С.Г. Леушин¹, О.В. Бєсова¹, М.М. Олещук².

¹ Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

² Військова частина А 2533, Дніпро

ПАРАМЕТРИ ПРИЧОРНОМОРСЬКИХ ТРОПОСФЕРНИХ РАДІОХВИЛЕВОДНИХ КАНАЛІВ ВИЯВЛЕННЯ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Показано, що існують кілька моделей тропосферних каналів поширення радіохвиль. Найбільш поширеними моделями є: багатоканальні параметричні пристрої з випадковими параметрами за часом і багатосмугові параметричні фільтри з випадковими параметрами по частоті. Однак на практиці існує апріорна невизначеність характеристик променів поширення, як за часом, так і по частоті, обмежує значимість цих моделей. Проаналізовано модель багатопроменевого каналу радіолокації з випадковими параметрами за часом і по частоті. Визначено параметри моделі - середній часовий інтервал і середнє частотне рознесення. Показаний їх зв'язок з смугою і час когерентності каналу. Наведено кількісні оцінки смуги і часу когерентності для причорноморських районів. Отримані результати можуть служити основою для синтезу та аналізу РЛС виявлення безпілотних літальних апаратів (БПЛА), що працюють в умовах багатопроменевого поширення електромагнітних хвиль (ЕМХ).

Ключові слова: спотворення електромагнітних хвиль (ЕМХ), багатопроменеве поширення, модель, параметри моделі.

Вступ

Постановка проблеми: У теперішній час, при проведенні бойових операцій зростає значення маловисотних безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Тому зростає і значення маловисотних РЛС виявлення та виміру координат [1]. Зазвичай, сигнал на виході будь якого каналу радіолокації вважається випадковим процесом Гауса з нульовим середнім [2–3]. Для маловисотних РЛС це не виконується. Відмінність розподілу щільності вірогідності випадкового “луна”-сигналу від розподілу Гауса пов'язана з наявністю множини модулюючих перешкод (МП), які спотворюють “луна”-сигнали [2; 4–5]. Поява МП пов'язана, передусім, з кінцевим числом шляхів (променів) поширення ЕМХ. Тому актуальною є розробка моделі багатопроменевих каналів радіолокації з апріорно невизначеними випадковими параметрами.

Аналіз літератури вітчизняних і зарубіжних авторів. Відомо, що в тропосферному радіохвильоводі амплітуда ЕМХ “луна”-сигналів в точці розміщення РЛС флюктує. Це трактують як наявність МП, які істотно погіршують ТТХ РЛС [2–3].

Характеристики МП залежать від: стану тропосфери; показника заломлення ЕМХ у повітрі; руху цілі; часових, частотних, просторових флюктуацій (розсіювання) ЕМХ, параметрів та міста розміщення РЛС [12; 8; 6].

Зазвичай, характеристики МП отримують експериментально, що завжди обмежено. Тому для

аналізу впливу каналу поширення ЕМХ на ТТХ РЛС необхідна його адекватна математична модель [9; 7].

Рис. 1. Параметричний пристрій, який відповідає багатопроменевому каналу поширення ЕМХ з розсіюванням за часом
Джерело: [4, С. 16].

Рис. 2. Параметричний фільтр, який відповідає багатопроменевому каналу з частотним розсіюванням
Джерело: [4, С. 25].

Існують декілька моделей тропосферних каналів поширення радіохвиль [3; 5]. Найбільш поширеними моделями є: багатоканальні параметричні пристрої з випадковими параметрами за часом (рис. 1) і багатосмугові параметричні фільтри з випадковими параметрами по частоті (рис. 2).

Однак на практиці існує апріорна невизначеність характеристик променів поширення, як за часом, так і по частоті, що обмежує значимість цих моделей. Тому запропонована модель каналів поширення ЕМХ, яка враховує цю невизначеність (рис. 3) [3–4].

Рис. 3. Параметричний фільтр, який відповідає багатопроменевому каналу з часовим та частотним розсіюванням
Джерело: [3, С. 18].

Мета статті - визначення моделі і параметрів багатопроменевого радіолокаційного каналу виявлення БПЛА.

Виклад основного матеріалу

Для отримання характеристик моделі проаналізовані чинники виникнення МП у тропосфері. Наприклад, вважаючи, що частотний спектр флуктуацій показника заломлення повітря пропорційний ($f^{5/3}$), існують вирази для дисперсії амплітуди МП на трасах, розташованих уздовж поверхні на висотах ($1 \leq h \leq 1000$) (м) [2].

Відомо, що в тропосферному радіохвелеводі амплітуда ЕМХ міліметрових, сантиметрових і дециметрових хвиль “луна”-сигналів в точці розташу-

вання РЛС флукутує [2–3]. Це трактується як наявність модулюючих перешкод (МП), які істотно погіршують роботу РЛС. МП залежать від руху цілі, стану тропосфери, показника заломлення ЕМХ у повітрі та їх часових, частотних і просторових флуктуацій [2–4].

Чинники виникнення МП у тропосфері дуже численні і добре вивчені. Наприклад, вважаючи, що частотний спектр флуктуацій показника заломлення повітря пропорційний ($f^{5/3}$), отримані вирази для визначення дисперсії амплітуди МП на трасах, розташованих уздовж поверхні на висотах декілька кілометрів [2–3]:

$$\left(\ln \frac{\bar{E}}{E_0} \right)^2 = 0,32 C_n^2 (2\pi/\lambda)^{7/6} d^{11/6},$$

$$\left(\frac{\bar{E}}{E_0} \right)^2 = \left(\overline{\Delta n} \right)^2 (2\pi/\lambda)^2 L_0 d, \quad (1)$$

де (E_0, E) – середня і миттєва амплітуда ЕМХ;

$C_n^2 = 10^{-(15,5+0,2h)}$ – параметр, пов'язаний зі структурою показника заломлення ЕМХ за висотою (h);

(L_0) – максимальний розмір неоднорідності тропосфери;

(d) – довжина траси;

λ – довжина хвилі;

$\left(\overline{\Delta n} \right)^2$ – середній квадрат флуктуації показни-

ка заломлення на неоднорідності (L_0).

У радіолокаційній практиці співвідношення (1) пов'язують з гідрометеорологічними параметрами тропосфери і визначають як [2–3; 5]:

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

де (T°, p, e) – температура, тиск сухого та вологого пару.

Коли є область висот тропосфери, в якій ($dM/dh < 0$), то в цій області утворюється хвилевід.

Приклад профілю $M(h)$ приведено на рис. 4. На $M(h)$ стрілками відмічені ділянки, на яких є можливість виникнення тропосферних радіохвелеводів.

$M(h)$ випадковий і залежить від гідрометеорологічних параметрів тропосфери. Тому це можливо вважати джерелом МП. Більш відомих даних про флуктуації ЕМХ в тропосфері присвячені відсутності радіохвелеводу. Так для сантиметрового діапазону хвиль в разі трас довжиною до 100 км, дисперсії флуктуацій можуть досягати (6 ... 8 дБ) і (3 ... 5 дБ) для суходутних і приморських трас відповідно та пори року.

Рис. 4. Приклад утворення тропосферного хвильоводу

Тому в ХНУПС проведені дослідження флуктуацій ЕМХ при наявності тропосферного хвильоводу над Чорним морем. Вони показали [5–6], що дисперсія флуктуацій перевищує 10 дБ незалежно від пори року. Частота флуктуацій залежить від її швидкості цілі, швидкості обертання РЛС, швидкості вітру та параметрів зондуючого сигналу. МП характеризують не тільки абсолютними, але і відносними параметрами. Наприклад, часом когерентності T_k і смугою когерентності W_k .

Показано [4–6], що чинниками виникнення МП є такі:

1) рефракція, яка обумовлена безвітряним (конверсійним) переносом повітря в тропосфері;

2) рефракція, яка обумовлена шаруватою структурою тропосфери;

3) для таких перешкод час когерентності – години, смуга когерентності – (0,1–1,5) МГц. Інтервал просторової кореляції 10–100(км). Дисперсія флуктуацій ЕМП ≥ 10 (дБ);

4) пасивні перешкоди типу луна-“ангел”. Вони обумовлені неоднорідністю тропосфери, що непомітна у оптичному діапазоні. Час їх когерентності визначається швидкістю вітру і становить секунди або декілька хвилин. Частота появи луна-“ангелів” залежить від пори року та часу доби. Інтервал просторової кореляції обумовлений внутрішнім і зовнішнім розміром неоднорідності та змінюється від 0,5 мм до 3 см. Смуга когерентності залежить від довжини хвилі РЛС і змінюється від 100(МГц) до 10(ГГц). Дисперсія флуктуацій ЕМХ до 20(дБ);

5) багатопроменеві завмирання (фединг) виникають через відбиття ЕМХ від декількох шарів інверсій, при яких в точку прийому можуть приходити одночасно декілька ЕМХ з довільними амплітудами

і фазами. Час когерентності десятки хвилин. Визначається швидкістю вітру, часом доби і порою року. Просторова кореляція залежить від довжини траси. Становить 10–100(м). Полоса частотної когерентності 10–15(МГц). Залежать від середньої величини просторового розсіювання і висоти морських хвиль. Дисперсія флуктуацій 6–10(дБ);

6) перешкоди які викликані “луна”-сигналами від гір, що знаходяться за межами радіогоризонту. Викликані підвищеною рефракцією ЕМХ; цей тип МП спостерігається в безвітряну погоду в ліпні-жовтні місяцях у випадках вузької діаграми спрямованості антени РЛС. Кореляційні і імовірнісні властивості вивчені слабо.

Показано [5–6], що поблизу Чорного моря основними причинами МП є багатопроменеве поширення ЕМХ і пасивні перешкоди типу “луна-ангел”.

Таким чином, при локації БПЛА над Чорним морем “луна-сигнали” від маловисотних цілей піддаються модуляції за часом і частотою. МП випадкові і залежать від параметрів тропосфери, від параметрів цілі і розміщення РЛС.

Отримано [5–6] характеристики МП, які необхідні для моделі (рис. 3):

1) максимальне часове розсіювання сигналу $|\overline{\Delta\tau_z}| \leq 0,25-0,30$ мкс;

2) середнє часове розсіювання $\overline{\Delta\tau_{z\ell}} = 0,05-0,08$ мкс;

3) час когерентності $T_k = 8-10$ хв.;

4) сумарна смуга когерентності $W_k = 3-4$ МГц;

5) смуга когерентності одного променя $W_l \leq 15-100$ МГц;

6) кількість променів $2 \leq L \leq 10$;

7) дисперсія флуктуацій 6–20 дБ.

Висновки

Таким чином, було створено модель поширення ЕМХ у тропосферному хвильоводі, що враховує:

- кількість променів поширення;
- час когерентності одного променя;
- сумарну смугу когерентності.

Показано, що поблизу Чорного моря основними причинами появи модулюючих перешкод є багатопроменеве поширення ЕМХ і пасивні перешкоди типу “луна-ангел”. Тобто, при локації безпілотних літальних апаратів над Чорним морем “луна-сигнали” від маловисотних цілей піддаються модуляції за часом і за частотою. Модулюючі перешкоди випадкові і залежать від параметрів тропосфери, від параметрів цілі і розміщення РЛС на місцевості.

Список літератури

1. Довідник учасника АТО: озброєння і військова техніка Збройних сил Російської Федерації / А.М. Алімпієв, Г.В. Певцов, Д.А. Гриб та ін.; за заг. ред. А.М. Алімпієва. – Х.: Оригінал, 2015. – 732 с.
2. Кукушкин А.В. Загоризонтное распространение ультракоротких радиоволн над морем: обзор / А.В. Кукушкин, В.Д. Фрейлихер, И.М. Фукс // Известия вузов. Радиофизика. – 1987. – Т. XXX. – № 7. – С. 811-839.
3. Кеннеди Р. Каналы связи с замиранием и рассеиванием: пер. с англ. под ред. И.А. Овсевича / Р. Кеннеди. – М.: Сов. радио, 1973. – 304 с.
4. До питання про вимірювання дальності маловисотної цілі при її радіолокації в межах тропосферного хвилеводу над морем / В.Д. Карлов, Д.Б. Кучер, О.В. Струцинський, О.В. Лукашук // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2016. – № 3(24). – С. 98-101.
5. Про вплив механізму розповсюдження радіохвиль на локацію цілей в тропосферному радіохвилеводі над морем / В.Д. Карлов, О.В. Бесова, М.М. Олещук, М.М. Петрушенко // Новітні технології-для захисту повітряного простору: зб. тез доповідей Десятої наукової конференції Харківського університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба. 9-10 квітня 2014 р. – Харків, 2014. – С. 254.
6. Вимірювання висоти польоту цілей в радіолокаторах контролю повітряного простору з урахуванням поточного стану тропосферної рефракції / В.Й. Климченко, Г.Г. Камалтинов, В.Л. Місайлов, Г.В. Рибалка // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. – 2019. – № 3(61). – С. 86-95. <https://doi.org/10.30748/zhups.2019.61.11>.
7. Результати експериментальних досліджень особливостей локації маловисотних цілей, що здійснюють політ над морською поверхнею / В.Д. Карлов, М.М. Олещук, Г.В. Певцов, В.Л. Місайлов // Інформаційні проблеми теорії акустичних, радіоелектронних і телекомунікаційних систем IPST: матеріали третьої міжнародної НТК НТУ ХПІ 2014 р. – Харків, 2014. – С. 35.
8. Справочник. Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория. Издание второе, переработанное и дополненное / Я. Ширман, С. Багдасарян, А. Маляренко и др. – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.
9. Радиоэлектронні системи / Ю.М. Седішев, В.І. Карпенко, Д.В. Атаманський та ін. – Х: ХУПС, 2010. – 418 с.
10. О возможности повышения эффективности РЛС приморского базирования при локации протяженных аэродинамических целей в условиях пассивных помех типа “ангел-эхо” / И.Г. Леонов, В.Д. Карлов, О.Я. Луковский и др. // Збірник наукових праць Севастопольського військово-морського інституту. – 2003. – Вип. 3 – С. 71-75.
11. Учет замираний и рассеивания по времени и частоте в модели дискретного радиолокационного канала / И.Г. Леонов, А.Н. Коржов, В.С. Куц, И.М. Пичугин // Системи озброєння і військова техніка. – 2014. – № 4(40). – С. 98-102.
12. Результати експериментальних досліджень коефіцієнта рефракції у континентальній частині України / И.Г. Леонов, А.М. Коржов, А.С. Присяжний, Р.М. Животовський // Восьма наукова конференція ХУПС ім. І. Кожедуба “Новітні технології-для захисту повітряного простору”: тези доповідей, 18-19 квітня 2012 року. – Х.: ХУПС ім. І. Кожедуба, 2012. – С. 304.

Надійшла до редколегії 08.12.2020

Схвалена до друку 05.01.2021

Відомості про авторів:

Леушин Сергій Геннадійович
старший викладач
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-0345-588X>

Бесова Оксана Василівна
кандидат технічних наук
старший науковий співробітник
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-7744-1339>

Олещук Микола Миколайович
Заступник командира
військової частини А 2533,
Дніпро, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-9737-6896>

Information about the authors:

Serhiy Leushyn
Senior Instructor
of Ivan Kozhedub
Kharkiv National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-0345-588X>

Oksana Biesova
Candidate of Technical Sciences
Senior Research
of Ivan Kozhedub
Kharkiv National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-7744-1339>

Mykola Oleschuk
Deputy Head
of the Military Unit A 2533,
Dnipro, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-9737-6896>

ПАРАМЕТРЫ ПРИЧЕРНОМОРСКИХ ТРОПОСФЕРНЫХ РАДИОВОЛНОВЫХ КАНАЛОВ ОБНАРУЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

С.Г. Леушин, О.В. Бесова, М.М. Олещук

Показано, что существуют несколько моделей тропосферных каналов распространения радиоволн. Наиболее распространенными моделями являются: многоканальные параметрические устройства со случайными параметрами по времени и многополосные параметрические фильтры со случайными параметрами по частоте.

Однако на практике существует априорная неопределенность характеристик лучей распространения, как по времени, так и по частоте, которая ограничивает значимость этих моделей. Проанализированы модель многолучевого канала радиолокации со случайными параметрами по времени и по частоте. Определены параметры модели – средний временной интервал и среднее частотное разнесение. Показан их связь с полосой и время когерентности канала. Приведены количественные оценки полосы и времени когерентности для причерноморских районов. Полученные результаты могут служить основой для синтеза и анализа РЛС обнаружения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), работающих в условиях многолучевого распространения электромагнитных волн (ЭМВ).

Ключевые слова: искажение электромагнитных волн (ЭМВ), многолучевое распространение, модель, параметры модели.

PARAMETERS OF BLACK SEA TROPOSPHERIC RADIO DETECTION CHANNELS UNMANNED AERIAL VEHICLES

S. Leushyn, O. Biesova, M. Oleschuk

It is shown that there are several models of tropospheric channels of radio wave propagation. The most common models are: multi - channel parametric devices with random time parameters and multi - band parametric filters with random frequency parameters. However, in practice there is a priori uncertainty in the characteristics of propagation rays, both in time and frequency, which limits the significance of these models. Studies of EMC fluctuations in the presence of a tropospheric waveguide over the Black Sea. They showed that the variance of fluctuations exceeds 10 dB regardless of the season. The frequency of fluctuations depends on its target speed, radar speed, wind speed and parameters of the probing signal. MP is characterized not only by absolute but also relative parameters. Factors are: refraction, which is due to windless (conversion) air transport in the troposphere; refraction, which is due to the layered structure of the troposphere; passive obstacles such as echo - "angel; multi-beam fading (fading) occurs due to the reflection of EMC from several layers of inversions, in which the receiving point can come simultaneously to several EMC with arbitrary amplitudes and phases, interference caused by "echo" - signals from the mountains beyond the radio horizon. The model of a multibeam radar channel with random parameters by time and frequency is analyzed. The parameters of the model are determined - the average time interval and the average frequency diversity. Their connection with the band and coherence time of the channel is shown. Quantitative estimates of the band and coherence time for the Black Sea regions are given. The obtained results can serve as a basis for the synthesis and analysis of radar detection of unmanned aerial vehicles (UAVs) operating in the conditions of multibeam propagation of electromagnetic waves (EMC).

Keywords: electromagnetic wave distortion (EMF), multipath, model, model parameters.