
УДК 621.396.96

В.Л. Місайлов

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ВИЯВЛЕННЯ ПОВІТРЯНИХ ОБ'ЄКТІВ У МОРСЬКОМУ ТРОПОСФЕРНОМУ ХВИЛЕВОДІ

Проведено оцінку впливу багатопроменевого поширення радіохвиль у тропосферних хвильоводах (ТХВ) над морською акваторією на показники якості виявлення повітряних об'єктів. Показано, що тропосферний хвильовод є каналом із завмираннями. Для визначення статистичних характеристик сигналу на вході приймального пристрою ТХВ представлений у вигляді еквівалентного багатополосника із випадковим передавальним коефіцієнтом. Отримано аналітичний вираз для щільності імовірності амплітуди радіолокаційного сигналу, відбитого від повітряного об'єкту у тропосферному хвильоводі над поверхнею моря, на вході приймального пристрою РЛС. Побудовані криві виявлення для такого сигналу.

Ключові слова: показники якості виявлення, тропосферний хвильовод, непрямолінійне поширення радіохвиль.

Вступ

Постановка проблеми. Як відомо, на роботу радіозасобів істотний вплив робить не тільки амплітуда прийнятого сигналу, але і його форма, а також статистичні характеристики [1].

Багатопроменеве поширення радіохвиль у тропосферних хвильоводах (ТХВ) призводить до зміни статистичних характеристик сигналів, що пройшли деяку відстань у ТХВ. А отже це впливає на показники якості виявлення повітряних об'єктів (ПО), що знаходяться у хвильоводі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Більшість досліджень, присвячених поширенню радіохвиль у ТХВ, зосереджено на визначенні коефіцієнту ослаблення вздовж радіотраси та його залежності від параметрів хвилеводу [2 – 6]. Експериментальні дані, які є до теперішнього часу, про статистичні характеристики сигналів, що пройшли деяку відстань в тропосферному хвилеводі, отримані лише для ТХВ випаровування [7 – 9]. Оцінка показників якості виявлення радіосигналів з урахуванням можливої зміни їх статистичних характеристик не проводилася.

Метою статті є оцінка впливу багатопроменевого поширення радіохвиль у ТХВ, які виникають над акваторією Чорного моря, на статистичні

характеристики вузькосмугових радіолокаційних сигналів та визначення показників якості виявлення ПО у ТХВ.

Модель ТХВ як елементу радіолокаційного каналу

Для визначення характеристик радіолокаційних сигналів, що пройшли деяку відстань у ТХВ, теоретичним шляхом можливо використати модель радіолокаційного каналу (РЛК) [10, 11], яка відображає процес перетворення сигналів на шляху від передавача РЛС до пристрою обробки.

Для визначення статистичних характеристик сигналів будемо використовувати дещо спрощену модель РЛК (рис. 1).

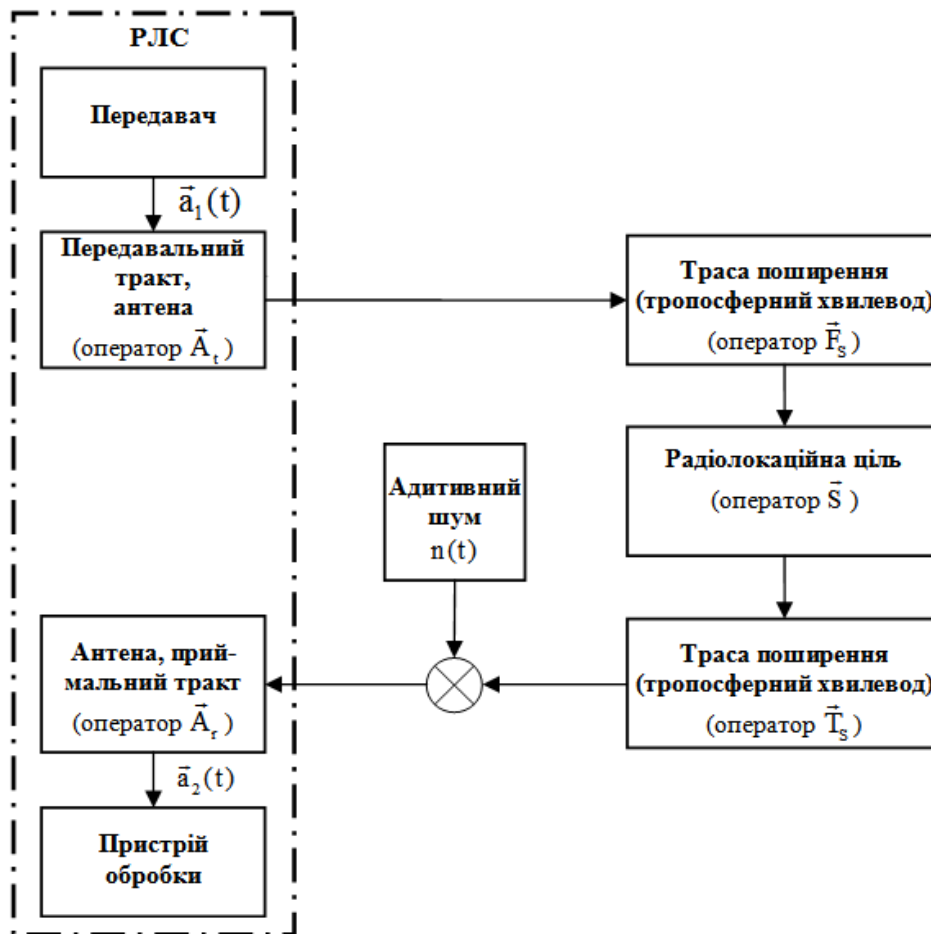


Рис. 1. Модель радіолокаційного каналу з урахуванням тропосферного хвилеводу

Звідки сигнал на вході пристрою обробки РЛС $\bar{a}_2(t)$ можна знайти як:

$$\bar{a}_2(t) = \bar{A}_r \left[\bar{T}_S \bar{S} \bar{F}_S \bar{A}_t \bar{a}_1(t) + n(t) \right], \quad (1)$$

де \bar{A}_t – оператор передавального тракту РЛС, що описує перетворення сигналу $\bar{a}_1(t)$ у випромінювану електромагнітну хвилю із заданою просторово-часовою і поляризаційною структурою; \bar{A}_r – опера-

тор, що характеризує властивості приймального тракту; \bar{F}_S і \bar{T}_S – оператори перетворення сигналів на трасах "передавач – ПО", "ПО – приймач" відповідно; \bar{S} – оператор ПО; $n(t)$ – адитивний шум.

Ми вважатимемо, що у РЛК відсутні активні завади і виявлення ПО буде відбуватись на фоні білого шуму.

Для визначення статистичних характеристик сигналів у ТХВ введемо додаткові спрощення.

Будемо вважати, що:

а) випромінюваний сигнал повністю відомий;
б) передача і прийом ведуться на одну антену,
тоді $\bar{A}_t = \bar{A}_r$;

в) параметри антени та приймально-передавального тракту не впливають на параметри сигналу, $\bar{A}_t = \bar{A}_r = 1$;

г) тривалість імпульсу і дальність дії РЛС такі,

д) що за час розповсюдження сигналу до ПО і назад параметри середовища не встигають істотно змінитися. У такому разі $\bar{F}_S = \bar{T}_S$.

З урахуванням зроблених допущень схема РЛС спроститься (рис. 2), а вираз (1) прийме вигляд:

$$\bar{a}_2(t) = \bar{F}_S \bar{S} \bar{F}_S \bar{a}_1(t) + n(t). \quad (2)$$

Далі знайдемо модулюючу функцію ТХВ.)

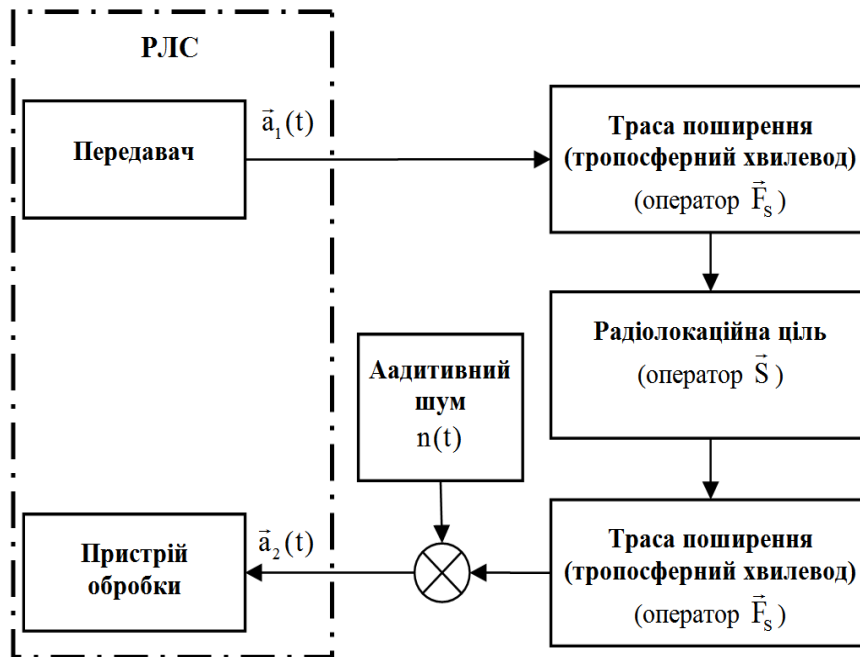


Рис. 2. Спрощена схема РЛС

Модулююча функція ТХВ

Нехай антена РЛС випромінює вузькосмуговий сигнал:

$$u_{\text{випр}}(t) = U(t) \cos[\omega_0 t + \Phi(t) + \phi_0], \quad (3)$$

де $U(t)$ – обвідна сигналу, визначувана законом його амплітудної модуляції; $\Phi(t)$ – закон фазової модуляції сигналу (при частотній модуляції $\Phi(t) = \int \Omega(t) dt$, де $\Omega(t)$ – закон частотної модуляції); ω_0 і ϕ_0 – відповідно несуча частота і початкова фаза сигналу.

У комплексній формі вираз (3) запишеться як:

$$u_{\text{випр}}(t) = \text{Re} \left\{ \dot{U}_{\text{випр}}(t) \right\} = \text{Re} \left\{ \dot{U}(t) e^{j(\omega_0 t + \phi_0)} \right\}, \quad (4)$$

де $\text{Re}\{\cdot\}$ – дійсна частина виразу, взятого в дужки; $\dot{U}(t) = U(t) e^{j\Phi(t)}$ – комплексна обвідна сигналу.

Якщо вважати ПО точковим, то унаслідок багатопроменевого поширення у неоднорідній атмо-

фері сигнал, що опромінює ПО $\dot{u}_{\text{ПО}}^{\text{опр}}$, буде сумою сигналів, які прийшли по різних траєкторіях:

$$\dot{u}_{\text{ПО}}^{\text{опр}}(t) = \sum_i \rho_i U(t - t_i) e^{j(\Phi(t - t_i) + \omega_i [t - t_i] + \phi_i)}, \quad (5)$$

де i – номер променя, по якому прийшов сигнал; ρ_i і ϕ_i – амплітудний множник і початкова фаза сигналу, що прийшов по i -му променю; t_i – час розповсюдження сигналу по i -му променю; ω_i – доплерівський зсув частоти сигналу при розповсюдженні по i -му променю.

Доплерівський зсув частоти сигналу, що прийшов по i -му променю, може виникати унаслідок зміни місцеположення стінок ТХВ в просторі або руху відзеркалювальної поверхні.

В процесі відбиття сигналу від ПО відбувається його додаткова зміна модулюючою функцією ПО $\dot{V}(t) = \dot{V}_{\text{ПО}}(t)$ [1].

Відбитий сигнал матиме вигляд:

$$\begin{aligned} \dot{u}_{\text{ПО}}^{\text{вдб}}(t) &= \dot{u}_{\text{ПО}}^{\text{опр}}(t) \dot{B}_{\text{ПО}}(t) = \\ &= \dot{B}_{\text{ПО}}(t) \sum_i \rho_i U(t-t_i) e^{j(\Phi(t-t_i) + \omega_i [t-t_i] + \phi_i)}. \end{aligned} \quad (6)$$

Після повторного відбиття від стінок ТХВ, по аналогії з (5), сигнал в приймальній антені виглядатиме як:

$$\begin{aligned} \dot{u}_{\text{пр}}(t) &= \sum_k \sum_i \dot{B}_{\text{ПО}}(t-t_k) \rho_i \rho_k U(t-t_i-t_k) \times \\ &\times e^{j(\Phi(t-t_i-t_k) + \omega_i [t-t_i-t_k] + \omega_k [t-t_k] + \phi_i + \phi_k)}. \end{aligned} \quad (7)$$

Формула (7) є детерміністською математичною моделлю сигналу, відбитого від ПО у ТХВ, і що прийшов в приймальну антену РЛС. Більшість змінних в цьому виразі невідома, а частина з них додатково є випадковими величинами. Унаслідок різниць ходу променів, що приходять від передавача до приймача, сигнал в приймальній антені представляє суму окремих коливань з різними фазами і амплітудами. Інтерференція цих коливань в умовах, коли різниці ходу променів не залишаються постійними, і є основною причиною флуктуацій, як амплітуд, так і фаз складових сигналу. Канал, в якому амплітуди складових сигналу, що приходять до приймача, схильні до флуктуацій, називається каналом із завмираннями [12]. Як видно з виразів (5) і (7), багатопроменеве розповсюдження радіохвиль приводить до спотворення сигналу. При цьому зміні піддаються всі його елементи, тобто відбувається паразитна (завадова) модуляція сигналу. Позначимо закон такої зміни сигналу як функцію завадової модуляції [13]:

$$\dot{M}(t) = A_m(t) e^{j\phi_m(t)}, \quad (8)$$

де $A_m(t)$ і $e^{j\phi_m(t)}$ – закони зміни амплітуди і повної фази сигналу, обумовлені середовищем розповсюдження радіохвиль.

В [15] вказано, що за виконання умови:

$$|\delta\tau|_{\text{max}} \Delta F_c \leq 1, \quad (9)$$

де $|\delta\tau|_{\text{max}}$ – максимальне відхилення часу запізнювання сигналу у ТХВ від середнього значення, ΔF_c – ширина спектру сигналу, то спотвореннями фазової структури сигналу за рахунок багатопроменевості можна нехтувати.

Таким чином, для ТХВ оператор \bar{F}_S (рис. 2) буде рівний:

$$\bar{F}_S = \dot{M}(t) = A_m(t). \quad (9)$$

З урахуванням вищевикладеного, для РЛС із вузькосмуговими сигналами для випадку локації ПО у ТХВ, характерних для чорноморського басейну [11], сигнал на вході пристрою обробки можна записати у вигляді:

$$\bar{a}_2(t) = \bar{a}_1(t) A_m(t) \dot{B}_{\text{ПО}}(t) A_m(t) + n(t). \quad (10)$$

Для випадку радіолокації корисним є сигнал вигляду $a_1(t) \dot{B}_{\text{ПО}}(t)$, а за рахунок особливих умов поширення радіохвиль на корисний сигнал буде двічі накладена функція завадової модуляції $A_m(t)$.

Знайдемо статистичні характеристики луна-сигналів від ПО у ТХВ.

Статистичні характеристики луна-сигналів від ПО у ТХВ

Хай сигнал на вході приймального пристрою описується виразом (10). Зараз нас цікавитиме не сам сигнал, а його статистичні характеристики, зокрема функції щільності імовірності амплітуди $p_{a_2}(a_2)$ і початкової фази $p_{\phi_n}(\phi_n)$ сигналу. Знайти $p_{a_2}(a_2)$ і $p_{\phi_n}(\phi_n)$ можна, знаючи властивості коефіцієнтів, що входять у (10), як випадкових величин, і користуючись правилами операцій над ними [14].

Спочатку розглянемо статистичні властивості модулюючої функції ПО. Для реальних ПО $\dot{B}_{\text{ПО}}(t)$ є випадкова функція, але для коротких сигналів її можна вважати постійною величиною, змінною лише від реалізації до реалізації [1]. Тому для опису параметрів ПО можна використовувати модулюючий множник $b_{\text{ПО}}$ і функцію щільності його імовірності $p_{b_{\text{ПО}}}(b_{\text{ПО}})$.

Найчастіше $p_{b_{\text{ПО}}}(b_{\text{ПО}})$ апроксимують розподілом Райсу або Релея, розподіл початкової фази відбитого від ПО сигналу вважають рівномірним. Ми вважатимемо, що щільність вірогідності значень модулюючого множника підпорядкована закону Релея, оскільки при таких флуктуаціях амплітуди сигналу показники якості виявлення ПО дещо гірше, ніж при райсовських. У такому разі:

$$p_{b_{\text{ПО}}}(b_{\text{ПО}}) = \begin{cases} 2b_{\text{ПО}} \exp(-b_{\text{ПО}}^2), & b_{\text{ПО}} \geq 0 \\ 0, & b_{\text{ПО}} < 0. \end{cases} \quad (11)$$

Тепер знайдемо статистичні характеристики модулюючої функції ТХВ. Для цього скористаємося результатами вирішення подібних завдань, викладені в [12, 15].

Ми вважаємо, що випромінюваний сигнал достатньо короткий, щоб за час його проходження від РЛС до ПО і у зворотному напрямі параметри ТХВ не встигали скільки-небудь істотно змінитися, тоді сигнал, що приймається, можна вважати стаціонарним випадковим процесом.

В цьому випадку для характеристики тропосферного хвилеводу можна використовувати не $\dot{M}(t)$, а коефіцієнт передавання μ , який має розпо-

діл Релея [12], і його нормована щільність імовірності рівна:

$$p_{\mu}(\mu) = \begin{cases} 2\mu \exp(-\mu^2), & \mu \geq 0; \\ 0, & \mu < 0 \end{cases} \quad (12)$$

Розподіл початкової фази сигналу, що приймається, можна вважати рівномірним [12].

Таким чином, при локації ПО в тропосферному каналі при наявності ТХВ, якщо виконуються викладені вище обмеження по тривалості і ширині спектру, то на вхід приймача приходиме сигнал, який відрізнятиметься від того, що випромінює лише випадковою амплітудою і початковою фазою. Флуктуації амплітуди обумовлені випадковими коефіцієнтами передачі в кожній ланці радіолокаційного каналу.

Флуктуації початкової фази можна вважати рівномірними. Щоб знайти щільність вірогідності амплітуди на вході приймача $p_a(a)$ необхідно провести перемноження коефіцієнтів передачі усіх ланок РЛК, як випадкових величин.

Для цього скористаємося методикою, викладеною у [14]. В результаті виконання всіх дій отримуємо:

$$p_{a_2}(a_2) = \begin{cases} 2a_2^2 G \left[\begin{matrix} m \\ 3 \end{matrix} \middle| \begin{matrix} n \\ 1 \end{matrix} \right] \left(a_2^2 \left[\begin{matrix} -1 \\ 2 \\ 1 \end{matrix} \right] \right), & a_2 \geq 0; \\ 0, & a_2 < 0, \end{cases} \quad (13)$$

де $G \left[\begin{matrix} m \\ p \end{matrix} \middle| \begin{matrix} n \\ q \end{matrix} \right]$ – G-функція Майєра порядку (m, n, p, q) [16].

На рис. 3 наведені графіки, що відображають розподіл щільності імовірності амплітуди луна-сигналу від ПО у вільному просторі та у ТХВ.

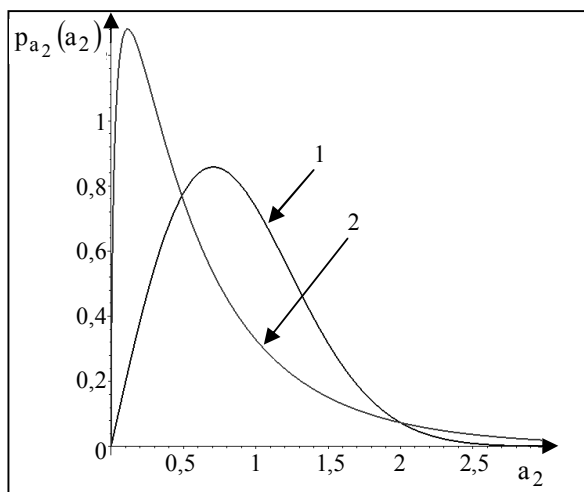


Рис. 3. Щільність імовірності амплітуди луна-сигналу:

- 1 – ПО у вільному просторі (розподіл Релея);
- 2 – ПО у ТХВ

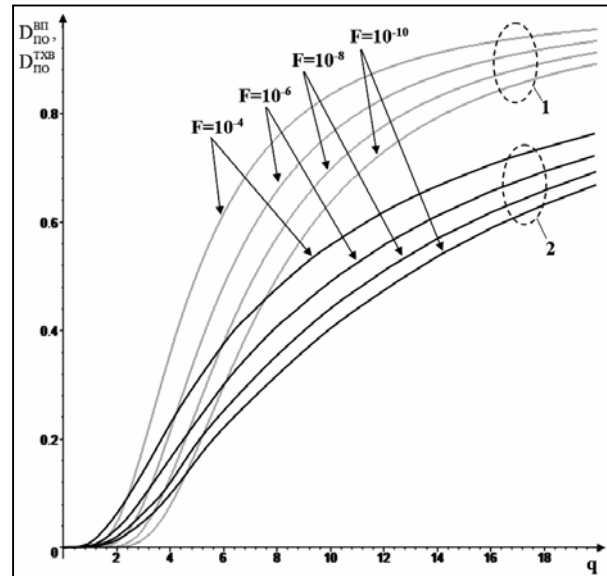


Рис. 4. Імовірність правильного виявлення ПО при різних ймовірностях хибної тривоги для різних законів розподілу щільності імовірності амплітуди ехо-сигналу:

- 1 – ПО у вільному просторі (розподіл Релея);
- 2 – ПО у ТХВ

Як видно з рис. 3, подвійне проходження крізь канал із завмираннями призводить до збільшення флуктуацій амплітуди сигналу (для порівняння дисперсія амплітуди луна-сигналу на вході приймального пристрою від ПО у вільному просторі складає 0,21, а від ПО у ТХВ – 0,52).

На рис. 4 наведені криві виявлення для сигналів щільності імовірності амплітуди яких визначаються розподілом Релея та виразом (13).

Як можна побачити з рисунку, підвищення флуктуації луна-сигналу від ПО у ТХВ полегшує його виявлення при малих значеннях імовірності правильного виявлення і потребує значного підвищення відношення сигнал/шум при великих значеннях D.

Висновки

Тропосферні хвилеводи, характерні для чорноморського басейну, можна вважати каналами із завмираннями. При поширенні радіохвиль у ТХВ відбувається додаткова модуляція сигналів. Для вузькосмугових сигналів, можна вважати, що модуляція є амплітудною, а спотвореннями фазової структури сигналу за рахунок багатопроменевості можна нехтувати. При локації ПО у ТХВ за рахунок особливих умов поширення радіохвиль на корисний сигнал буде двічі накладена функція завадової модуляції, внаслідок чого відбувається збільшення флуктуацій його амплітуди. Флуктуації початкової фази можна вважати рівномірними.

Криві виявлення для луна-сигналів від ПО у ТХВ йдуть нижче, ніж для ПО у вільному просторі.

Підвищення флукуації луна-сигналу від ПО у ТХВ полегшує його виявлення при малих значеннях імовірності правильного виявлення і потребує значного підвищення відношення сигнал/шум при великих значеннях D .

Список літератури

1. Теоретические основы радиолокации [Текст] / под ред. Я.Д. Ширмана – М.: Сов.радио, 1970. – 560 с.
2. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн [Текст] / Ф.Б. Черный – М.: Сов. радио, 1972. – 463 с.
3. Красюк Н.П. Влияние тропосферы и подстилающей поверхности на работу РЛС [Текст] / Н.П. Красюк, В.Л. Коблов, В.Н. Красюк – М.: Радио и связь, 1988. – 216 с.
4. Лобкова Л.М. Распространение радиоволн над морской поверхностью [Текст] / Л.М. Лобкова – М.: Радио и связь, 1991. – 256 с.
5. Карлов Д.В. Потенциальные показатели качества обнаружения низкочастотных целей в условиях существования тропосферного волновода над морской поверхностью [Текст] / Д.В. Карлов, В.Л. Мисайлов, Ю.И. Рафальский // Системы обработки информации. – 2003. – Вып. 5. – С. 196-201.
6. Мыценко И.М. Исследование распространения радиоволн сантиметрового диапазона при наличии волновода испарения [Текст] / И.М. Мыценко // Радиофизика и электроника. – 2008. – Том 13. – № 2. – С. 173-177.
7. Морская радиолокация [Текст] / под ред. В.И. Винокурова. – Л.: Судостроение, 1986. – 256 с.
8. Зуйков В.А. Характеристики распространения радиоволн СВЧ диапазона в приводном слое [Текст] / В.А. Зуйков, Ю.А. Педенко, В.Б. Разказовский // Распространение радиоволн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов: сб. науч. тр. – Х.: Ин-т радиофизики и электроники АН УССР, 1989. – С. 76-82.
9. Степанов В.А. Статистические характеристики радиосигналов, распространяющихся в тропосферном волноводном канале над морской поверхностью [Текст] / В.А. Степанов, С.И. Марухленко, М.Д. Бутаков // Тезисы докладов XVI Всесоюз. конф. по распространению радиоволн. – Ч. 2. – Х.: ХПИ. – 1990. – С. 82.
10. Варганов М.Е. Радиолокационные характеристики летательных аппаратов [Текст] / М.Е. Варганов, Ю.С. Зиновьев, Л.Ю. Астанин и др.; под ред. Л.Т. Тучкова. – М.: Радио и связь, 1985. – 236с., ил.
11. Карлов В.Д. Свойства морского тропосферного волновода как элемента радиоканала [Текст] / В.Д. Карлов, В.Л. Мисайлов, Н.Н. Петрушенко // Системы обработки информации. – Х.: XV ПС, 2008. – Вып. 6(73). – С. 54-58.
12. Финк Л.М. Теория передачи дискретных сообщений. Изд. 2-е, переработанное, дополненное. [Текст] / Л.М. Финк – М.: Советское радио, 1970. – 728 с.
13. Кремер И.Я. Модулирующие (мультипликативные) помехи и прием радиосигналов [Текст] / И.Я. Кремер, В.И. Владимиров, В.И. Карпунин: под ред. И.Я. Кремера. – М.: Сов. радио, 1972. – 480 с.
14. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника [Текст]: - 2-е изд., перераб и доп. / В.И. Тихонов – М.: Радио и связь, 1982. – 624 с.
15. Поляков П.Ф. Прием сигналов в многолучевых каналах [Текст] / П.Ф. Поляков – М.: Радио и связь, 1986. – 248 с.
16. Прудников А. П. Интегралы и ряды. В 3 т. Т.3. Специальные функции. Дополнительные главы [Текст] / А.П. Прудников, Ю.А. Брычков, О.И. Маричев – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 688 с.

Надійшла до редколегії 10.03.2010

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

ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ОБНАРУЖЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ В МОРСКОМ ТРОПОСФЕРНОМ ВОЛНОВОДЕ

В.Л. Мисайлов

Проведена оценка влияния многолучевого распространения радиоволн в тропосферных волноводах (ТВВ) над морской акваторией на показатели качества обнаружения воздушных объектов. Показано, что тропосферный волновод является каналом с замираниями. Для определения статистических характеристик сигнала на входе приемного устройства, ТВВ представлен в виде эквивалентного многополюсника со случайным передаточным коэффициентом. Получено аналитическое выражение для плотности вероятности амплитуды радиолокационного сигнала, отраженного от воздушного объекта в тропосферном волноводе над поверхностью моря, на входе приемного устройства РЛС. Построены кривые обнаружения для такого сигнала.

Ключевые слова: показатели качества обнаружения, тропосферный волновод, непрямолинейное распространение радиоволн.

QUALITY PARAMETERS OF AIR OBJECTS DETECTION IN A SEA TROPOSPHERIC WAVEGUIDE

V.L. Misaylov

The estimation of radio-waves multibeam propagation effect in tropospheric waveguides (TWG) over sea water area on quality parameters of air objects detection is conducted. It is shown, that the tropospheric waveguide is a fading channel. For definition of signals statistical characteristics on the receiving device input, TWG is presented in the form of an equivalent multiterminal network with casual transfer factor. Analytical expression for amplitude probability density of the radar signal reflected from air object in a tropospheric waveguide over a sea surface, on the input of radar receiving device is received. Curves for such signal detection are built.

Keywords: quality parameters of detection, a tropospheric waveguide, not rectilinear propagation of radio-waves.