

## **ВСТАНОВЛЕННЯ ГРАНИЦЬ СУТТЄВОЇ ПЕРЕВАГИ ПО ДАЛЬНОСТІ ВИЯВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ СИГНАЛІВ ІНФРАЧЕРВОНОГО ДІАПАЗОНУ В ПОРІВНЯННІ З ВИДИМИМ**

*Вдосконалення комплексів світлосигнального обладнання аеродромів ведеться в напрямку освоєння додаткових каналів інформації про ситуацію на посадковій смузі, синтезу багатоканальної інформації з виводом на єдиний екран візуалізації обстановки. Використання інфрачервоного діапазону електромагнітних хвиль для променево-сигнальних систем має ряд суттєвих переваг над системами світлового діапазону. Проте переваги по дальності виявлення ІЧ-сигналів мають природні межі.*

*Метою роботи є теоретичний аналіз умов, за яких дальності виявлення ІЧ-сигналу і світлосигналу зрівнюються у складних метеорологічних умовах.*

*У роботі показано, що збільшення концентрації водно-аерозольних часток, як і водності аерозолю, не змінюють співвідношення дальностей виявлення сигналів на різних довжинах хвиль. У той же час, збільшення розмірів часток нівелює переваги по дальності більш довгохвильових сигналів. На основі моделі аномальної дифракції одержано аналітичний вираз для радіусу сферичних водно-аерозольних частинок, при якому дальності виявлення сигналів на різних довжинах хвиль однакові за величиною.*

*На основі проведеного дослідження інтерпретуються розбіжності в експериментах за далеkobаченням «синтетичного зору» в умовах обмеженої видимості.*

*Ключові слова: видимий та інфрачервоний діапазони, дальність видимості, світлосигнальне обладнання, оптико-електронна система*

**Вступ.** Пошук та надання екіпажу повітряного судна (ПС) інформації про наземну ситуацію на посадковій смузі є запорукою успішного завершення польоту. Для цього використовуються радіотехнічні засоби, що забезпечують підльоти до аеродрому та

світлосигнальні – на кінцевих стадіях посадки ПС. Дальність видимості вогнів і сигналів злітно-посадкової смуги є найбільш важливим об'єктивним параметром безаварійності приземлення та є головним критерієм категорійної класифікації видимості в методиці International Civil Aviation Organization. Збільшення дальності видимості сигналів різних джерел, перекриття діапазонів різних каналів забезпечить неперервність потоку інформації, уніфікує експлуатаційні посадкові категорії. На сучасному етапі, вдосконалення комплексів світлосигнального обладнання ведеться в напрямку освоєння додаткових приладових каналів, синтезування інформації з них і виведення на єдиний екран візуалізації обстановки [1, 2].

Для ближнього та середнього орієнтування вискоефективними є системи інфрачервоного (ІЧ) діапазону електромагнітних хвиль (ЕМХ) внаслідок ряду їх параметричних переваг над радіолокаційними системами аналогічного призначення [3, 4]. Подальше вивчення факторів, що впливають на дальність поширення та виявлення світлових і променевих сигналів, надасть можливість більш ефективно використовувати переваги багатоканальних оптико-електронних систем (ОЕС).

**Аналіз публікацій.** Світлотехнічні засоби на останньому етапі посадки ПС мають вирішальне значення при переході від польоту по приладах і радіомаяках до візуального орієнтування, яке відбувається на відстанях  $\sim 3$  км. На вимоги установчих документів візуальний зліт та посадка дозволяються, якщо дальність видимості на злітно-посадковій смузі перевищує встановлені метеомінімуми. В експлуатації посадкових систем широко використовуються світлові сигнали різних джерел: ламп розжарювання, люмінесцентних ламп, світлодіодів [5, 6]. Для збільшення дальності видимості використовують як прості телескопічні системи, так і телевізійні (ТВ) ОЕС. Досвід ведення розвідки та спостереження показав перспективність комплексування модулів, які працюють на різних довжинах ЕМХ, в єдину багатоканальну ОЕС. Робота в довгохвильовому діапазоні має переваги за дальністю, але для ідентифікації об'єктів більш прийнятними є короткі хвилі. Використання лазерних круглоглісядних систем та імпульсних дальномірів можуть поєднуватися з інформаційними каналами інших видів [7, 8]. Однак, специфіка поширення лазерного променя в атмосфері, особливості конструкції лідарів вказують на те, що використання їх для зондування атмосфери та моніторингу поверхні Землі буде більш ефективним, ніж використання в якості сигнальних систем глісядного типу. В умовах обмеженої видимості наявність додаткового ІЧ-каналу інформації значно збільшує інтегральний показник ефективності комплексів світлосигнального обладнання аеродромів [9].

Для приладів, що працюють у видимому діапазоні ЕМХ, значна дальність досягається збільшенням потужності джерела, підвищенням яскравості сигнального пристрою та використанням додаткової оптики. Однак, розсіювання знижує контраст між сигналом і фоном до рівня невидимості сигналу. В цьому плані, використання ІЧ-діапазону для аеродромних джерел активного випромінювання в поєднанні з високочутливими приймачами на ПС буде більш вигідне як у технічному, так і в економічному сенсі. Це підтверджують розрахунки ефективності виявлення об'єктів тепловізійними засобами [10]. При низькій прозорості атмосфери більш високі результати ефективності показують прилади нічного бачення з матричними фотоприймачами з довгохвильовими областями фоточутливості [11].

Потенційно більша дальність поширення в мутному середовищі ЕМХ ІЧ-діапазону ніж світлових хвиль дає перевагу «синтетичному зору» над природним за ефективністю виявлення ЕМ-сигналів. Проте, існують умови, коли така перевага зникає. Є необхідність більш детально дослідити причини і механізми, що урівнюють функціональні можливості систем на різних довжинах ЕМХ.

**Мета роботи.** Аналітично дослідити механізми і параметри водно-аерозольного середовища, що нівелюють перевагу за дальністю виявлення сигналів більш довгих хвиль ІЧ-діапазону в порівнянні з видимим діапазоном.

**Виклад основного матеріалу.** Одна з найважливіших характеристик будь-якого оптико-електронного приладу (ОЕП) – дальність дії – визначається його головними технологічними параметрами та закономірностями поширення електромагнітних хвиль в даному середовищі.

На етапі високотехнологічних досягнень в одержанні напівпровідникових фотоприймачів природні обмеження є чи не найголовнішою перешкодою на шляху збільшення дальності «синтетичного зору». Задача взаємодії електромагнітного випромінювання з середовищем поширення в найбільш загальному вигляді була розв'язана для сферичних розсіювальних та поглинаючих часток Густавом Мі [12, 13]. Проте, результати теорії Мі, з причини надскладності математичних виразів, не піддаються аналоговій інтерпретації, а сама теорія потребує корекції для малих параметрів дифракції [14]. Зважаючи на це, застосовуються різного роду апроксимації та спрощені моделі, адекватні умовам конкретної задачі [15, 16]. Для моделі сферичних водних часток атмосферного аерозолі добре зарекомендувало себе в практичному застосуванні наближення Ван де Хюлста (аномальна дифракція), яке для «м'яких» часток справедливе в широкому діапазоні зміни параметрів розсіювання [15, 17].

Розглянемо монодисперсний аерозоль водних сферичних часток з радіусом  $r$  і поширення в ньому монохроматичних ЕМХ з довжинами  $\lambda$ : 0,554 мкм.; 1 мкм.; 4 мкм.; 10 мкм.

Вважатимемо діапазон значень параметру дифракції (параметр Мі)  $d = \frac{2\pi r}{\lambda}$  досить широким:

від  $d \ll 1$  до  $d \gg 1$ . З аналізу експериментальних та розрахункових спектральних залежностей комплексного показника заломлення чистої води при температурі 293°К, поглинанням при  $\lambda = 0,554$  мкм.,  $\lambda = 1$  мкм.,  $\lambda = 4$  мкм. і, з дещо більшою похибкою, при  $\lambda = 10$  мкм. можна знехтувати [18, 19, 20]. При великих розмірах часток з ростом  $r$  відносний вклад поглинання в загальний показник ослаблення зменшується, що підвищує точність результату при вказаних наближеннях. Тобто, для майже прозорих частинок, фактор ослаблення  $K_{осл.}$  визначається фактором розсіювання  $K_{роз.}$  ( $K_{осл.} \approx K_{роз.}$ ) [13]. У вказаних умовах розгляду величину перерізу розсіювання  $\sigma_\lambda(r)$  ЕМХ довжиною  $\lambda$  в наближенні аномальної дифракції можна представити:

$$\sigma_\lambda(r) \cong \pi r^2 K_{роз.}(a_\lambda r) = 2\pi \left[ r^2 - \frac{2}{a_\lambda} \cdot r \cdot \sin(a_\lambda r) + \frac{2}{a_\lambda^2} (1 - \cos(a_\lambda r)) \right], \quad (1)$$

$$\text{де } a_\lambda = \frac{4\pi(n_\lambda - 1)}{\lambda},$$

$n_\lambda$  – дійсна частина комплексного показника заломлення води на довжині хвилі  $\lambda$ .

Як бачимо, зі зростанням  $r$  переріз розсіювання, коливаючись майже періодично навколо квадратичної залежності від  $r$ , прямує до сталого значення  $\sigma_\lambda(r) = 2\pi r^2$ , яке досягається в нулях функції:

$$f(a_\lambda r) = -(a_\lambda r) \sin(a_\lambda r) + 1 - \cos(a_\lambda r). \quad (2)$$

Розв'язки рівняння  $f(a_\lambda r) = 0$  відносно  $r$  (крім  $r = 0$ ) представляють значення радіусів, при яких переріз розсіювання дорівнює величині  $2\pi r^2$ :

$$r_k = \frac{\pi(2k-1) - 2\varepsilon_k}{a_\lambda}; \quad \varepsilon_k = \frac{3\pi(2k-1) - \sqrt{9\pi^2(2k-1)^2 - 60}}{10}; \quad r_l = \frac{2\pi l}{a_\lambda}; \quad (3)$$

$$k = 1, 2, 3, \dots; \quad l = 1, 2, 3, \dots,$$

де  $\varepsilon_k$  визначено з точністю до квадратичного члену ряду в розкладі  $\text{ctg}(a_\lambda r)$ .

Збільшуючи кількість членів степеневого ряду в розкладі  $\text{ctg}(a_\lambda r)$  одержимо уточнені розв'язки (3):

$$r(k=1) = \frac{2,331122}{\alpha_\lambda}; \quad r(l=1) = \frac{2\pi}{\alpha_\lambda}; \quad r(k=2) = \frac{9,208434}{a_\lambda};$$

$$r(l=2) = \frac{4\pi}{a_\lambda}; \quad r(k=3) = \frac{15,579768}{a_\lambda} \dots$$
(4)

Характерним є те, що значення  $r_l$  мають чіткий період  $\frac{2\pi}{\alpha_\lambda}$ , а  $r_k$  повторюються зі змінним інтервалом, зменшуючись до  $\frac{2\pi}{\alpha_\lambda}$  при  $k \rightarrow \infty$ .

При однаковій чутливості приймачів дальність виявлення променів різної довжини хвилі  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$  в одному й тому ж середовищі з незмінною по координаті концентрацією часток  $N$  зрівнюється за умови:

$$\sigma(r, \lambda_1) = \sigma(r, \lambda_2). \tag{5}$$

Тобто, концентрація часток аерозолі не впливає на переваги по дальності тієї чи іншої довжини ЕМХ. Критичним в цьому плані є радіус часток  $r_m$ , величину якого можна визначити чисельним розв'язком рівняння (5). Аналітичну оцінку  $r_m$  можна провести за умови  $\lambda_2 \gg \lambda_1$ . У цьому випадку переріз розсіювання  $\sigma(r, \lambda_1)$  виходить на параболічну залежність від  $r$  при значно менших розмірах часток ніж  $\sigma(r, \lambda_2)$ , й умова (5) відбудеться в першому нулі ( $k = 1$ ) функції (2) для хвилі з  $\lambda_2$ , а саме в точці:

$$r_m \cong \frac{2,331122 \cdot \lambda_2}{4\pi[n(\lambda_2) - 1]}. \tag{6}$$

Так, наприклад, згідно з [21] перевага за дальністю виявлення сигналів з  $\lambda_2 = 10$  мкм. у водно-аерозольному середовищі ( $n(\lambda_2) = 1,2$ ) по відношенню до випромінювання в максимумі спектру чутливості ока ( $\lambda_1 = 0,554$  мкм.) буде до розмірів крапель з  $r_m \cong 9,3$  мкм. При  $r \geq r_m$  можна вважати, що дальності виявлення ЕМХ з  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$  зрівнюються.

Для значного підвищення точності формули (1) використаємо поправочний множник  $(1 + D)$  [15]. Тоді вираз (1) матиме вид:

$$\sigma_\lambda(r) = 2\pi \left[ r^2 + \frac{2}{a_\lambda^2} \cdot f(\alpha_\lambda \cdot r) \right] Q_\lambda(r), \tag{7}$$

де  $Q_\lambda(r) \equiv (1 + D)$  – поправочний множник [15], який для різних інтервалів зміни  $r$  можна записати:

$$Q_\lambda(r) = \begin{cases} \frac{(n_\lambda - 1)^2}{0,816n_\lambda} + \frac{0,8\pi r}{\lambda}; & r \leq \frac{5\lambda}{4\pi}; \\ \frac{\pi(n_\lambda - 1)^2 r}{1,02n_\lambda \lambda} + 1; & \frac{5\lambda}{4\pi} \leq r \leq \frac{1,02\lambda}{\pi(n_\lambda - 1)}; \\ \frac{1,02\lambda}{\pi n_\lambda r} + 1; & r > \frac{1,02\lambda}{\pi(n_\lambda - 1)}. \end{cases} \tag{8}$$

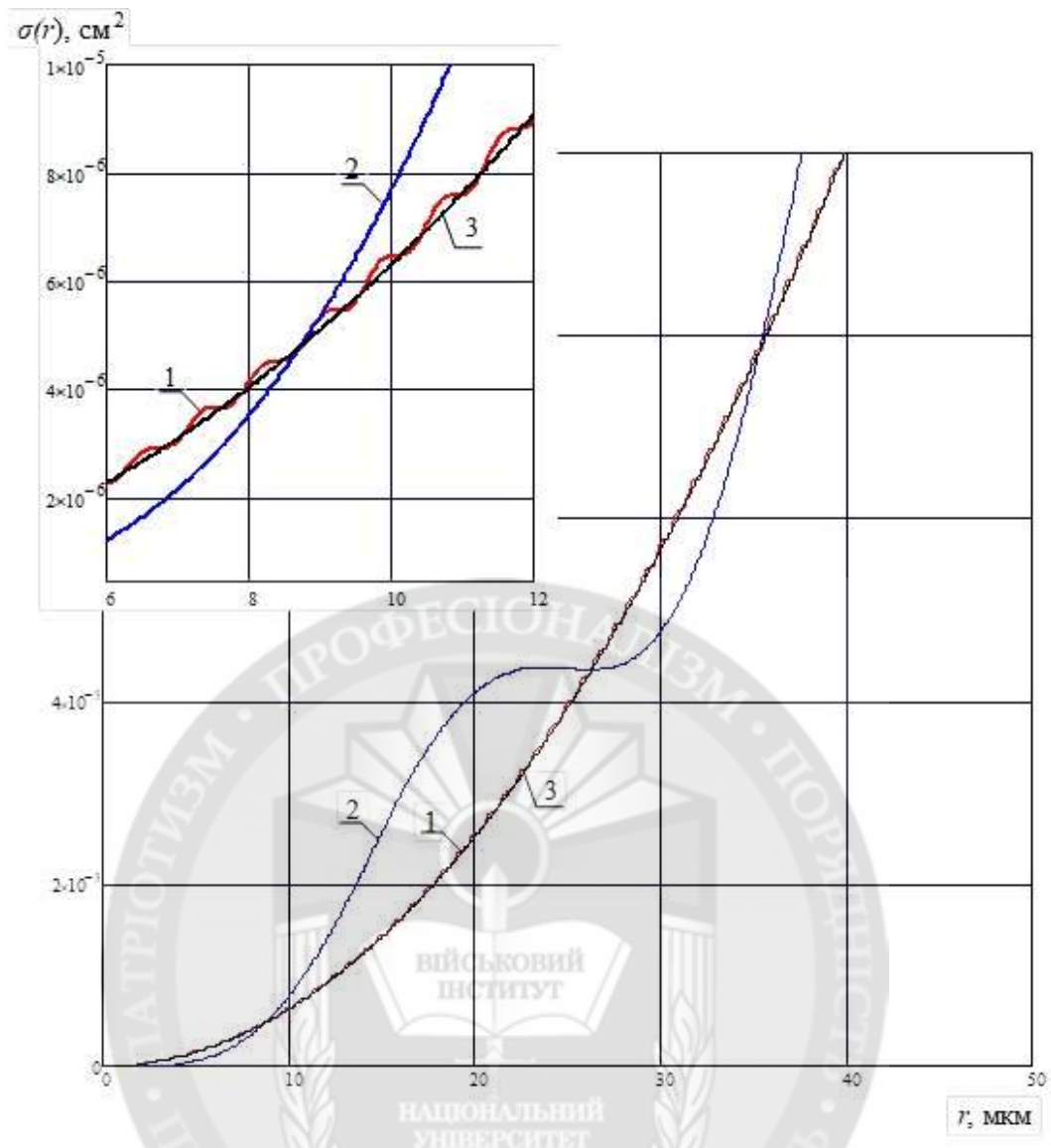


Рис. 1. Залежність перерізу розсіяння випромінювання від радіуса краплі води для довжин хвиль  $\lambda$ : 1 –  $\lambda = 0,554$  мкм. ( $n_\lambda = 1,33$ ); 2 –  $\lambda = 10$  мкм. ( $n_\lambda = 1,2$ ).

Крива 3 відповідає  $\sigma_i(r) = 2\pi r^2$

На рис. 1 представлені залежності перерізу розсіювання від радіуса часток водного аерозолі для двох довжин хвиль, розрахованих за співвідношеннями (7) і (8). На збільшеному відрізку графіка чітко видну точку перетину, в якій  $\sigma_{\lambda_1}(r) = \sigma_{\lambda_2}(r) = 2\pi r^2$ .

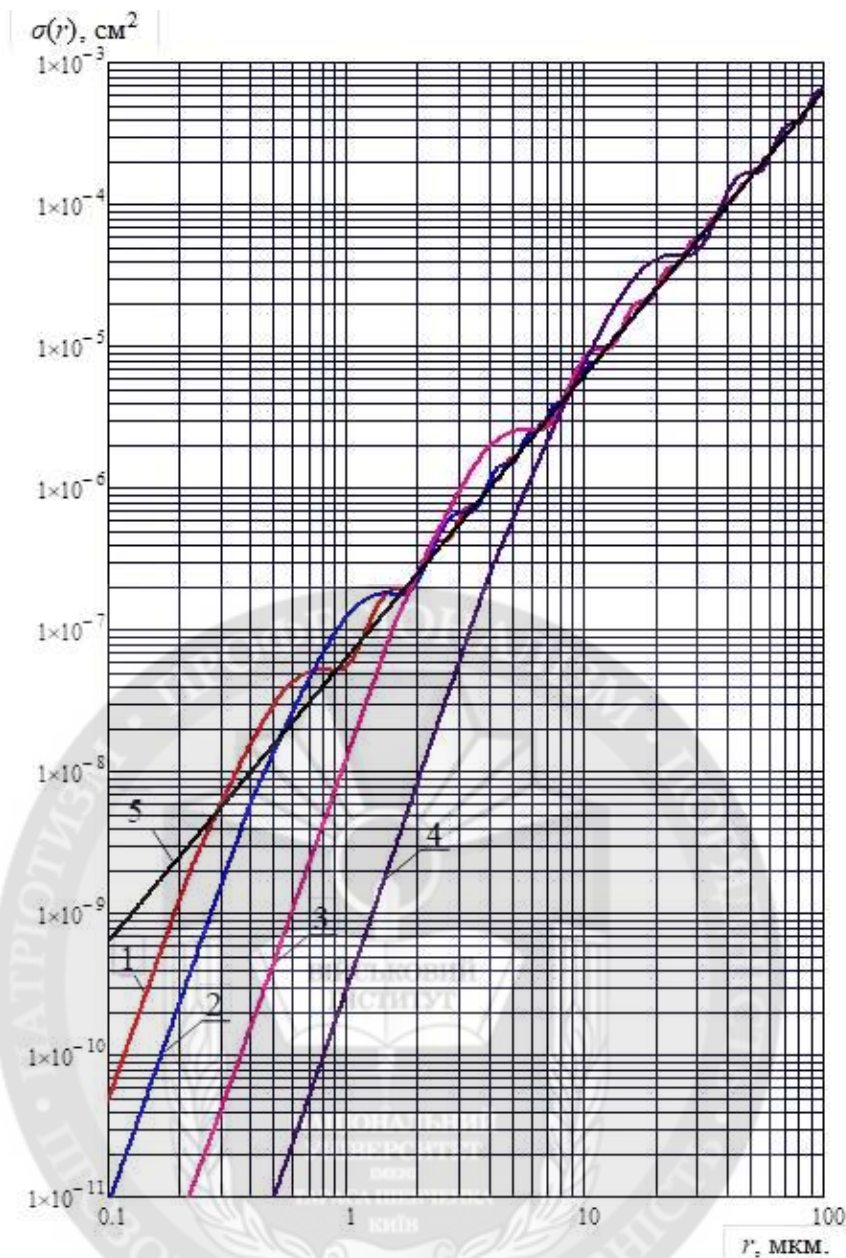


Рис. 2. Залежність перерізу розсіяння випромінювання від радіусу краплі води

для довжин хвиль  $\lambda$ : 1 –  $\lambda = 0,554$  мкм. ( $n_\lambda = 1,33$ ); 2 –  $\lambda = 1$  мкм. ( $n_\lambda = 1,32$ );

3 –  $\lambda = 4$  мкм. ( $n_\lambda = 1,34$ ); 4 –  $\lambda = 10$  мкм. ( $n_\lambda = 1,2$ );

Пряма 5 відповідає  $\sigma(r) = 2\pi r^2$

На рис. 2 представлені аналітичні залежності в логарифмічній шкалі для ЕМХ різної довжини хвилі. Зростання радіуса водяних крапель амплітуди відхилень кривих  $\sigma(r)$  від прямої 5 зменшуються, співпадаючи з прямою, при  $r \rightarrow \infty$ . Точки перетину кривих з прямою 5 відповідають значенням  $\sigma(r) = 2\pi r^2$ .

Оскільки реальні аерозолі практично не бувають монодисперсними, фіксувати концентрацію часток в кожному випадку не можливо. У цих випадках використовують об'ємну або вагову концентрацію водних часток  $q$  (водність), яка є інтегральним параметром системи розсіювальних частинок. Тоді натуральний показник розсіювання матиме вигляд:

$$\alpha(r, \lambda) = \frac{3q}{4\rho r^3} \cdot \sigma_\lambda(r), \quad (10)$$

де  $\rho$  – густина частинки.

Параметр  $q$  аналогічно концентрації  $N$  в однаковій мірі лінійно впливає на  $\alpha(r, \lambda)$  незалежно від довжини хвилі  $\lambda$ .

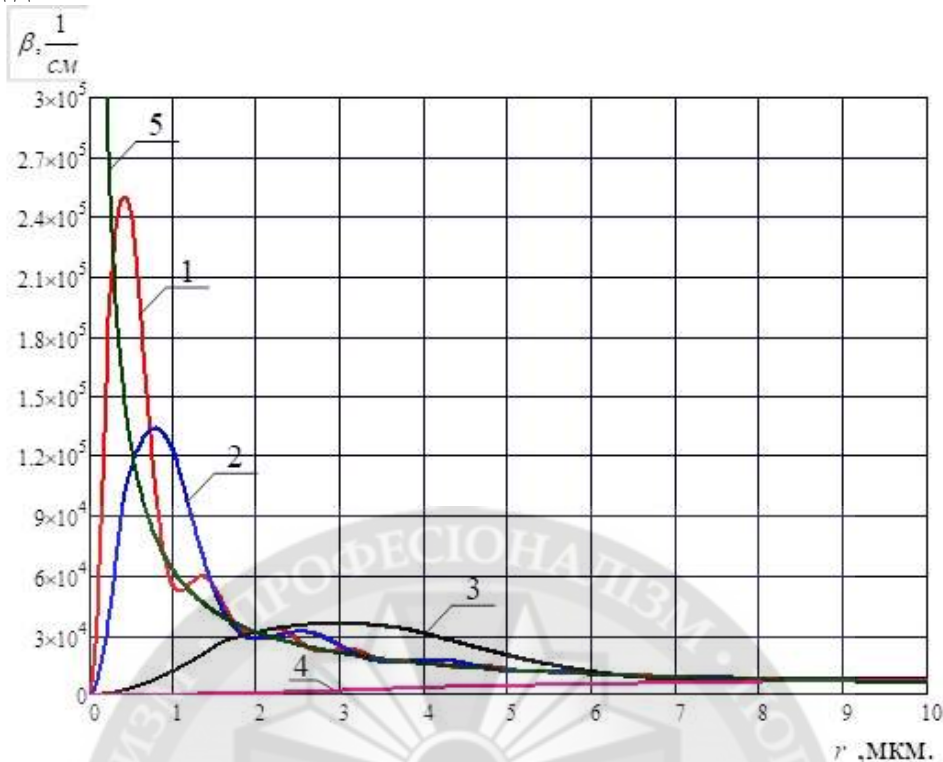


Рис. 3. Залежність нормованого натурального показника розсіяння випромінювання для системи водних частинок від їх радіуса для довжин хвиль  $\lambda$ : 1 –  $\lambda = 0,554$  мкм.; 2 –  $\lambda = 1$  мкм.; 3 –  $\lambda = 4$  мкм.; 4 –  $\lambda = 10$  мкм.; Крива 5 відповідає  $\sigma(r) = 2\pi r^2$

На рис. 3. представлені залежності нормованого натурального показника розсіювання  $\beta = \frac{\alpha(r, \lambda)}{C}$  для різних довжин хвиль  $\left( C = \frac{3q}{4\pi\rho} = Const \right)$ . Крива 5 на рис. 3 відповідає квадратичній залежності від  $r$  перерізу розсіювання, тобто значенню  $\alpha(r, \lambda) = \frac{3q}{2\rho \cdot r}$ , що, в свою чергу, відповідає  $K_{роз.} = 2$ .

Легко бачити, що і в цьому випадку точки перетину кривих  $\sigma_{1,2,3,4}(r)$  з кривою 5 повністю співпадають з аналогічними точками в моделі з незалежно змінними  $N$  і  $r$  (рис. 1 і рис. 2).

Якщо розглядати залежність дальності виявлення електромагнітного сигналу від  $\lambda$  за класифікацією Міжнародної організації цивільної авіації (ІКАО), то можливі два механізми зменшення дальності видимості: 1) за рахунок збільшення концентрації частинок; 2) за рахунок збільшення радіусу часток. У першому випадку від категорії I до категорії III б дальність виявлення для різних довжин хвиль буде пропорційно зменшуватись, залишаючись з перевагою за найдовшими  $\lambda$ . В другому випадку з переходом від категорії I до категорії III б. переваги довгих хвиль будуть нівелюватись і, при відповідних розмірах, ефективність за дальністю зрівняється. Наявність дифракційних горбів в залежностях  $\sigma(r)$  (рис. 2) при попаданні  $r$  в такі ділянки може призвести до зворотної ситуації – дальність виявлення короткохвильового сигналу буде більшою.

Одержані результати можуть дати відповідь на суперечливі дані щодо дослідження активно імпульсних систем (АІС) бачення в задимлених умовах. Так, в роботах [22, 23] зроблено висновок про непрацездатність АІС в традиційних областях спектру, а в роботі [24]

візуалізація об'єкту реалізується.

Напевно, в першому випадку значення  $\alpha(r, \lambda)$  завелике за рахунок збільшення радіусу розсіювальних і поглинаючих часток диму, а в другому – за рахунок збільшення їх концентрації при досить малих розмірах.

У разі встановлення на злітно-посадковій смузі аеродрому сигнальних ліхтарів з робочою частотою в довгохвильовому ІЧ-діапазоні більшість видів туманів та серпанків, непрозорих візуально, не будуть перешкодою для видимості з ПС і в денний, і в нічний час.

#### **Висновки:**

1. Збільшення концентрації аерозольних часток, аналогічно як і водності аерозолу, не змінюють співвідношення дальностей виявлення сигналу на різних довжинах хвиль.

2. Збільшення радіусу аерозольних часток зменшують переваги щодо дальності виявлення довгохвильових сигналів.

3. Мінімальний радіус аерозольних часток, при якому вирівнюється дальність виявлення сигналу на великій довжині хвилі  $\lambda$  з більш короткими, можна оцінити за формулою:

$$r \approx \frac{(\pi - 0,810471)\lambda}{4\pi[n(\lambda) - 1]}.$$

4. Для прогнозування переваг щодо дальності виявлення сигналу тим чи іншим приладом в мутних середовищах (серпанку, туману, хмар) критичною величиною є розмір розсіювальних часток, а не їх концентрація або водність.

5. Для досягнення максимальної ефективності за дальністю дії системи джерело - приймач є необхідним використання робочої довжини електромагнітних хвиль, виходячи з умови  $r < r_m$ .

#### **ЛІТЕРАТУРА:**

1. Попов Г.Н. Концепция построения оптико-электронных приборов наблюдения универсального назначения / Г.Н. Попов, Н.Н. Мордвин // Приборостроение. – 2009. – № 6. – Т 52. – С. 3-13. – URL: <https://cyberleninka.m/article/n/> (дата звернення 10.03.2018).

2. Оптические приборы наблюдения, обработки и распознавания объектов в сложных условиях [Б.С. Алешин, А.В. Бондаренко, В.Г. Волков, З.С. Драб, Л.М. Цибулькин]. М.: ГНИИАС, 1999. – 140с.

3. Якушенков Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов / Ю. Г. Якушенков – М.: Логос, 1999. – 480 с.

4. Грудинская Г.П. Распространение радиоволн / Г.П. Грудинская / 2-ое изд. перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1975. – С. 280. (глава IX. Особенности распространения радиоволн оптического и инфракрасного диапазонов)

5. Батусов С.В. Светосигнальные установки / С.В. Батусов. – М.: Энергия, 1979. – 120 с.

6. Дальность видимости сигнальных светодиодных огней // [В.И. Анисимов, В.П. Будак, В.В. Жуков, Г.А. Калашин, С.А. Шишкин]. Светотехника. – 2016. – №4. – С. 28-32.

7. Ставров А.А. Импульсные лазерные дальнометры для оптико-локационных систем / А. А. Ставров, М. Г. Поздняков / Доклады БГУИР, апрель – июнь 2003. – Т. 1. – № 2. – С. 59-65.

8. Карасик В.Е. Оценка предельной дальности видимости маяков и пространственных ориентиров лазерной круглоглиссальной системы в различных метеоусловиях / В.Е. Карасик, Е.Е. Мухина, В.М. Орлов // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – Вып. 9. – 14 с.

9. Зирянов Ю.Т. Оценка эффективности комплексов светосигнального оборудования аэродромов на основе моделирования процесса посадки в условиях ограниченной видимости / Ю. Т. Зирянов, В.М. Дмитриев // Научный вестник МГТУГА. – 2014. – № 2017. – С. 82-91.

10. Афанасьева Е.М. Методика оценки эффективности обнаружения объектов тепловизионными средствами / Е.М. Афанасьева, В.Г. Керков // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2013. – Т. 9. – №2. – С. 43-48.

11. Волков В.Г. Приборы ночного видения новых поколений / В.Г. Волков // Специальная техника. – 2007. – № 5. – С. 2-8.

12. Mie G., Ann d. Rhys, 25, 377, 1908.

13. Шифрин К.М. Рассеяние света в мутной среде / К.М. Шифрин. – М.: Государственное издание технико-теоретической литературы, 1957. – 289 с.

14. Козеев В.А. Неправомерность формул теории Ми при малых параметрах дифракции /



В.А. Козеев, Д.В. Козеев // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2010. – Т. 7. – №4. – С. 125-133.

15. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами / Д. Дейрменджан. – М.: Мир, 1971. – 165 с.

16. Шифрин К.С. Введение в оптику / К.С. Шифрин. – Ленинград: гидрометеиздат, 1983. – 281 с.

17. Ван де Хюлст Г. Рассеяние света малыми частицами / Г. Ван де Хюлст. – М., 1961. – 537 с.

18. Золотарев В. М. Оптические постоянные природных и технических сред / В.М. Золотарев, В.Н. Морозов, Е.В. Смирнова – Ленинград: Химия, 1984. – 215 с.

19. Ейзенберг Д. Структура и свойства воды / Д. Ейзенберг, В. Кауцман – Ленинград: Гидрометеиздат, 1975. – 271 с.

20. Зуев В.Е. Современные проблемы атмосферной оптики / В.Е. Зуев, М.В. Кабанов // Оптика атмосферного аэрозоля. – Т. 4. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1987. – 253 с.

21. Головенський В.В. Збільшення дальності виявлення аеродромних променевих сигналів у складних метеорологічних умовах / В.В. Головенський // Вісник Національного авіаційного університету. – Київ: Національний авіаційний університет, 2018. – Т. 74. – № 1.

22. Волков В.Г. Активно-импульсные ПНВ и тепловизионные приборы. Анализ возможностей применения / В.Г. Волков. Фотоника. – 2007. – № 4. – С. 24 – 28.

23. Кирпиченко Ю.Р. Видеоинформационные системы наблюдения и контроля при сложных условиях видимости / Ю.Р. Кирпиченко, М.И. Курячий, И.Н. Пустинский // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2012. – № 2 (26). – С. 105 – 110.

24. Дегтярев П.А. Исследование и разработка устройств получения видеосигнала в активно-импульсной телевизионной системе наблюдения: дис. канд. техн. наук: 05.12.04 / Павел Алексеевич Дегтярев; Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники – Томск, 2005. – 232 с.

#### REFERENCES:

1. Popov, G.N., Mordvin, N.N., (2009), “The concept of engineering optoelectronic surveillance instruments for universal use”, *Priborostroenie [Instrument engineering]*, vol. 52, no. 6, pp. 3-13, available at: <https://cyberleninka.m/article/n/>, (accessed March 10, 2018).

2. Aleshin, B.S., Bondarenko, A.V., Volkov, V.G., Drab, Z.S. & Tsibul'kin, L.M. (1999), “*Optical instruments for surveillance, processing and recognition of objects in difficult conditions*”, Gosudarstvennyj nauchno-issledovatel'skij institut aviacionnyh sistem, Moscow, 140 p.

3. Yakushenkov, Yu.G., (1999), “*Theory and analysis of optoelectronic instruments*”, Logos, Moscow, 480 p.

4. Grudinskaya, G.P., (1975), “Chapter IX. Features of propagation of radiowaves of optical and infrared ranges” *Radiowave propagation*, 2nd ed., Vysshaja shkola, Moscow, 280 p.

5. Batusov, S.V., (1979), *Lighting facilities*, Energiya, Moscow, 120 p.

6. Anisimov, V.I., Budak, V.P., Zhukov, V.V., Kaloshin, G.A. & Shishkin, S.A., (2016), “Range of visibility of signal LED lights”, *Svetotekhnika, [Lighting engineering]*, no. 4, pp. 28-32.

7. Stavrov, A.A., Pozdnyakov, M.G., (2003), “Pulse laser range finders for optical-location systems”, *Reports of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics*, Minsk, Belarus. April - June 2003, Otkrytoe Akcionernoe Obshchestvo «Peleng», vol. 1, no. 2, pp. 59-65

8. Karasik, V.E., Mukhina, E.E., Orlov, V.M., (2013) “Estimation of limiting range of visibility of beacons and spatial references of a laser round-lined system in various meteorological conditions”, *Inzhenernyj Zhurnal: Nauka i Innovacii, [Engineering Journal: Science and Innovation]*, Issue. 9, 14 p.

9. Ziryaynov, Yu.T., Dmitriev, V.M., (2014) “Estimation of the effectiveness of aerodrome lighting facilities complexes based on modeling of the landing process under low visibility conditions”, *Nauchnyj Vestnik Moskovskogo Gosudarstvennogo Tehnicheskogo Universiteta Grazhdanskoj Aviacii, [Research Journal of Moscow State Technical University of Civil Aviation]*, no. 2017, pp. 82-91.

10. Afanas'eva, E.M., Kerkov, V.G., (2013), “Methodology of estimation of efficiency of object detection by thermal imaging means”, *Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Tehnicheskogo Universiteta, [Journal of Voronezh State Technical University]*, vol. 9, no. 2, pp. 43-48.

11. Volkov, V.G., (2007), “Night Vision Equipment of New Generation”, *Special'naja tehnika, [Special equipment]*, no. 5, pp. 2-8.

12. Mie G., *Ann d. Rhys*, 25, 377, 1908.

13. Shifrin, K.M., (1957), *Light scattering by turbid medium*, Gosudarstvennoe izdanie tekhniko-

teoreticheskoj literatury, Moscow, 289 p.

14. Kozeyev, V.A., Kozeyev, D.V., (2010), "The illegitimacy of the formulas of the Mie theory at small diffraction parameters", *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, [Modern problems of remote sensing of the Earth from space.], vol. 7, no. 4, pp. 125-133.

15. Deyirmendjian D., (1971), *Electromagnetic Radiation Scattering by Spherical Polydisperse Particles*, Mir, Moscow, 165 p.

16. Shifrin, K.S., (1983), *Introduction to optics*, Gidrometeoizdat, Leningrad, 281 p.

17. Van de Hjulst G., (1957), *Light Scattering by Small Particles*, New York. John Wiley & Sons, Inc. London. Chapman & Hall, Ltd. 1957

18. Zolotarev, V.M., Morozov, V.N., Smirnova, E.V., (1984), *The Optical Constants of Natural and Technical Environments*, Khimiya, Leningrad, 215 p.

19. Eyzenberg, D., Kautsman, V., (1975), *The Structure and Properties of Water*, Gidrometeoizdat, Leningrad, 271 p.

20. Zuev, V.E. (Ed) (1987), "Modern problems of atmospheric optics", *Optics of atmospheric aerosol*, vol. 4, Gidrometeoizdat, Leningrad, 253 p.

21. Holovenskiy, V.V., (2018), Extending the detection range of aerodrome beam signals in adverse meteorological conditions, *Visnyk Natsionalnoho Aviatsiinoho Universytetu*, [Bulletin of the National Aviation University], Kyiv: National Aviation University, vol. 74, no 1.

22. Volkov, V.G., (2007), "Laser range-gated imaging system and thermal imaging devices. Analysis of application possibilities", *Fotonika*, [Photonics], no. 4, pp. 24-28.

23. Kirpichenko, Yu.R., Kuryachiy, M.I., Pustinskiy, I.N., (2012) "Video information surveillance and control systems under difficult visibility conditions", *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki* [Reports of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics], no. 2(26), pp. 105-110.

24. Degtyarev, P.A., (2005), "Research and development of video signal acquisition devices in an active-impulse television surveillance system", PhD diss, (05.12.04), Tomskij gosudarstvennyj universitet sistem upravleniya i radioelektroniki, Tomsk, 232 p.

**Рецензент: д.т.н., проф. Єлізаров О.І., професор Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського**

**Головенский В.В.**

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦ СУЩЕСТВЕННОГО ПРЕИМУЩЕСТВА ПО ДАЛЬНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИГНАЛОВ ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА В СРАВНЕНИИ С ВИДИМЫМ**

*Совершенствование комплексов светосигнального оборудования аэродромов ведется в направлении освоения дополнительных каналов информации о ситуации на посадочной полосе, синтеза многоканальной информации с выводом на единый экран визуализации обстановки. Использование инфракрасного диапазона электромагнитных волн для светосигнальных систем имеет ряд существенных преимуществ перед системами светового диапазона. Однако преимущества по дальности обнаружения ИК-сигналов имеют естественные границы.*

*Целью работы является теоретический анализ условий, при которых дальности обнаружения ИК-сигнала и светосигналов уравниваются в сложных метеорологических условиях.*

*В работе показано, что увеличение концентрации водно-аэрозольных частиц по водности аэрозоля, не изменяют соотношение дальностей обнаружения сигналов на различных длинах волн. В то же время, увеличение размеров частиц нивелирует преимущества по дальности более длинноволновых сигналов.*

*На основе модели аномальной дифракции получено аналитическое выражение для радиуса сферических водно-аэрозольных частиц, при котором дальности обнаружения сигналов на различных длинах волн одинаковы по величине. На основе проведенного исследования интерпретируются разногласия в экспериментах по дальновидению «синтетического зрения» в условиях ограниченной видимости.*

*Ключевые слова: видимый и инфракрасный диапазоны, дальность видимости, светосигнальное оборудование, оптико-электронная система.*

Holovenskyi V.V.

**ESTABLISHING BOUNDARIES OF SIGNIFICANT ADVANTAGE ON THE DETECTION RANGE OF ELECTROMAGNETIC SIGNALS OF THE INFRARED RANGE IN COMPARISON WITH THE VISIBLE ONE**

*Improvement of the complexes of airdrome lighting facilities is performed in the direction of mastering additional channels of information concerning the situation on the runway, the synthesis of multichannel information with the display on a single screen of the visualization of the situation. The use of the infrared electromagnetic waves range for beam signal systems has several advantages over light range systems. However, the advantages over the range of detection of IR signals have natural limits.*

*The purpose of the work is a theoretical analysis of the conditions under which the range of detection of an IR signal and light signal is equalized in adverse meteorological conditions.*

*It is shown in this work that an increase in the water aerosol particles concentration as well as in the water content of the aerosol does not change the ratio of the range of the detection of signals at different wavelengths. At the same time, an increase in the size of particles levels the advantages over the range of longer-wave signals. Based on the model of abnormal diffraction, an analytical expression for the radius of spherical water-aerosol particles was obtained, in which the range of detection of signals at different wavelengths is the same in magnitude.*

*Based on the research, the differences in the experiments on the range of “synthetic vision” in conditions of limited visibility are interpreted.*

*Keywords: visible and infrared ranges, range of visibility, lighting facilities and optoelectronic system*