає стан критичної рефракції, при якій  $\rho = a_3$ . У випадку, якщо  $dM/dz < 0$ , радіус кривизни  $\rho < a_3$  те говорять про надрефракції РРВ при якому розповсюдження рефракції переходить в розповсюдження по приповерхневому тропосферному радіохвильоводу [9]. Залежність модифікованого індексу заломлення від висоти  $M(z)$  в межах приповерхневого хвильоводу отримують методом прямих вимірювань гідрометеорологічних параметрів і розрахунку по формулі (2). При проведенні інженерних розрахунків гладку залежність, як показано в [10] можна замінити апроксимуючою ламаною, вписаною в "дійсну" висотну залежність (рис. 2).

Як показано в [10], помилка, що вноситься заміною гладкого профілю лінійно-ламаним, не перевищує помилок за рахунок погрішності визначення  $M(z)$  з даних метеорологічних вимірювань. Звідси витікає, що основними параметрами профілю  $M(z)$ , що визначають властивості приповерхневого тропосферного радіохвильоводу, є висота хвильоводу ( $z_B$ ), перепад значення  $M$  (М- дефіцит) і нахил  $M(z)$ .

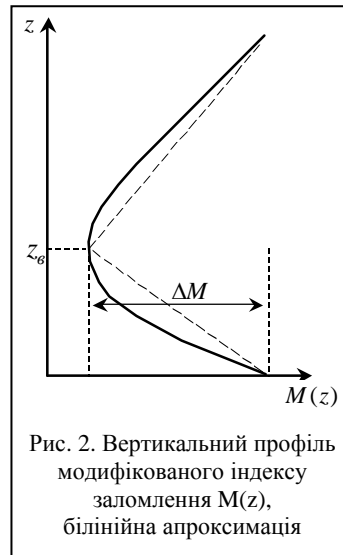


Рис. 2. Вертикальний профіль модифікованого індексу заломлення  $M(z)$ , білінійна апроксимація

Як наголошувалося в [1 – 5, 9] аномально високі рівні сигналів на значному видаленні від НССС при локації об'єктів над морською поверхнею вдається пояснити існуванням підведених тропосферних радіохвильовідів. По даним [4] дані радіохвильоводи фіксувалися на висотах від 200 метрів до 3000 метрів. Для опису процесу РРВ

в підведених тропосферних радіохвильоводах використовують модифікований індекс заломлення  $M(z)$  і обчислюють його по співвідношенню (2). Підведені радіохвильоводи характеризують висотою залягання ( $z_B$ ), завтовшки шаруючи з негативним градієнтом  $dM/dz < 0$  модифікованого індексу заломлення  $M(z)$ , визначеного як  $\Delta z = z_B - z_\ell$ , а також інтенсивністю хвильоводу  $\Delta M = M(z_\ell) - M(z_B)$ . По даним, опублікованими в [1, 5-7] характерними, стосовно акваторії Чорного моря, значеннями параметрами підведених радіохвильовідів являлись  $z_B \sim 200-3000$  метрів,  $\Delta z \sim 100-300$  метрів,  $\Delta M \sim 10-30N$ -одиниць.

## Висновки

Таким чином, при вивченні РРВ в тропосферних радіохвильоводах над морем найбільш інформативним є модифікований  $M$  індекс заломлення. У статті приведена інженерна формула його розрахунку з використанням метеопараметрів. На основі аналізу залежності від висоти модифікованого індексу заломлення проведена класифікація тропосферних радіохвильовідів на хвильовід приповерхневий і підведений.

## Список літератури

1. Кукушкин А.В. Загоризонтное распространение ультракоротких радиоволн над морем / А.В. Кукушкин, В.Д. Фрейлихер, И.М. Фукс // Известия вузов. Радиофизика, 1987. – Т. XXX. № 7. – С. 811-839.
2. Лобкова Л.М. Распространение радиоволн над морской поверхностью / Л.М. Лобкова. – М.: Радио и связь, 1991. – 255 с.
3. Исследование условий распространения радиоволн СВЧ диапазона в пограничном слое атмосферы над морской поверхностью с изменяющимися по дистанции метеопараметрами: отчёт о НИР «Торец-1» (заключительный). ИРЭ АН Украины. – Х., 1993. – 142 с.
4. Иванов В.К. Распространение УК радиоволн над морем: дис. ... д-ра. физ. мат. наук: 01.04.03. – Х.: ИРЭ АН Украины, 1994. – 201 с.
5. Исследование распространения радиоволн на морских трассах в диапазоне сантиметровых, децимет-

ровых и метровых волн: отчёт о НИР ИРЭ АН Украины; ГР № 81076089. – Х., 1985. – 135 с.

6. Фок В.А. Проблемы дифракции и распространения электромагнитных волн / В.А. Фок. – М.: Сов. радио, 1970. – 520 с.

7. Михайлов Н.Ф. Радиометеоро-логические исследования над морем / Н.Ф. Михайлов, А.В. Рыжков, Г.Г. Щукин. – Л.: Гидрометиздат, 1990. – 207 с.

8. Зернов Н.Н. Взаимодействие внешних мод в трёхмерном нерегулярном волноводном слое / Н.Н. Зернов // Радиотехника и электроника, 1990. – Т. 35, № 6. – С. 1182-1189.

9. Чёрный Ф.Б. Распространение радиоволн / Ф.Б. Чёрный. – М.: Сов. радио, 1972. – 249 с.

10. Брауд С.Я. Распространение ультракоротких радиоволн над морской поверхностью / С.Я. Брауде, В.К. Иванов, И.Е. Островский, И.Н. Фукс // Радиопизика и радиоастрономия. – 1996. – Т. 1, № 2. – С. 171-186.

11. Мисайлов В.Л., Петрушенко Н.Н. Обнаружение маловисотных целей на загоризонтных дальностях над морским тропосферным волноводом / В.Л. Мисайлов, Н.Н. Петрушенко // Радиотехника. – 2004. – Вып. 137. – С. 113-117.

12. Диагностика распространения радиоволн над морской поверхностью методом радиопросвечивания сигналом с искусственного спутника Земли / А.А. Коваль, Н.Н. Петрушенко, Ю.И. Рафальский, О.В. Тесленко // Сб. науч. праць СВМІ. – 2003. – Вып. 3. – С. 68-74.

13. Максимова Н.Г. Современное состояние дистанционного зондирования атмосферного пограничного слоя с поверхности Земли // Радиотехника, 1998. – Вып. 10. – С. 43-57.

Надійшла до редколегії 11.03.2009

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.І. Карпенко, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

#### МОДЕЛЬНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ТРОПОСФЕРНЫХ РАДИОВОЛНОВОДОВ НАД МОРЕМ

В.Д. Карлов, Н.Н. Петрушенко, О.Я. Луковский, Е.В. Лукашук, К.П. Квиткин

В статье рассмотрены теоретические основы существования тропосферных радиоволноводов над морем. На основе анализа известной в теории распространения радиоволн литературы показано, что в практике радиолокации при изучении процессов, которые происходят в тропосферных радиоволноводах над морем, наиболее информативным есть модифицированный индекс преломления. Проиллюстрирована его зависимость от гидрометеорологических параметров тропосферы и на основе анализа его модельного представления проведена классификация тропосферных радиоволноводов, образование которых возможно над морем. Приводятся параметры радиоволноводов, которые наиболее часто возникают над морем.

**Ключевые слова:** приповерхностный, подведенный радиоволновод, коэффициент и индекс преломления.

#### MODELLING REPRESENTATION OF TROPOSPHERIC RADIOWAVE GUIDES ABOVE THE SEA

V.D. Karlov, N.N. Petrusenko, O.Ja. Lukovsky, H.V. Lukashuk, K.P. Kvitkin

In the article theoretical bases of existence of troposphere radiowaveguides are considered above a sea. On the basis of analysis in the theory of distribution of radio waves of literature it is rotined known, that in practice of radio-location at the study of processes, which take a place in troposphere radiowaveguides above a sea, most informing there is the modified index of refraction. His dependence is illustrated on the hydrometeorological parameters of troposphere and on the basis of analysis of his world-modeling classification of troposphere radiowaveguides formation of which possibly above a sea is conducted. Parameters over of radiowaveguides which most often arise up above a sea are brought.

**Keywords:** in-superficial, brought radiowaveguide, coefficient and index of refraction.