В.Л. Місайлов

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

ВЛАСТИВОСТІ ТРОПОСФЕРНОГО РАДІОКАНАЛУ ІЗ ШТУЧНИМИ БЕЗОБОЛОНКОВИМИ НЕОДНОРІДНОСТЯМИ

На сучасному етапі розвитку науки і техніки є можливість створення у нижньому шарі тропосфери штучних неоднорідностей із тривалим часом існування у вигляді вихрових кілець. За наповнення вихрових кілець радіоконтрастною речовиною можна отримати рухомий піднятий перевідбивач радіохвиль. Виконано розрахунки задля обґрунтування та розроблено рекомендації щодо вибору речовини для наповнення вихрових кілець. Проведено моделювання діаграми розсіювання штучних неоднорідностей тропосфери у вигляді вихрових кілець під малими кутами ковзання. Моделювання показало високий середній рівень перевідбиттів від штучних неоднорідностей у порівнянні із розрахунковим рівнем перевідбиттів від земної поверхні за дифракції та від природніх неоднорідностей тропосфери для радіотраси типу "точка-точка". Також результати розрахунків свідчать, що такі неоднорідності можуть перевипромінювати радіосигнали у широкій смузі частот без суттєвого їх викривлення.

Ключові слова: радіоканал, штучна неоднорідність, вихрове кільце, діаграма розсіювання.

Вступ

Постановка проблеми. Неоднорідності коефіцієнту заломлення атмосферного повітря можуть суттєво впливати на умови поширення радіохвиль (ПРХ) [1]. Переважно вони погіршують якість функціонування радіотехнічних систем (РТС), і з їх впливом намагаються боротися [2]. Але, наприклад, для тропосферних систем радіозв'язку природні неоднорідності повітря є фізичним підґрунтям їх роботи, і чим неоднорідності інтенсивніше – тим краще [3].

З формального боку всі об'єкти, створені людиною і що знаходяться у повітрі, є штучними неоднорідностями. Серед них є ті, що мають оболонку, яка несе конструктивну функцію та зберігає вміст від впливу навколишнього середовища (літальні апарати, що важчі за повітря) або навпаки – не дає вмісту потрапити назовні (газонаповнені метеорологічні кулі, тощо).

Саме через відмінність електричних властивостей оболонки від властивостей навколишнього повітря ці об'єкти можна спостерігати за допомогою радіолокаційних засобів.

Вплив таких оболонкових штучних неоднорідностей на ПРХ та властивості радіоканалу в статті не розглядаються.

Інший, безоболонковий тип штучних неоднорідностей повітря може утворюватись за рахунок впливу (навмисного чи випадкового) на середовище поширення радіохвиль.

Залежність коефіцієнту заломлення повітря n_n за нормальних умов від метеорологічних характеристик (температури T_n , тиску p_n та парціального тиску водяної пари e_n) визначається як [4]:

$$n_n = 1 + \left(77,6 \frac{p_n}{T_n} + 3,73 \cdot 10^5 \frac{e_n}{T_n^2} \right) \cdot 10^{-6}. \quad (1)$$

На сучасному етапі розвитку науки і техніки людство має змогу впливати на усі змінні в рівнянні (1) та створювати у атмосфері (здебільше у прилеглої до земної поверхні її частині – тропосфері) неоднорідності досить великих розмірів. Впливу саме таких безоболонкових штучних тропосферних неоднорідностей (ШТН) на властивості тропосферного радіоканалу буде приділена увага у статті.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Результати експериментальних та теоретичних досліджень щодо локальної зміни температури газоподібних середовищ внаслідок опромінення лазером наведені у [5]. Практичним обмеженням такого способу створення ШТН є те, що їх просторові розміри співставні із розмірами лазерного променя, а час існування практично дорівнює часу опромінення.

У [6–7] опубліковані результати досліджень ПРХ за наявності на трасі штучних комбінованих (барично-термічно-субстантних) неоднорідностей, що виникли в наслідок вибухів. Дуже малий час існування (~1 с) неоднорідностей робить такий спосіб їх створення практично не застосовним.

Іншим способом створення неоднорідностей у тропосфері є підпал суміші пального із повітрям [8]. Тут час існування вогняної хмари (плазмоїда) склав ~3с. Після згасання плазмоїду на його місці утворилась тороподібна хмара (вихрове кільце), яка проіснувала ще приблизно 20 хв. Подібний ефект описаний у [9], де наведені фотографії вихрових кілець (ВК) із початковими радіусом $R_{0BK} = 1,1..1,2$ м та швидкістю $v_{0BK} = 6..25$ м/с, що рухались вертикально і досягали висоти 100..150 м.

Обґрунтування можливості застосування ВК для зміни властивостей радіоканалу була наведена у [10], але форму та параметри руху ШТН не було враховано. У [11] було здійснено оцінку відбивних властивостей ВК для випадку лише суміщеної радіолокації.

Мета статті – розробка моделі та оцінка властивостей тропосферного радіоканалу із штучними безоболонковими неоднорідностями у вигляді вихрових кілець.

Виклад основного матеріалу

1. Загальний опис радіоканалу із ШТН

При визначенні впливу умов поширення радіохвиль в межах тропосфери на функціонування РТС враховують різні механізми ПРХ (рис.1–2) [12].

Рис. 1. Довгострокові механізми ПРХ

Рис. 2. Короткострокові механізми ПРХ

Короткострокові механізми ПРХ є наслідком появи у тропосфері природніх неоднорідностей коефіцієнту заломлення повітря і формально можуть розглядатись як складова частина тропосферного розсіювання. Наявність штучних неоднорідностей призводить до появи у радіоканалі (РК) додаткового шляху ПРХ.

Для визначення властивостей тропосферного РК із ШТН може бути використаний підхід, описаний у [13–14]. В цьому випадку всі елементи радіоканалу подаються у вигляді пов'язаних багатополосників із повністю або частково відомими характеристиками, що описуються певним оператором перетворення (рис. 3).

Вважатимемо, що оператор A_t описує перетворення сигналу $a_1(t)$ з виходу передавача у випромінену електромагнітну хвилю із заданою поляризаційною та просторово-часовою структурою;

F_{LOS} – оператор перетворення сигналів на трасі від передавальної до приймальної антени за прямої видимості; $F_{МП}$ та $T_{МП}$ – оператори перетворення сигналів на трасі від передавальної антени до місцевих предметів (МП) і від МП до приймальної антени відповідно; $F_{ПН}$ та $T_{ПН}$ – оператори перетворення сигналів на трасі від передавальної антени до природніх неоднорідностей (ПН) тропосфери і від ПН до приймальної антени відповідно; $F_{ШТН}$ та $T_{ШТН}$ – оператори перетворення сигналів на трасі від передавальної антени до ШТН і від ШТН до приймальної антени відповідно; $M_{МП}$, $M_{ПН}$ та $M_{ШТН}$ – оператори перетворення сигналу при розсіянні на МП, ПН та ШТН; $N_{П}$ – вектор перешкод; A_r – оператор, що описує перетворення сигналу у антенно-фідерній системі приймача. Тоді сигнал $a_2(t)$ на виході приймача може бути записаний як:

$$a_2(t) = A_r \left\{ \left[T_{МП} M_{МП} F_{МП} + T_{ПН} M_{ПН} F_{ПН} + T_{ШТН} M_{ШТН} F_{ШТН} \right] + F_{LOS} \right\} A_t a_1(t) + N_{П}. \quad (2)$$

В залежності від конкретної ситуації, на складові виразу (2) можуть бути накладені певні обмеження, внаслідок чого він може бути спрощений.

2. Спрощений опис радіоканалу із ШТН для траси типу "точка-точка"

Розглянемо можливий варіант розташування передавача, ШТН і приймача у просторі для радіотрас типу "точка-точка" (рис. 4) для наземних служб. Фазові центри антени передавача (ПРД) і приймача (ПР) знаходяться у точках O_1 та O_2 і підняті на висоти $h_{анр\delta}$, $h_{анр}$ відповідно. ШТН знаходиться у точці O_3 на висоті $h_{ШТН}$. Кут між нормаллю до площини ВК і напрямком на ПРД дорівнює Θ_1 (на ПР – Θ_2). Перевідбиття сигналу від природніх неоднорідностей тропосфери відбувається поблизу точки O_4 . Точка O_5 є нормальною проекцією точок O_3 і O_4 на підстильну поверхню.

Ортодромічна відстань між O_5 та O_1 і O_2 є d_1 і d_2 відповідно. З огляду на рис. 4 уточнимо складові виразу (2).

Вважатимемо, що випромінюваний сигнал $a_1(t)$ є повністю відомим; антенно-фідерні системи передавача і приймача узгоджені із передаваним сигналом, а ширина їх діаграм спрямованості достатньо широка і оператори A_t , A_r можна замінити на відповідні значення коефіцієнту підсилення антен в напрямку на приймач $A_t = G_t$ (передавач $A_r = G_r$); у радіоканалі відсутні активні перешкоди ($N_{П} = 0$).

Рис. 3. Схема радіоканалу із ШТН

Рис. 4. Схема радіоканалу із ШТН для траси типу "точка-точка"

Також врахуємо, що втрати сигналу за прямої видимості є найменшими за решту механізмів ПРХ, а наявність у радіоканалі ШТН, що рухається, призведе до змінної у часі інтерференції прямого і відбитого від ШТН променів, що погіршить якість прийому.

Тому вважатимемо, що між ПРД і ПР немає

прямої видимості ($F_{LOS} = 0$). Також вважатимемо, що МП, ПН та ШТН знаходяться в межах прямої видимості ПРД і ПР, а на трасах ПРХ не відбувається перетворень сигналу, крім зменшення його рівня із відстанню ($F_{МП} = F_{ПН} = F_{ШТН} = F_{LOS}(d_1)$, $T_{МП} = T_{ПН} = T_{ШТН} = T_{LOS}(d_2)$).

В такому випадку властивості радіоканалу будуть визначатись операторами $\mathbf{M}_{МП}$, $\mathbf{M}_{ПН}$, $\mathbf{M}_{ШТН}$ та їх співвідношеннями.

При визначенні оператору $\mathbf{M}_{МП}$ в якості МП розглядатимемо найпростіший випадок – земну поверхню. Тоді можемо скористатися результатами відомих досліджень [15–16]. При визначенні оператора $\mathbf{M}_{ПН}$ можна скористатися результатами досліджень щодо дальнього тропосферного розповсюдження (ДТР) радіохвиль, що наведені у [3; 12].

Таким чином у виразі (2) невідомим залишився оператор $\mathbf{M}_{ШТН}$. Частково властивості вихрових кілець як перевідбивачів радіосигналів описані у [11]. Але там було розглянуто зміни моностатичної ефективної площі розсіяння (ЕПР) на різних етапах існування ВК. Зараз нас цікавить діаграма розсіяння (бістатична ЕПР) ВК на середньому та кінцевому етапі його існування.

Тобто тоді, коли можна вважати, що розсіяння електромагнітних хвиль (ЕМХ) відбувається на однорідному тороподібному ядрі ВК (рис. 5), яке має комплексні діелектричну проникність $\hat{\epsilon}_{BK}$ та магнітну проникність $\hat{\mu}_{BK}$.

Рис. 5. Вихрове кільце та його основні параметри

Відбивні властивості об'єкта визначаються його електричними властивостями та геометричною формою і розмірами [17].

Форма вихрових кілець є відомою та практично сталою, а розміри визначаються способом та пристроєм утворення ВК [11; 18]. Визначимо, чим можуть бути наповнені ВК, що рухаються у атмосферному повітрі, задля максимізації їх ЕПР.

3. Електричні властивості суміші речовин

Комплексний коефіцієнт відбиття $\hat{R}_{\theta\phi}$ від пласкої межі двох середовищ набуває свого максимального значення за нормального падіння ЕМХ і визначається як [19–21]:

$$\hat{R}_{\theta\phi} = \frac{\hat{Z}_{c2} - \hat{Z}_{c1}}{\hat{Z}_{c2} + \hat{Z}_{c1}} = R_{\theta\phi} e^{j\varphi_{\theta\phi}}, \quad (3)$$

де $R_{\theta\phi}$ – модуль коефіцієнту відбиття;

$\varphi_{\theta\phi}$ – аргумент коефіцієнту відбиття;

$$\hat{Z}_{ci} = \sqrt{\frac{\mu_0 \hat{\mu}_i}{\epsilon_0 \hat{\epsilon}_i}} \text{ – характеристичний (хвильовий)}$$

опір середовища, $i=1, 2$;

$\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6}$ Гн/м – магнітна проникність вакууму;

$\hat{\mu}_i = \mu_i (1 - j \cdot \text{tg} \delta_{mi})$ – відносна комплексна магнітна проникність середовища, $i=1, 2$;

μ_i – дійсна частина відносної комплексної магнітної проникності середовища, $i=1, 2$;

$\text{tg} \delta_{mi}$ – тангенс кута магнітних втрат у середовищі, $i=1, 2$;

$$\hat{\epsilon}_i = \epsilon_i - j \left[\epsilon_i \cdot \text{tg} \delta_{di} + \frac{\sigma_i}{2\pi \cdot f \cdot \epsilon_0} \right] \text{ – відносна}$$

комплексна діелектрична проникність середовища, $i=1, 2$;

ϵ_i – дійсна частина відносної комплексної діелектричної проникності середовища, $i=1, 2$;

$\text{tg} \delta_{di}$ – тангенс кута діелектричних втрат, обумовлених токами зсуву у середовищі, $i=1, 2$;

σ_i – провідність середовища, $i=1, 2$;

f – частота ЕМХ.

Визначимо, що середовище 1 є атмосферне повітря, а середовище 2 є речовина, з якої утворено вихрове кільце. Перетворимо (3) наступним чином:

$$\hat{R}_{\theta\phi} = \frac{\hat{k}_{ktp} - 1}{\hat{k}_{ktp} + 1} = \frac{k_{ktp} \cdot e^{j\varphi_{ktp}} - 1}{k_{ktp} \cdot e^{j\varphi_{ktp}} + 1}, \quad (4)$$

де $\hat{k}_{ktp} = \frac{\hat{Z}_{c2}}{\hat{Z}_{c1}}$ – коефіцієнт "контрастності" між середовищами;

k_{ktp} – модуль $\hat{k}_{ktp}$;

φ_{ktp} – аргумент $\hat{k}_{ktp}$;

На рис. 6 наведено графік залежності модулю коефіцієнту відбиття від модулю коефіцієнту контрастності та відповідна похідна.

З рис. 6 видно, що $R_{\theta\phi}$ із підвищенням k_{ktp} збільшується нелінійно, а швидкість його зростання швидко зменшується. Це призводить до практично важливих висновків:

– для отримання доволі значного коефіцієнту відбиття контрастність речовини у ВК може бути не дуже великою;

– якщо хвильовий опір речовини у ВК є меншим за хвильовий опір повітря, то навіть невелика

зміна контрастності призводить до набагато більшої зміни модулю коефіцієнту відбиття ніж для речовин, хвильовий опір яких є більшим за хвильовий опір повітря. Це є аналогічним випадку відбиття світла від межі при переході з більш оптично густого середовища до менш оптично густого.

Рис. 6. Залежність модулю коефіцієнту відбиття та його похідної від модулю коефіцієнту контрастності

У табл. 1 наведені фізичні властивості деяких речовин [22–27] та результати розрахунків $|\dot{Z}_c|$, $k_{ктр}$, $R_{вд}$ для $f=3$ ГГц. Дійсна частина відносної діелектричної проникності ϵ для металів формально може бути визначена рівною 1 [28]. Величина μ наведена для випадку слабких полів, а значення втрат – для $f=3$ ГГц.

Таблиця 1
Фізичні та розрахункові електричні властивості деяких речовин

Речовина	Повітря сухе	Алюміній	Залізо електротех.	Al_2O_3	Fe_3O_4
ϵ	1,00058	1	1	9,6	9,5
$tg\delta_\theta$	–	–	–	$1 \cdot 10^{-4}$	–
σ_p , См/м	$2,4 \cdot 10^{-13}$	$3,3 \cdot 10^7$	$7,1 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^{-14}$	$2 \cdot 10^4$
$(\mu-1) \times 10^6$	0,38	21	$2,5 \cdot 10^8$	-37	$7 \cdot 10^7$
$tg\delta_m$	–	–	7750	–	6800
Густина ρ_p , кг/м ³	1,29	2700	7850	3990	5200
$ \dot{Z}_c $, Ом	377,2	0,015	$5,2 \cdot 10^5$	121,8	$8,4 \cdot 10^4$
$k_{ктр}$	1	$3,9 \cdot 10^{-5}$	1392	0,32	223
$R_{вд}$	0	0,99994	0,99898	0,51	0,99367

З аналізу табл. 1, рис. 6 та виразу для хвильового опору випливає, що кращі відбивні властивості

демонструють речовини із одночасно малою комплексною магнітною і великою комплексною діелектричною проникністю, тобто діамантні провідники. Речовина-наповнювач ВК, крім відповідних електричних властивостей, також має мати ще певні фізичні характеристики. Зокрема за атмосферних температур і тиску її густина ρ_p не повинна значно відрізнятися від густини повітря, а елементарні складові частинки мають вільно рухатись. Таким додатковим умовам відповідають речовини у газоподібному стані.

Діелектрична та магнітна проникність газів обумовлена будовою їх молекул і кількістю речовини у одиниці простору (густиною) [29]. В якості ілюстрації у табл. 2 наведені діелектрична проникність та густина неполярної речовини бензолу (C_6H_6) і полярної речовини етанолу (C_2H_5OH) у рідкому та газоподібному стані за атмосферного тиску [30].

Таблиця 2
Діелектрична проникність бензолу (C_6H_6) та етанолу (C_2H_5OH) за різних фізичних станів [30]

Речовина	Стан	T , °C	ϵ	ρ_p , г/см ³
Бензол (C_6H_6)	рідина	17	2,34	0,883
	пара	100	1,0026	0,0025
Етанол (C_2H_5OH)	рідина	14	27	0,798
	пара	100	1,0051	0,0015

З табл. 2 видно, що перехід речовини із рідкого стану до газоподібного значно зменшує її ϵ . Необхідно зауважити, що у полярних речовин в газоподібному стані діелектрична проникність залишається більшою, ніж у неполярних, що обумовлено внутрішньою будовою їх молекул [29].

Таким чином мала кількість речовини у одиниці об'єму (мала густина) у газоподібному стані робить неможливою великі значення діелектричної чи магнітної проникності. Провідність газів за нормальних умов також є нехтовно малою [29] навіть при додаванні легкоіонізуємих домішок [31–33].

Можливим шляхом підвищення $\epsilon_{ВК}$ та $\mu_{ВК}$ може бути додавання у потік газу, з якого формується ВК, речовин із великими ϵ , $tg\delta_\theta$, σ_p , μ , або $tg\delta_m$ у дрібнодисперсному стані.

За відсутністю хімічної взаємодії між компонентами суміші її властивості можуть бути оцінені за формулою В.І. Оделевського [34–37]. Для діелектричної проникності це виглядатиме як:

$$\epsilon_\Sigma = \epsilon_1 \left(1 + \frac{Q_2}{\frac{1-Q_2}{3} + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1}} \right), \quad (5)$$

де ε_Σ , ε_1 , ε_2 – відповідно діелектрична провідність суміші і речовин, що її складають;

Q_2 – питома частина речовини 2 у суміші за об'ємом.

Вираз (5) є тим точнішим, чим менше різниця властивостей складових суміші [34].

Але на такому шляху зміни електричних властивостей вмісту ВК є декілька перешкод.

По-перше, властивості суміші залежать від питомих об'ємних часток складових (див. рівняння (5)). Додавання у газ великої кількості порошку речовини, густина якої є на декілька порядків більшою за густину газу, призводить до зміни фізики руху частинок, в наслідок чого вини не утримуються у потоці, а також дуже швидко коагулюють [38–39].

По-друге, для сумішей речовин із суттєво різними властивостями мають місце перколяційні ефекти, коли є певне порогове значення k_{npz} для кількості домішки, при переході через яке властивості суміші змінюються стрибкоподібно [40–41].

Наприклад, при додаванні порошку провідника до діелектричної основи за $k_{npz} > Q_2$ провідність суміші близька до провідності діелектрика, а за $k_{npz} < Q_2$ – стрибкоподібно збільшується до значень, притаманних провідникам ($k_{npz} \sim 0,3$).

По-третє, якщо електрична властивість речовини залежить від її структури, то із подрібненням можуть відбуватися як лінійні, так і нелінійні зміни цих властивостей. Прикладом лінійних змін є зростання питомого опору порошоків металів із зменшення розміру частинок [42].

А яскравим прикладом нелінійних перетворень є магнітні властивості магнетиту (Fe_3O_4), який в залежності від розміру частинок може виявляти як феро-, так і парамагнітні властивості [43].

По-четверте, із зменшенням частинок збільшується їх питома поверхня, внаслідок чого може відбуватися хімічна взаємодія між додаванням речовиною і складовими повітря [44]. Прикладом такого процесу є пірофорне залізо, яке ярко спалахує у повітрі.

Таким чином в якості наповнювача ВК доцільно використовувати речовини, які в інтервалі звичайних температур і тисків у тропосфері знаходяться у газоподібному стані і мають відносно високу діелектричну проникність. Прикладом таких речовин можуть бути полярні гази на кшталт аміаку ($\varepsilon_{NH_3} = 1,0076$ [29]).

Обґрунтувавши можливий вибір наповнювача для ВК, перейдемо до визначення його бістатичної ЕПР.

4. Діаграма розсіювання вихрового кільця

Хоча тор і відносять до тіл із простою формою [17], але рішення задачі розсіювання ЕМХ на торі досі не має точного розв'язання [17; 45]. Тому для оцінки бістатичної ЕПР ВК $\sigma(\Theta_1, \Theta)$ було використано пакет програм вирішення електродинамічних задач Altair Feko.

Вихідні дані для моделювання діаграм розсіювання (ДР) ВК наведені у табл. 3. Геометричні розміри ВК обрані з огляду на експериментальні дані [9]. Частота ЕМХ f обрана із врахуванням робочих частот сучасних і перспективних засобів тропосферного радіозв'язку [46]. Кут опромінення ШТН $\Theta_1 = 85^\circ$.

Таблиця 3

Вихідні дані для моделювання ДР ВК

Параметр	Значення
$R_{BK} (r_{BK}), \text{ м}$	1 (0,2)
	2 (0,4)
ε_{BK}	1,0076 (аміак)
$f, \text{ ГГц}$	4,5
	14,5

Результати моделювання наведені на рис. 7–10. З рис. 7–10 видно, що ДР мають порізаний характер, а рівень перевипромінювання під кутами, близькими до нормалі до площі ВК, для горизонтальної поляризації є більшим, ніж для вертикальної.

Очікувано, що із збільшенням електричних розмірів ВК його ДР стає більш порізаною, а ширина головної пелюстки ДР зменшується.

Вплив обставин, що ШТН перебуває у атмосферному повітрі, а не у вакуумі, вносить похибку у результати розрахунків, але у нашому випадку її середнє значення є меншим за 1 дБ.

Через те, що ВК є рухомим перевідбивачем, його ДР у напрямку на приймач може зазнавати певних коливань. Тому для оцінки медіанного рівня перевідбиття була проведена статистична обробка ДР ВК в діапазоні кутів $\Theta = 270..300^\circ$ із шагом осереднення $\Delta_{oc} = 2,5^\circ$ і зсувом $\delta_{oc} = 1,25^\circ$. Результати виконаних розрахунків наведено на рис. 11.

З рис. 11 видно, що навіть середній рівень перевідбиттів зазнає сильних коливань від кута спостереження, що може призводити до завмирань сигналу на вході приймача.

Для оцінки викривлень сигналів, перевідбитих від ВК, оцінимо, як змінюється рівень перевідбиття у заданому напрямку Θ_2 із зміною частоти падаючої ЕМХ:

$$\Delta\sigma(f) = \frac{\sigma(\Theta_1, \Theta_2) \Big|_{f=\text{var}}}{\sigma(\Theta_1, \Theta_2) \Big|_{f=\text{const}}} \quad (6)$$

Результати моделювання для $R_{BK}=1$ м, $f=4,5$ ГГц, $\Theta_1=85^\circ$ наведені на рис. 12.

Порівнюючи рис. 12 і рис. 7 можна зробити висновок, що в районі локальних мінімумів ДР коефіцієнт перевідбиття із частотою змінюється набагато швидше, ніж у районі максимумів.

Рис. 7. Бістатична ЕПР ВК ($R_{BK}=1$ м, $f_0=4,5$ ГГц)

Таким чином ШТН у вигляді ВК може перевищувати радіосигнали у широкій смузі частот без суттєвого викривлення. Далі порівняємо рівень перевідбиття ШТН у вигляді ВК із рівнем перевідбиття від природних неоднорідностей тропосфери та дифракції на земній поверхні.

Рис. 8. Бістатична ЕПР ВК ($R_{BK}=2$ м, $f_0=4,5$ ГГц)

Рис. 9. Бістатична ЕПР ВК ($R_{BK}=1$ м, $f_0=14,5$ ГГц)

Рис. 10. Бістатична ЕПР ВК ($R_{BK}=2$ м, $f_0=14,5$ ГГц)

Перед виконанням порівнянь необхідно зауважити, що проведені у цьому пункті розрахунки є оці-

ночними, тому що в умовах реальної турбулентної тропосфери ВК не матиме ідеальної тороподібної

форми. З іншого боку, наявний експериментальний матеріал свідчить, що ці відхилення тим менші, чим більшими є геометричні розміри ВК. З огляду на вищесказане для розрахунків використаємо найпростіші моделі для кожного з механізмів ПРХ, що враховують лише "базові" (медіанні) втрати ($M_{МП} = L_{bdf}$, $M_{ПН} = L_{bts}$).

Рис. 11. Осереднена ДР ВК:

- 1 – $R_{BK}=1$ м, $f_0=4,5$ ГГц;
- 2 – $R_{BK}=2$ м, $f_0=4,5$ ГГц;
- 3 – $R_{BK}=1$ м, $f_0=14,5$ ГГц;
- 4 – $R_{BK}=2$ м, $f_0=14,5$ ГГц.

Рис. 12. Залежність рівня перевідбиття ШТН у вигляді ВК ($R_{BK}=1$ м, $f=4,5$ ГГц, $\Theta_1=85^\circ$)

від частоти ЕМХ:

- 1 – $\Theta_2=270^\circ$; 2 – $\Theta_2=272^\circ$; 3 – $\Theta_2=274^\circ$;
- 4 – $\Theta_2=276^\circ$; 5 – $\Theta_2=278^\circ$; 6 – $\Theta_2=280^\circ$

5. Співвідношення рівня перевідбиттів від земної поверхні за дифракції, від природніх неоднорідностей тропосфери за ДТР та від ШТН у тропосферному радіо-каналі

Для розрахунку L_{bdf} та L_{bts} припустимо, що:

– схема радіотраси відповідає рис. 4, підстиль на земна поверхня є гладкою, кути закриття дорівнюють 0, а рефракція на трасі є стандартною;

– висоти мають значення $h_{ШТН}=100$ м, $h_{анр\delta}=4$ м, $h_{анр}=4$ м, а відстань $d_1=d_2$;

– передавач і приймач мають однакові антени із шириною діаграми направленості $2\Theta_{0,5}=2,5^\circ$.

За стандартної рефракції максимальна дальність прямої видимості між ШТН і ПРД дорівнює:

$$d_1 = 4,12 \left(\sqrt{h_{ШТН}} + \sqrt{h_{анр\delta}} \right). \quad (7)$$

Дифракційні втрати визначаються як [16]:

$$L_{bdf} = -F_X - G(Y_t) - G(Y_r), \quad (8)$$

де F_X – складова втрат, що залежить від відстані та частоти;

$G(Y_t)$ та $G(Y_r)$ – складові, що залежать від частоти, а також висот підйому передавальної та приймальної антен.

Втрати за ДТР визначаються відповідно до [3]:

$$L_{bts} = -[59,2 + 10 \lg(f) + 0,05(d_1 + d_2)] \quad (9)$$

Результати розрахунків за виразами (7–9) наведені у табл. 4.

Таблиця 4

Результати розрахунків

Параметр	Значення	
f_0 , ГГц	4,5	14,5
d_1, d_2 , км	49	
L_{bdf} , дБ	-155	-212
L_{bts} , дБ	-71	-76

При порівнянні результатів розрахунків, наведених на рис. 11 та у табл. 4, видно, що рівень перевідбиттів від ШТН у вигляді ВК є значно більшим за рівень перевідбиттів від земної поверхні за дифракції та від природніх неоднорідностей тропосфери за ДТР. Тобто у тропосферному РК, який є каналом із завмираннями і розсіюванням, виникає домінуючий відбивач. В такому випадку закон розподілу сигналу на вході приймача має змінитись із закону Релея на закон Релея-Райса [2], що призводить до зменшення похибки при передаванні сигналів, яка обумовлена статистичними властивостями РК.

Висновки

На сучасному етапі розвитку науки і техніки є можливість створення у нижньому шарі тропосфери штучних неоднорідностей із тривалим часом існування у вигляді вихрових кілець. За наповнення ВК радіоконтрастною речовиною, можна отримати рухомий піднятий перевідбивач радіохвиль.

Теоретично, в якості наповнювача краще обирати парамагнітні речовини із великою провідністю, хвильовий опір яких є меншим за хвильовий опір

повітря. Але на практиці можливим є використання полярних речовин, які за атмосферних температур і тиску перебувають у газоподібному стані.

Виконане моделювання діаграми розсіювання ШТН у вигляді ВК під малими кутами ковзання показує високий середній рівень перевідбиттів від ШТН у порівнянні із розрахунковим рівнем перевідбиттів від земної поверхні за дифракції та природніх неоднорідностей тропосфери за ДТР для радіотраси типу

"точка-точка". Також результати розрахунків свідчать, що такі ШТН можуть перевипромінювати радіосигнали у широкій смузі частот без суттєвого викривлення.

Поява домінуючого перевідбивача в тропосферному РК призведе до зміни закону розподілу сигналу на вході приймача і зменшення похибки прийому сигналів, яка обумовлена статистичними властивостями радіоканалу.

Список літератури

1. Шиллеров Б.А. Распространение ультракоротких радиоволн / Б.А. Шиллеров. – М.: Сов. радио, 1954. – 564 с.
2. Ширман Я.Д. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех / Я.Д. Ширман, В.Н. Манжос. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.
3. Введенский Б.А. Дальнее тропосферное распространение ультракоротких радиоволн / Б.А. Введенский. – М.: Сов. радио, 1965. – 415 с.
4. Бин Б.Р. Радиометеорология: пер. с англ. / Б.Р. Бин, Е.Дж. Даттон, под ред. А.А. Семенова. – Л.: Гидрометеиздат, 1971. – 368 с.
5. Райзер Ю.П. Пробой и нагревание газов под действием лазерного луча / Ю.П. Райзер // Успехи физических наук. – 1965. – № 1(87). – С. 29-64.
6. Kulemin G.P. Radar reflections from explosion and gas wake of operating engines / G.P. Kulemin, V.B. Razskazovsky // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1997. – No. 4(45). – P. 731-739. <https://doi.org/10.1109/8.564100>.
7. Kulemin G.P. Centimeter and millimeter-wave radio signals attenuation in explosions / G.P. Kulemin, V.B. Razskazovsky // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1997. – No. 4(45). – P. 740-743. <https://doi.org/10.1109/8.564101>.
8. Кузнецов А.А. Метеотрон: монография / А.А. Кузнецов, Н.Г. Конопасов. – Владимир: Изд. ВлГУ, 2015. – 232 с.
9. Русаков Ю.С. Динамика вертикального движения турбулентного вихревого кольца / Ю.С. Русаков // Известия АН. Физика атмосферы и океана. – 2001. – № 6(37). – С. 1-11.
10. Штучні тропосферні неоднорідності для утворення радіоканалів із покращеними властивостями / В.Д. Карлов, А.В. Крижний, В.Л. Місайлов, В.В. Сидоров, Є.О. Рябконов // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2013. – № (27). – С. 27-30.
11. Місайлов В.Л. Властивості вихрових кілець як радіолокаційних цілей на різних етапах їх існування / В.Л. Місайлов // Системи озброєння і військова техніка. – 2020. – № 1(61). – С. 51-59. <https://doi.org/10.30748/soivt.2020.61.06>.
12. Handbook on radiometeorology [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/hdb/R-HDB-26-2013-OAS-PDF-E.pdf.
13. Middleton D. Multidimensional detection and extraction of signals in random media / D. Middleton // Proceedings of the IEEE. – 1970. – No. 5(58). – P. 696-706. <https://doi.org/10.1109/PROC.1970.7724>.
14. Радиолокационные характеристики летательных аппаратов / М.Е. Варганов, Ю.С. Зиновьев, Л.Ю. Астанин и др.; под ред. Л.Т. Тучкова. – М.: Радио и связь, 1985. – 236 с.
15. Азрилянт П.А. Численные результаты теории дифракции радиоволн вокруг земной поверхностью / П.А. Азрилянт, М.Г. Белкина. – М.: Сов. радио, 1957. – 44 с.
16. Фок В.А. Проблемы дифракции и распространения электромагнитных волн / В.А. Фок. – М.: Сов. радио, 1970. – 520 с.
17. Crispin J.W.Jr. Methods of Radar Cross-Section Analysis / J.W.Jr. Crispin, K.M. Siegel. – Cambridge: Academic Press, 1968. – 440 p.
18. Akhmetov D.G. Vortex rings / D.G. Akhmetov. – Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. – 150 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-05016-9>.
19. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн / Ф.Б. Черный – М.: Сов. радио, 1972. – 463 с.
20. Баскаков С.И. Электродинамика и распространение радиоволн / С.И. Баскаков. – М.: Высш. шк., 1992. – 416 с.
21. Пименов Ю.В. Техническая электродинамика / Ю.В. Пименов, В.И. Вольман, А.Д. Муравцев; под ред. Ю.В. Пименова. – М.: Радио и связь, 2000. – 536 с.
22. Справочник по электротехническим материалам. Т. 1 / под ред. Ю.В. Корицкого и др. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 368 с.
23. Справочник по электротехническим материалам. Т. 2 / под ред. Ю.В. Корицкого и др. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 464 с.
24. Справочник по электротехническим материалам. Т. 3 / под ред. Ю.В. Корицкого и др. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 726 с.
25. Westphal W.B. Dielectric constant and loss data. M.I.T. Tech. Report AFML-TR-72-39 [Електронний ресурс] / W.B. Westphal, A. Sils. – Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1972. – 224 p. – Режим доступу: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/746686.pdf>.
26. Таблицы физических величин. Справочник / под ред. акад. И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.
27. Tables of dielectric materials. Vol. IV. [Електронний ресурс]. – Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1953. – 155 p. – Режим доступу: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/005843.pdf>.
28. Ашкрофт Н. Физика твердого тела. Т.2 / Н. Ашкрофт, Н. Мермин. – М.: Мир, 1979. – 422 с.

29. Сканив Г.И. Физика диэлектриков (область слабых полей) / Г.И. Сканив. – М.: – Л.: Изд. ТТЛ, 1949. – 500 с.
30. Лебедев П.Н. Об измерении диэлектрических постоянных паров и о теории диэлектриков Моссотти – Клаузиуса / П.Н. Лебедев. – М.: Изд. АН СССР, 1963. – 30 с.
31. Энгель А. Ионизированные газы / А. Энгель. – М.: Гос. изд-во физ. мат. лит-ры, 1959. – 332 с.
32. Зимин Э.П. Определение оптимальных составов газовых смесей при наличии легкоионизируемой добавки / Э.П. Зимин, В.А. Попов // ПМТФ. – 1962. – № 3. – С. 10-14.
33. Кринберг И.А. Электропроводность воздуха в присутствии примеси / И.А. Кринберг // ПМТФ. – 1965. – № 1. – С. 76-82.
34. Эдвабник В.Г. К теории обобщенной проводимости смесей [Электронный ресурс] / В.Г. Эдвабник // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1. – С. 1-51. – Режим доступа: <https://www.science-education.ru/pdf/2015/1-2/68.pdf>.
35. Виноградов А.П. К вопросу об эффективных параметрах метаматериалов / А.П. Виноградов, А.В. Дорофеев, С. Зухди // Успехи физических наук. – 2008. – Т. 178, № 5. – С. 511-518. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0178.200805e.0511>.
36. Виноградов А.П. Электродинамика композитных материалов / А.П. Виноградов. – М.: Эдиториал УРСС, 2001. – 208 с.
37. Yu Y. Study of the generalized mixture rule for determining effective conductivity of two-phase stochastic models / Y. Yu, X. Wu // Applied Geophysics. – 2010. – No. 7. – P. 210-2106. <https://doi.org/10.1007/s11770-010-0248-3>.
38. Фукс Н.А. Успехи механики аэрозолей / Н.А. Фукс. – М.: Изд. АН СССР, 1961. – 160 с.
39. Райст П. Аэрозоли. Введение в теорию / П. Райст. – М.: Мир, 1987. – 280 с.
40. Эфрос А.Л. Физика и геометрия беспорядка / А.Л. Эфрос. // Библиотечка “Квант”. – 1982. – № 19. – С. 1-270.
41. Тарасевич Ю.Ю. Перколяция: теория, приложения, алгоритмы / Ю.Ю. Тарасевич. – М.: Эдиториал УРСС, 2002. – 112 с.
42. McCrea J.L. Electrical resistivity as a characterization tool for nanocrystalline metals / J.L. McCrea, K.T. Aust, G. Palumbo, U. Erb // MRS Online Proceedings Library Archive. – 1999. – № 581. – P. 461-466. <https://doi.org/10.1557/PROC-581-461>.
43. Banerjee S.K. Ferrimagnetic properties of magnetite [Electronic resource] / S.K. Banerjee, B.M. Moskowitz // Springer Link, 1985. – P. 17-41. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0313-8_2.
44. Яцимирський В.К. Фізична хімія / В.К. Яцимирський. – К.: ВТФ Перун, 2007. – 512 с.
45. Bibby M.M. A high order numerical investigation of electromagnetic scattering from a torus and a circular loop / M.M. Bibby, C.M. Coldwell, A.F. Peterson // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2013. – № 7(61). – P. 3656-3661. <https://doi.org/10.1109/TAP.2013.2258316>.
46. Почерняев В.Н. Состояние и направления развития мобильных цифровых тропосферных систем связи / В.Н. Почерняев, В.С. Повхлеб // Системи озброєння і військова техніка. – 2018. – № 2(54). – С. 51-60. <https://doi.org/10.30748/soivt.2018.54.07>.

References

1. Shillerov, B.A. (1954), “*Rasprostranenie uljtrakorotkih radiovoln*” [The propagation of ultrashort radio waves], Sovetskoe radio, Moscow, 564 p.
2. Shirman, Ya.D. and Manzhos, V.N. (1981), “*Teoriya i tehnika obrabotki radiolokacionnoj informacii na fone pomeh*” [Theory and technique of processing radar information on the background of interference], Radio i svyaz, Moscow, 416 p.
3. Vvedenskij, B.A. (1965), “*Daljnee troposfernoe rasprostranenie uljtrakorotkih radiovoln*” [Far tropospheric propagation of ultrashort radio waves], Sovetskoe radio, Moscow, 415 p.
4. Bin, B.R. and Datton, E.J. (1971), “*Radiometeorologiya*” [Radiometeorology], Gidrometeoizdat, Leningrad, 368 p.
5. Rajjzer, Yu.P. (1965), “*Probojj i nagrevanie gazov pod dejstviem lazernogo luchja*” [Breakdown and heating of gases under the laser beam action], *Advances in Physical Sciences*, No. 1(87), pp. 29-64.
6. Kulemin, G.P. and Razskazovsky, V.B. (1997), Radar Reflections from Explosion and Gas Wake of Operating Engines, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, No. 4(45), pp. 731-739. <https://doi.org/10.1109/8.564100>.
7. Kulemin, G.P. and Razskazovsky, V.B. (1997), Centimeter and millimeter-wave radio signals attenuation in explosions, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, No. 4(45), pp. 740-743. <https://doi.org/10.1109/8.564101>.
8. Kuznecov, A.A. and Konopasov, N.G. (2015), “*Meteotron*” [Meteotron], Izdatel'stvo VIGU, Vladimir, 232 p.
9. Rusakov, Yu.S. (2001), “*Dinamika vertikal'nogo dvizheniya turbulentnogo vkhrevogo koljca*” [Dynamics of the vertical motion of a turbulent vortex ring], *News of the Academy of Sciences. Physics of the atmosphere and the ocean*, No. 6(37), pp. 1-11.
10. Karlov, V.D., Krizhnij, A.B., Misailov, V.L., Sidorov, V.V. and Ryabokon, E.O. (2013), “*Shtuchni troposferni neodnorodnosti dlya utvorenniya radiokanaliv iz pokraschenimi vlastivostyami*” [Artificial tropospheric inhomogeneities for the formation of radio channels with improved properties], *Control, navigation and communication systems*, No. 3(27), pp. 27-30.
11. Misailov, V.L. (2020), “*Vlastivosti vkhrovih kilec yak radiolokacijnih cilej na riznih etapah ih isnuvannya*” [Properties of vortex rings as radar targets at different stages of their lifetime], *Systems of Arms and Military Equipment*, No. 1(61), pp. 51-59. <https://doi.org/10.30748/soivt.2020.61.06>.
12. Handbook on radiometeorology, available at: www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/hdb/R-HDB-26-2013-OAS-PDF-E.pdf (accessed 15 February 2020).
13. Middleton, D. (1970), Multidimensional detection and extraction of signals in random media, *Proceedings of the IEEE*, No. 5(58), pp. 696-706. <https://doi.org/10.1109/PROC.1970.7724>.
14. Varganov, M.E., Zinovjev, Yu.S. and Astanin, L.Yu. (1985), “*Radiolokacionnye harakteristiki letatel'nyh apparatov*” [Radar characteristics of aircraft], Radio i svyaz, Moscow, 236 p.

15. Azrilyant, P.A. and Belkina, M.G. (1957), "Chislennyye rezultaty teorii difrakcii radiovoln vokrug zemnoj poverhnosti" [Numerical results of the diffraction theory of radio waves around the earth's surface], Sovetskoe radio, Moscow, 44 p.
16. Fok, V.A. (1970), "Problemy difrakcii i rasprostraneniya ehlektromagnitnyh voln" [Problems of diffraction and electromagnetic waves propagation], Sovetskoe radio, Moscow, 520 p.
17. Crispin, J.W.Jr. and Siegel, K.M. (1968), *Methods of Radar Cross-Section Analysis*, Academic Press, Cambridge, 440 p.
18. Akhmetov, D.G. (2009), *Vortex rings*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, 150 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-05016-9>.
19. Chernyj, F.B. (1972), "Rasprostranenie radiovoln" [Radiowaves propagation], Sovetskoe radio, Moscow, 463 p.
20. Baskakov, S.I. (1992), "Elektrodinamika i rasprostranenie radiovoln" [Electrodynamics and radio wave propagation], Vysshaya shkola, Moscow, 416 p.
21. Pimenov, Yu.V., Voljman, V.I. and Muravcev, A.D. (2000), "Tehnicheskaya ehlektrodinamika" [Technical electrodynamics], Radio i svyaz, Moscow, 536 p.
22. Korickij, Yu.V. (1986), "Spravochnik po ehlektrotehnicheskim materialam. T. 1" [Handbook of Electrical Materials. Vol.1], Energoatomizdat, Moscow, 368 p.
23. Korickij, Yu.V. (1987), "Spravochnik po ehlektrotehnicheskim materialam. T. 2" [Handbook of Electrical Materials. Vol.2], Energoatomizdat, Moscow, 464 p.
24. Korickij, Yu.V. (1988), "Spravochnik po ehlektrotehnicheskim materialam. T. 3" [Handbook of Electrical Materials. Vol.3], Energoatomizdat, Moscow, 726 p.
25. Westphal, W.B. and Sils, A. (1972), *Dielectric constant and loss data. M.I.T. Tech. Report AFML-TR-72-39*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 224 p. available at: www.apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/746686.pdf (accessed 15 February 2020).
26. Kikoin, I.K. (1976), "Tablicy fizicheskikh velichin. Spravochnik" [Tables of physical quantities. Handbook], Atomizdat, Moscow, 1008 p.
27. (1953), *Tables of dielectric materials. Vol. IV*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 155 p. available at: www.apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/005843.pdf (accessed 15 May 2020).
28. Ashcroft, N. and Mermin, N. (1979), "Fizika tverdogo tela. T.2" [Solid state physics. Vol.2], Mir, Moscow, 422 p.
29. Skanavi, G.I. (1949), "Fizika dielektrikov (oblast slabych polei)" [Physics of dielectrics (region of weak fields)], Gosudarstvennoe izdatelstvo tehnicheskoy i teoreticheskoy literatury, Moscow-Leningrad, 500 p.
30. Lebedev, P.N. (1963), "Ob izmerenii dielektricheskikh postoyannykh parov i o teorii dielektrikov Mossotti – Klauziusa" [On the measurement of vapors dielectric constant and on the Mossotti-Clausius theory of dielectrics], Izdatelstvo AN SSSR, Moscow, pp. 11-30.
31. Engel, A. (1959), "Ionizirovannyye gazy" [Ionized gases], Gosudarstvennoe izdatelstvo fiziko-matematicheskoy literatury, Moscow, 332 p.
32. Zimin, E. and Popov, V. (1962), "Opredelenie optimalnykh sostavov gazovykh smesey pri nalichii legkoioniziruemykh dobavki" [Determining the optimal composition of gas mixtures in the presence of easily ionized additives], *Applied Mechanics and Technical Physics*, No. 3, pp. 10-14.
33. Krinberg, I.A. (1965), "Elektroporovodnost vozduha v prisutstvii primesi" [Conductivity of air in the presence of impurities], *Applied Mechanics and Technical Physics*, No. 1, pp. 76-82.
34. Edvabnik, V.G. (2015), "K teorii obobshchennoy provodimosti smesey" [To the theory of generalized conductivity of mixtures], *Modern problems of science and education*, No. 1, pp. 1-51, available at: www.science-education.ru/pdf/2015/1-2/68.pdf (accessed 15 May 2020).
35. Vinogradov, A.P., Dorofeenko, A.V. and Zouhdi, S. (2008), "K voprosu ob ehffektivnykh parametrokh metamaterialov" [On the problem of the effective parameters of metamaterials], *Advances in Physical Sciences*, Vol. 178, No. 51, pp. 511-518. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0178.200805e.0511>.
36. Vinogradov, A.P. (2001), "Elektrodinamika kompozitnykh materialov" [Electrodynamics of composite materials], Editorial URSS, 208 p.
37. Yu, Y. and Wu, X. (2010), Study of the generalized mixture rule for determining effective conductivity of two-phase stochastic models, *Applied Geophysics*, No. 7, pp. 210-2106. <https://doi.org/10.1007/s11770-010-0248-3>.
38. Fuks, N.A. (1961), "Uspehi mehaniki aehrozolei" [Advances in Aerosol Mechanics], Izdatelstvo AN SSSR, Moscow, 160 p.
39. Rajst, P. (1987) "Aehrozoli. Vvedenie v teoriyu" [Aerosols. Introduction to Theory], Mir, Moscow, 280 p.
40. Efros, A.L. (1982), "Fizika i geometriya besporiadka" [Physics and geometry of disorder], *The Library "Quantum"*, No. 19, pp. 1-270.
41. Tarasevich, Yu.Yu. (2002), "Perkolyatsiya: teoriya, prilozheniya, algoritmy" [Percolation: theory, applications, algorithms], Editorial URSS, Moscow, 112 p.
42. McCrea, J., Aust, K., Palumbo, G. and Erb, U. (1999), Electrical Resistivity as a Characterization Tool for Nanocrystalline Metals, *MRS Online Proceedings Library Archive*, No. 581, pp. 461-466. <https://doi.org/10.1557/PROC-581-461>.
43. Banerjee, S.K. and Moskowitz, B.M. (1985), Ferrimagnetic Properties of Magnetite, *Springer Link*, Boston, pp. 17-41. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0313-8_2.
44. Yacimirs'kiy, V.K. (2007), "Fizichna himiya" [Physical chemistry], VTF Perun, Kyiv, 512 p.
45. Bibby, M.M., Coldwell, C.M. and Peterson, A.F. (2013), A High Order Numerical Investigation of Electromagnetic Scattering From a Torus and a Circular Loop, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, No. 7(61), pp. 3656-3661. <https://doi.org/10.1109/TAP.2013.2258316>.

46. Pochernyaev, V.N. and Povhleb, V.S. (2018), "Sostoyaniye i napravleniye razvitiya mobilnykh cifrovyykh troposfernykh sistem svyazi" [Status and directions of mobile digital tropospheric communication systems development], *Systems of Arms and Military Equipment*, No. 2(54), pp. 51-60. <https://doi.org/10.30748/soivt.2018.54.07>.

Надійшла до редколегії 28.02.2020

Схвалена до друку 10.03.2020

Відомості про автора:

Місайлов Віталій Леонідович
кандидат технічних наук
старший науковий співробітник
докторант Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-5307-5474>

Information about the author:

Vitalii Misailov
Candidate of Technical Sciences
Senior Research Postdoctoral Student
of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-5307-5474>

СВОЙСТВА ТРОПОСФЕРНОГО РАДИОКАНАЛА С ИСКУССТВЕННЫМИ БЕЗОБОЛОЧНЫМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ

В.Л. Мисайлов

На современном этапе развития науки и техники существует возможность создания в нижнем слое тропосферы искусственных неоднородностей с длительным временем существования в виде вихревых колец. В случае заполнения вихревых колец радиоконтрастным веществом можно получить подвижной поднятый переотражатель радиоволн. Выполнены обосновывающие расчеты и разработаны рекомендации по выбору вещества для наполнения вихревых колец. Проведено моделирование диаграммы рассеяния искусственных неоднородностей тропосферы в виде вихревых колец под малыми углами скольжения. Моделирование показало высокий средний уровень переотражений от искусственных неоднородностей по сравнению с расчетным уровнем переотражений от земной поверхности при дифракции и от природных неоднородностей тропосферы для радиотрассы типа "точка-точка". Также результаты расчетов свидетельствуют, что такие неоднородности могут переизлучать радиосигналы в широкой полосе частот без их существенного искажения.

Ключевые слова: радиоканал, искусственная неоднородность, вихревое кольцо, диаграмма рассеяния.

PROPERTIES OF TROPOSPHERIC RADIOCHANNEL WITH ARTIFICIAL NONENVELOPED INHOMOGENEITIES

V. Misailov

At the present stage of the science and technology development, it is possible to create artificial inhomogeneities in the lower troposphere with a long lifetime in the vortex rings form. In the case of filling the vortex rings with radiocontrast material, it is possible to obtain a movable elevated radio reflector. Supporting calculations have been made and recommendations have been developed for choosing a substance for filling vortex rings. Theoretically, it is better to choose as a filler the paramagnetic substances with high conductivity, the wave resistance of which is less than the wave resistance of air. But in practice it is possible to use polar substances, which are in a gaseous state in the range of ordinary atmospheric temperatures and pressures. The scattering diagram of artificial inhomogeneities of the troposphere in the vortex rings form at shallow angles is modeled. The diagrams are peaked, the degree of indentation increases with increasing electrical dimensions of the vortex ring. The change in the level of rereflection of radio waves by a vortex ring for fixed directions to the transmitter and receiver with a change in frequency is estimated. The calculation results show that, when the frequency changes, the rereflection coefficient in the region of local minima of the vortex ring scattering diagram changes much faster than in the region of maxima. Thus, such inhomogeneities can re-emit radio signals in a wide frequency band without significant distortion. The levels of signals arriving at the receiving point due to diffraction on a smooth surface of the earth and due to scattering by natural inhomogeneities of the troposphere are calculated. A comparative analysis shows that for a point-to-point radio path, the average level of reflections from artificial inhomogeneities is significantly higher compared to the calculated level of reflections from the earth's surface during diffraction and from natural inhomogeneities of the troposphere. Thus, when intense artificial heterogeneities are introduced into the tropospheric radio channel, a dominant reflector appears in it. This leads to a change in the statistical characteristics of the radio channel.

Keywords: radiochannel, artificial inhomogeneity, vortex ring, scattering diagram.