

УДК 621.37(045)
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/13>

Тачиніна О.М.

Державне некомерційне підприємство
«Державний університет «Київський авіаційний інститут»

Слободян О.П.

Державне некомерційне підприємство
«Державний університет «Київський авіаційний інститут»

Єнчев С.В.

Державне некомерційне підприємство
«Державний університет «Київський авіаційний інститут»

Тачинін Є.В.

АТ «Антонов»

ВИЗНАЧЕННЯ ДАЛЬНОСТІ ВИЯВЛЕННЯ НИЗЬКОЛІТАЮЧИХ ЦІЛЕЙ ОГЛЯДОВОЮ РАДІОЛОКАЦІЙНОЮ СТАНЦІЄЮ

Виявлення та супровід низьколітаючих цілей здійснюється оглядовою радіолокаційною станцією. При цьому виникає ціла низка наукових, технічних та інженерних проблем, які потрібно вирішувати на етапах проектування й експлуатації радіолокаційної системи. На ефективність виявлення цілі радіолокаційною станцією впливають фізичні явища, які пов'язані з поширенням радіохвиль над поверхнею, технічні й технічні характеристиками низьколітаючих цілей, технічною реалізацією методів і пристроїв, що суттєво впливають на ефективність радіолокаційної станції щодо виявлення цілі. Однією з таких є актуальна наукова задача, що полягає у визначенні дальності виявлення низьколітаючої цілі радіолокаційною станцією з врахуванням фізичних явищ і тактико-технічних характеристик цілі. У статті досліджено вплив таких фізичних явищ: обмеження радіогоризонтом максимальної дальності виявлення через прямолінійне поширення радіохвиль; інтерференційні явища; маскування сигналу від цілі потужними відбиттями зондувального сигналу від підстилаючої поверхні; маскування сигналу від цілі подібними сигналами відбиття від атмосферних неоднорідностей на межі між підстилаючою поверхнею й атмосферою. Встановлено причини та досліджено траєкторії завад типу «ангел-відлуння» в системі координат дальність-пеленг. Проаналізовані та визначені залежності дальності від висоти установки антени, висоти цілі, ефективної площі розсіювання, довжини хвилі радіосигналів, потужності радіоімпульсу, діаграми спрямованості антени та температури зовнішнього повітря для моделей плоскої та сферичної Землі. Визначено залежності множника ослаблення від дальності та висоти цілі для моделей плоскої та сферичної Землі. Побудовані зони виявлення низьколітаючих цілей у нижньому промені діаграми спрямованості антени за моделлю сферичної Землі для різних висот установки антени, довжин хвиль радіосигналу, дальності радіогоризонту, ширини та кута установки променя. Запропоновані формули дозволяють розрахувати зони та дальності виявлення низьколітаючих цілей.

Ключові слова: радіолокаційна станція, низьколітаюча ціль, дальність виявлення, зона виявлення, ефективна поверхня розсіювання.

Постановка проблеми. При виявленні та супроводі низьколітаючих цілей (НЛЦ) оглядовою радіолокаційною станцією (РЛС) виникає ціла низка наукових, технічних та інженерних проблем, які потрібно вирішувати як на етапі її проектування, так і при використанні готової РЛС [1, 3, 6–8].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ефективність виявлення НЛЦ оглядовою

РЛС залежить від вирішення проблем, які зумовлені [6–8]:

- фізичними явищами, пов'язаними з поширенням радіохвиль над поверхнею;
- технічними і тактичними характеристиками НЛЦ;
- сучасними можливостями технічної реалізації методів і пристроїв, що підвищують ефективність РЛС щодо виявлення НЛЦ.

Розглянемо докладніше кожне із названих вище обмежень. Як основні фізичні явища, що впливають на дальність виявлення НЛЦ, можна назвати такі:

- обмеження радіогоризонтом максимальної дальності виявлення через прямолінійне поширення радіохвиль;
- інтерференційні явища;
- маскування сигналу від цілі потужними відбиттями зондувального сигналу від підстилаючої поверхні;
- маскування сигналу від цілі подібними сигналами відбиття від атмосферних неоднорідностей на межі між підстилаючою поверхнею й атмосферою [4].

До технічних і тактичних характеристик НЛЦ, які в першу чергу необхідно враховувати під час проектування РЛС, слід віднести [3, 7]:

- ефективну поверхню розсіювання цілей, що лежить у межах $\sigma = 0,03 \dots 0,1 \text{ м}^2$;
- висоту польоту над підстилаючою поверхнею порядку $10 \dots 15 \text{ м}$ і нижче;
- швидкість польоту до $700 \dots 1000 \text{ м/с}$.

Постановка завдання. Таким чином, мета статті полягає оцінці дальності визначення НЛЦ оглядовою РЛС з врахуванням фізичних явищ і тактико-технічних характеристик цілі.

Виклад основного матеріалу. Для визначення можливостей технічної реалізації методів та пристроїв розглянемо вплив зазначених фізичних явищ сукупно з тактико-технічними характеристиками (ТТХ) НЛЦ. Як правило, при оцінці РЛС першим з усіх параметрів розглядається дальність виявлення НЛЦ [2, 4].

Дальність виявлення НЛЦ при лінійному поширенні радіохвиль у разі відсутності рефракції та надрефракції не перевищує величини дальності радіогоризонту [2]:

$$R_{\text{НЛЦ}} \leq D_r = 4,12 \left(\sqrt{h_a} + \sqrt{h_{\text{НЛЦ}}} \right),$$

де $R_{\text{НЛЦ}}$ – дальність виявлення НЛЦ, км; D_r – дальність радіогоризонту (км) або дальність прямої видимості; h_a – висота установки антени, м; $h_{\text{НЛЦ}}$ – висота польоту НЛЦ.

Дальність виявлення НЛЦ менша дальності радіогоризонту за рахунок інтерференційних явищ при поширенні радіохвиль над підстилаючою поверхнею. Відомо, що інтерференція призводить до порізаності діаграми спрямованості антени РЛС (ДСА) у вертикальній площині та формуванню уздовж підстилаючої поверхні інтерференційного мінімуму [11]. Тому нижній пелюсток діаграми віджимається від підстилаючої поверхні, на кут $\varepsilon_1 = \lambda / 4h_a$, де λ довжина хвилі РЛС. А відповідно цілі, що летять на дуже низькій висоті, потрапляють у мінімум ДСА і не можуть бути виявлені на дальностях, які рівні або навіть менші за дальність радіогоризонту.

На рис. 1 представлена типова зона виявлення РЛС з діаграмою спрямованості, яка перетинається з підстилаючою поверхнею. Тут R_0 – дальність у вільному просторі.

На рис. 1 діаграма спрямованості, яка є зоною видимості РЛС без врахування підстилаючої поверхні, позначена міткою 1. Зона видимості з урахуванням інтерференційних явищ позначена міткою 2. Зменшити ширину першого мінімуму за кутом місця ε_1 можна шляхом збільшення висоти установки антени за заданої довжини хвилі λ .

Наприклад, РЛС 76N6 для виявлення НЛЦ, що працює в Х діапазоні, забезпечує дальність виявлення $R_{\text{НЛЦ}} \cong D_r$ шляхом розміщення антени на спеціальній вежі заввишки близько 38 м [10]. Є станції, які розміщуються на дирижаблях,

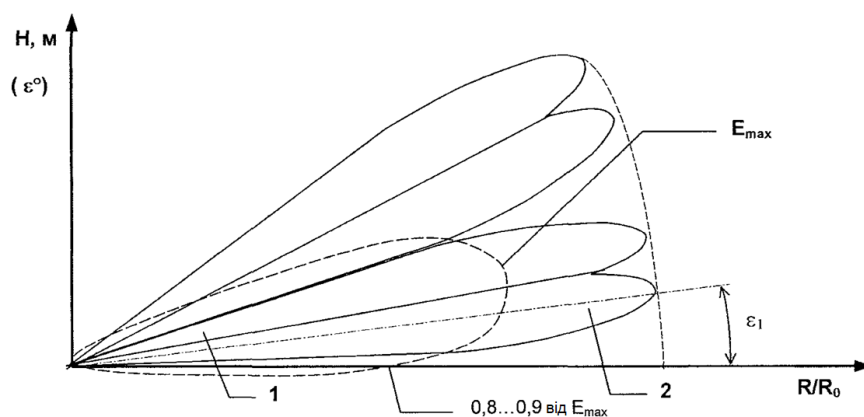


Рис. 1. Зона виявлення РЛС

наприклад, РЛС AN/TP3-63 фірми Westinghouse з $\lambda = 23$ см [2]. А можна РЛС розмістити просто на височині, проте ця можливість доступна тільки для РЛС наземного базування.

Для корабельних РЛС висота установки антени визначається, як правило, водотоннажністю корабля. Так, для кораблів малої водотоннажності (до 1000 т) $h_a \approx 8...10$ м, а для кораблів середньої та великої водотоннажності $h_a \approx 15...20$ м [2]. Для порівняно низьких висот установки антени близько 8...15 м дальність виявлення НЛЦ з урахуванням відтискування діаграми спрямованості від горизонту складає 0,5...0,7 від дальності радіогоризонту.

Тому, якщо прийняти висоту установки антени $h_a \approx 9$ м, а $R_{НЛЦ} = 4$ м, то $D_r \approx 20$ км, а дальність виявлення НЛЦ становитиме $R_{НЛЦ} \approx 10...14$ км. Така дальність є типовою для випадку розміщення РЛС на катерах берегової охорони та інших типах поширених кораблів і призводить до істотного скорочення часу приведення в готовність засобів захисту об'єкта [11].

При швидкості сучасних низьколітаючих цілей понад 500 м/с підлітний час для $R_{НЛЦ} \approx 14$ км становить близько 28 с. Причому в цей інтервал часу входить час, витрачений на виявлення, час обробки траєкторних даних, час видачі цілевказівки, час захоплення цілі станцією супроводу, і навіть підготовку зброї (розворот, наведення, передстартова підготовка тощо).

Розглянемо вплив маскуючого ефекту відбиття від підстилаючої поверхні на процес виявлення НЛЦ. Як видно з рис. 1, при виявленні НЛЦ діаграму спрямованості антени «притискають» до підстилаючої поверхні.

Якщо позначити $E_{\max}$ максимальне значення діаграми спрямованості електричним полем, то діаграма неначе лежить максимумом на поверхні (80...90% від $E_{\max}$) [6]. Однак результуюча діаграма 2, залишається відтиснутою від поверхні на кут ε_1 . Так як НЛЦ виявляється на відстані близько 50...70% від D_r , то при сильному хвилюванні моря дальність її виявлення можна порівняти з максимальною дальністю зони відбиття від морської поверхні. Тоді ціль, яка була виявлена у вільній від перешкод зоні, через короткий проміжок часу потрапляє до зони перешкод (рис. 2).

Враховуючи, що ефективна площа розсіювання (ЕПР) цілі мала і становить приблизно 0,03...0,1 м², відношення сигналу до завади виявляється досить низьким

$$\frac{P_c}{P_3} = k \frac{\sigma_{ц}}{\sigma_3} \ll 1$$

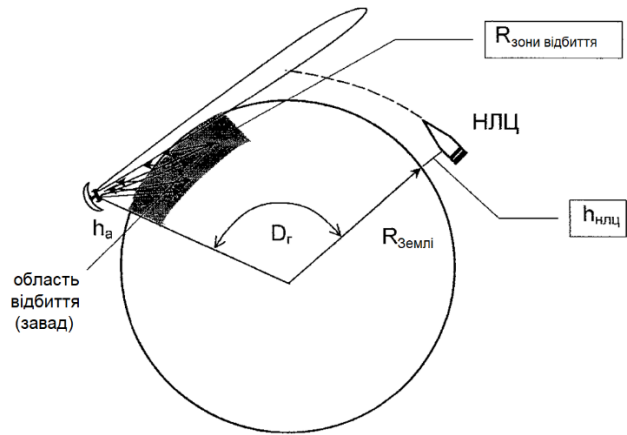


Рис. 2. Утворення області відбиття (завад)

і може досягати величини -25...-35 дБ. У цьому разі для досягнення високої ймовірності виявлення необхідно забезпечити придушення завад у межах 40...60 дБ [11].

Мала ефективна поверхня розсіювання НЛЦ, вимагає збільшення потенціалу РЛС, але при цьому в її ближній зоні починають проявлятися атмосферні ефекти, які були менш помітними у звичайних РЛС. Це, передусім, відбиття від атмосферних неоднорідностей, що оптично не спостерігаються, відображення, викликані турбулентністю атмосфери, а також відбиття від зграй птахів, скупчень комах та ін. Збірна назва цих відображень «ангел-відлуння» [2].

Складність фільтрації сигналів, відбитих від «ангел-відлуння», у тому, що явища, які призводять до віддзеркалення, є різними за своєю фізичною суттю. Тому єдиних методів їхнього придушення не існує [2].

Поступальні швидкості пересування таких позначок від «ангел-відлуння» часто можна порівняти зі швидкістю вітру, а при їх переміщенні у вертикальній площині відстань до них не змінюється. Здавалося б, такі позначки могли бути компенсовані системою детектування цілі (СДЦ). Однак крім поступального руху в горизонтальній або вертикальній площині частина «ангел-відлуння» може мати швидкий обертальний або коливальний рух, що призводить до доплерівського зміщення, еквівалентного швидкісних цілей або широкого спектра доплерівського. Таким чином, окремі позначки від «ангел-відлуння» проходять через пристрої СДЦ і виділяються як цілі [2]. Явища «ангел-відлуння» залежать від сезону, вологості, температури і досить інтенсивно проявляються межі «море-атмосфера» чи «Земля-атмосфера», тобто у зоні НЛЦ.

На фото рис. 3 представлені траєкторії одного з різновидів «ангел-відлуння» в системі координат дальність-пеленг, зняті відкритою фотокамерою з екрану РЛС протягом декількох десятків секунд [2]. у даному випадку позначки від «ангел-відлуння» рухаються в просторі поступово. Як видно, траєкторії стійкі, позначки регулярно зміщуються від огляду до огляду. Фотокамера була відкрита протягом часу $T_2 = T_{\text{огл.}} (N - 1)$, де N кількість оглядів.

З короткого аналізу видно, що для вирішення проблеми виявлення НЛЦ необхідно провести цілу низку досліджень, пов'язаних з оцінкою ефективності існуючих методів виявлення, і виробленням загальних критеріїв і методів для проектування подібних РЛС.

Вище вказувалося, що зазвичай дальність виявлення НЛЦ не перевищує дальності радіогоризонту і може становити близько 50%...70% від неї в залежності від висоти установки антени, а також висоти польоту цілі [11]. Для наземних

РЛС можна досягти дальності виявлення, порівнянної з дальністю радіогоризонту шляхом вибору оптимальної висоти установки її антени.

При роботі РЛС у нижній зоні за рахунок багатопроменевого поширення радіохвиль виникають інтерференційні явища. У цьому випадку відбувається когерентне додавання полів: прямого від цілі до РЛС і непрямого, що виникає в результаті відбиття від підстилаючої поверхні [5].

Це та інші явища, пов'язані з поширенням радіохвиль над підстилаючою поверхнею враховуються при розрахунку множника ослаблення $|F|$. Зважаючи на сферичну форму Землі, простір над землею поверхнею, в якому поширюються радіохвилі, ділять на три характерні області, показані на рис. 4 [1, 6]:

- освітлену область;
- тіньову область;
- напівтіньову область, розташовану між освітленою та тіньовою.

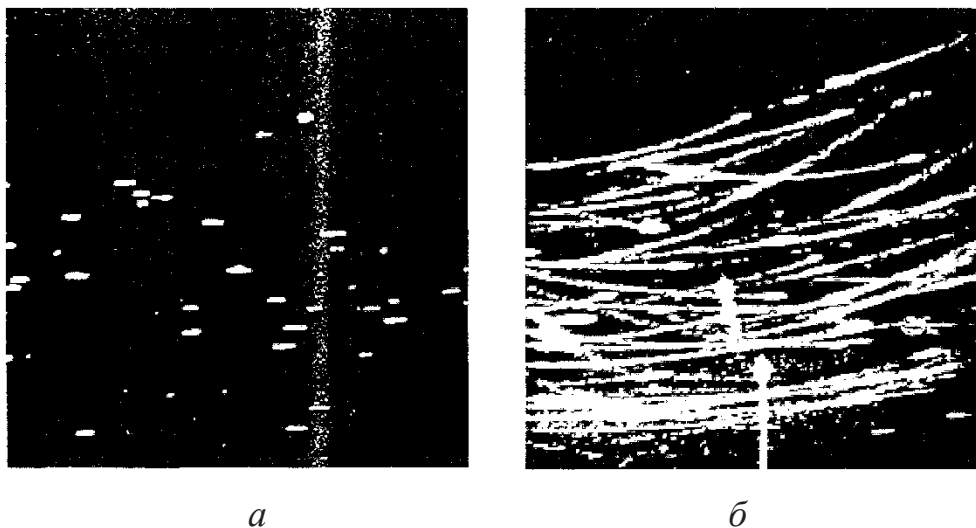


Рис. 3. Явище «ангел-відлуння»: а – вигляд позначок перед початком вимірювань; б – траєкторії тривалого спостереження

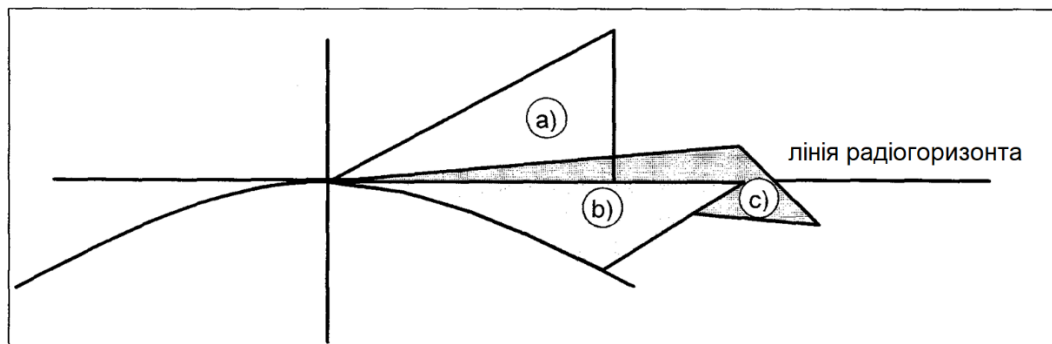


Рис. 4. Характерні області поширення радіохвиль зумовлені сферичністю Землі

Освітлена область характеризується тим, що в ній до дальності радіогоризонту значна частина енергії передається прямими променями джерела випромінювання [1, 6].

Тіньова область повністю розташована нижче за лінію радіогоризонту.

В освітленій області поверхнева хвиля визначається інтерференцією між прямою і відбитою хвилею. В областях півтіні та тіні поширення обумовлено обгинанням радіохвиль земної поверхні дифракцією. Тому ці області найчастіше поєднуються в одну дифракційну область. Виявлення цілей, що низько летять, як правило, відбувається в освітленій області [2].

Врахування півтіньової області при розрахунках дальності виявлення НЛЦ як правило не надає істотного впливу на результат за винятком хвилеводного поширення радіохвиль. Тому оцінку дальності, щоправда дещо занижену, можна проводити в інтерференційній зоні [1, 6].

При розв'язанні задачі визначення дальності НЛЦ з використанням множника ослаблення будемо враховувати відомі положення про те, що для будь-яких кутів місця при горизонтальній поляризації, а також для кутів місця, менше 1° при вертикальній поляризації, для $\lambda < 1,5$ м над морем і для $\lambda < 10$ м над сушею, модуль коефіцієнта відбиття ≈ 1 , а фаза відбиття -180° [2, 10, 14].

За цих умов множник ослаблення можна записати у вигляді:

$$F \cong f(\theta_1) \sqrt{1 + m^2 + 2m \cdot \cos\left(\varphi + \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r\right)}. \quad (1)$$

У виразі (1) $m = \rho D_p$, де D_p – коефіцієнт розбіжності у разі, коли Земля вважається сферою; $\rho = \gamma \rho_0$, де ρ_0 коефіцієнт відбиття від гладкої поверхні, а γ коефіцієнт шорсткості поверхні, який менше 1.

В (1) $\theta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r$ це набіг фази за рахунок різниці ходу Δr між прямими і відбитими променями. Відповідно до [10, 12] різниця ходу Δr визначається як:

$$\Delta r = \frac{2Hh}{R} \left(1 - \frac{r_1^2}{2a_{ef}H}\right) \left(1 - \frac{r_2^2}{2a_{ef}H}\right), \quad (2)$$

де r_1, r_2 відстані від точки випромінювання та прийому до точки відбиття відповідно; H, h висота антени РЛС та висота цілі відповідно; a_{ef} – ефективний радіус Землі; R – поточна дальність до цілі.

Другий варіант розрахунку Δr наведено в [13]:

$$\Delta r = \frac{2Hh}{R} \left[1 - \frac{1}{2a_{ef}H} \left(\frac{Rh}{h+H}\right)^2\right] \left[1 - \frac{1}{2a_{ef}H} \left(\frac{RH}{h+H}\right)^2\right]. \quad (3)$$

Цей вираз дозволяє безпосередньо обчислити набіг фази, проте він досить громіздкий. Простіший вираз для Δr наведено в [11]:

$$\Delta r = \frac{2Hh}{R} \left[1 - \left(\frac{R}{R_r}\right)^2\right]^2. \quad (4)$$

На рис. 5 (а, б, с) графічно представлений процес відбиття радіохвиль від плоскої та сферичної земної поверхні.

Рис. 5, а) відповідає випадку, коли відбиття відбувається від плоскої поверхні, причому для малих кутів місця коефіцієнт відбиття від плоскої Землі $\rho = -1$. Рис. 5, б) відповідає випадку, коли відбиття відбувається від сферичної земної поверхні, причому для малих кутів місця $\rho = -1$, а коефіцієнт розбіжності $D_p < 1$. На рис. 5, с) представлений процес відображення радіохвиль, коли Земля представлена сферою, і дано приведені висоти h'_a і h'_n [11].

Коефіцієнт розбіжності $D_p < 1$ характеризує коефіцієнт відбиття від сферичної поверхні, коли відбита енергія від цілі або антени не повністю спрямовується в бік приймальної антени або цілі. Це відбувається через те, що на кривій поверхні відбуваються перевідбиття в різних напрямках, і відбитий пучок енергії розходить кут (рис. 5, б). Величина коефіцієнта D_p залежить від дальності. При дальності до цілі, порівнянної з дальністю радіогоризонту $D_p \approx 0,3 \dots 0,4$. При наближенні до РЛС величина коефіцієнта $D_p \approx 0,9 \dots 0,95$ [12].

Використовуючи множник ослаблення, можна записати вираз для дальності виявлення НЛЦ, у вигляді:

$$R_{нлц}^4 = \frac{2P\tau \cdot G_0^2 |F|^4 \sigma \cdot \lambda_0^2 \cdot |F(\varepsilon)|^4}{(4\pi)^3 \alpha K T_0 L}, \quad (5)$$

де L – втрати; α – коефіцієнт помітності; P імпульсна потужність; τ – тривалість зондуючого імпульсу; G_0 – коефіцієнт підсилення антени; α – ЕПР цілі; λ_0 – довжина хвилі; K – постійна; T_0 – температура за Кельвіном; F – інтерференційний множник; $F(\varepsilon)$ – діаграма спрямованості у вертикальній площині, $F(0) = 1$; ε – кут місця.

За відсутності багатопроменевих відбиттів, тобто при $F = 1$, $F(\varepsilon) = F(0) = 1$, дальність

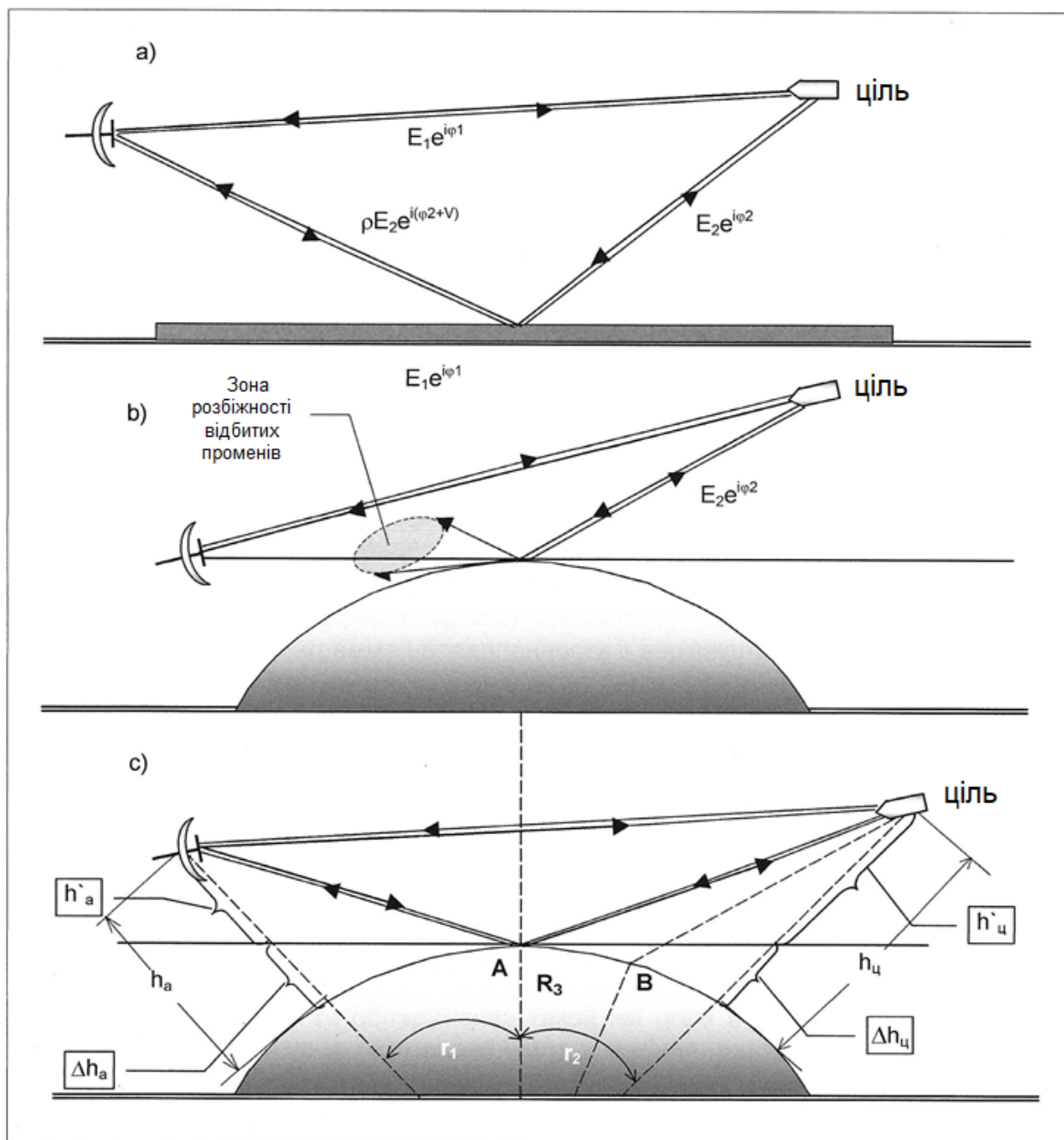


Рис. 5. Процес відбиття радіохвиль від плоскої та сферичної земної поверхні

виявлення у вільному просторі розраховується за такою формулою:

$$R_{\text{нлц}}^4 = \frac{2P\tau \cdot G_0^2 \sigma \cdot \lambda_0^2}{(4\pi)^3 \alpha K T_0 L}. \quad (6)$$

Тоді вираз (5) з урахуванням (6) можна привести до вигляду:

$$R_{\text{нлц}} = R_0 \cdot |F| \cdot |F(\varepsilon)|. \quad (7)$$

Таким чином, дальність виявлення НЛЦ визначається добутком дальності виявлення

такої ж цілі у вільному просторі, множника ослаблення і нормованого значення діаграми спрямованості антени у вертикальній площині.

При строгому підході, розраховуючи дальність виявлення НЛЦ, необхідно враховувати дифракційні явища. Однак, якщо виявляємо ціль з малою ЕПР, близько $0,1 \text{ м}^2$ і менше, то і величина відбитого сигналу сама по собі мала. А якщо врахувати, що в сантиметровому діапазоні хвиль на дальності радіогоризонту спостерігається різке загасання поля на 12...15 дБ в один бік, а при двосторонньому поширенні радіохвиль у разі активної

РЛС згасання, в середньому, складе ~ 30 дБ, то складова поля відбитого від цілі сигналу за рахунок дифракції має достатньо малу величину.

Розрахунки показують, що врахування дифракційної складової при виявленні малорозмірної НЛЦ, забезпечує збільшення дальності в середньому на 1...1,5 км. Таким чином, оцінку дальності НЛЦ із необхідною для практики точністю можна забезпечити навіть у рамках інтерференційної зони РЛС.

З виразу (1) видно, що визначення множника ослаблення необхідно насамперед знати різницю ходу Δr між прямими і відбитими променями. Вирази (2), (3) і (4) дозволяють приблизно оцінити Δr , а більш точний розрахунок можна зробити, використовуючи поняття «приведених» висот [2].

Ввівши це поняття, для антени h'_a та цілі h'_c (рис. 5, с), розглянемо суть методики розрахунку множника ослаблення з урахуванням того, що Земля – сфера. Через точку відображення проводиться пряма, перпендикулярна до радіусу Землі R_3 . Перетин цієї прямої з лініями висоти антени та цілі розділить кожен з них на частини Δh_a та h'_a , а також Δh_c та h'_c . Величини h'_a і h'_c є як би висотами антени і цілі над плоскою Землею, причому у процесі руху цілі вони змінюються, тому що точки відбивань також змінюються.

Розрахункові співвідношення для наведених висот, методика розрахунку як графіків і таблиць представлені, наприклад, в [2, 3].

Наведемо окремі математичні співвідношення:

$$\theta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r; \quad \Delta r = \frac{2h'_a h'_c}{R}, \quad (8)$$

де R поточна дальність; h'_a і h'_c приведені висоти; Δr різницю ходу між прямим і відбитим променем;

$$h'_a = h_a \left(1 - \frac{\Delta h_a}{h_a} \right); \quad h'_c = h_c \left(1 - \frac{\Delta h_c}{h_c} \right).$$

Наведені вище співвідношення справедливі з точністю порядку 1% кутів місця менше 8° , тобто повністю придатні для розрахунків дальності виявлення НЛЦ. При кутах місця до 24° похибка не перевищить 10% [2].

Скориставшись для знаходження різниці ходу Δr у формулі (1) виразами (3) і (4), розрахунки можна значно спростити. На рис. 6 та 7 наведено графіки множника ослаблення при значеннях параметрів $\lambda = 3$ см, $h_a = 15$ м.

На рис. 6 наведено графік множника ослаблення для висоти цілі $h_c = 5$ м, рис. 7 графік множника ослаблення для висоти цілі $h_c = 10$ м.

Крива 1 – графік множника ослаблення, розрахований за спрощеними виразами (3) та (4). Крива 2 – множник ослаблення, обчислений за методикою з використанням приведених висот. Видно, що різницю між ними спостерігається лише області «хвостів».

На рис. 6 і 7 також проведено графічне визначення дальності виявлення низької цілі

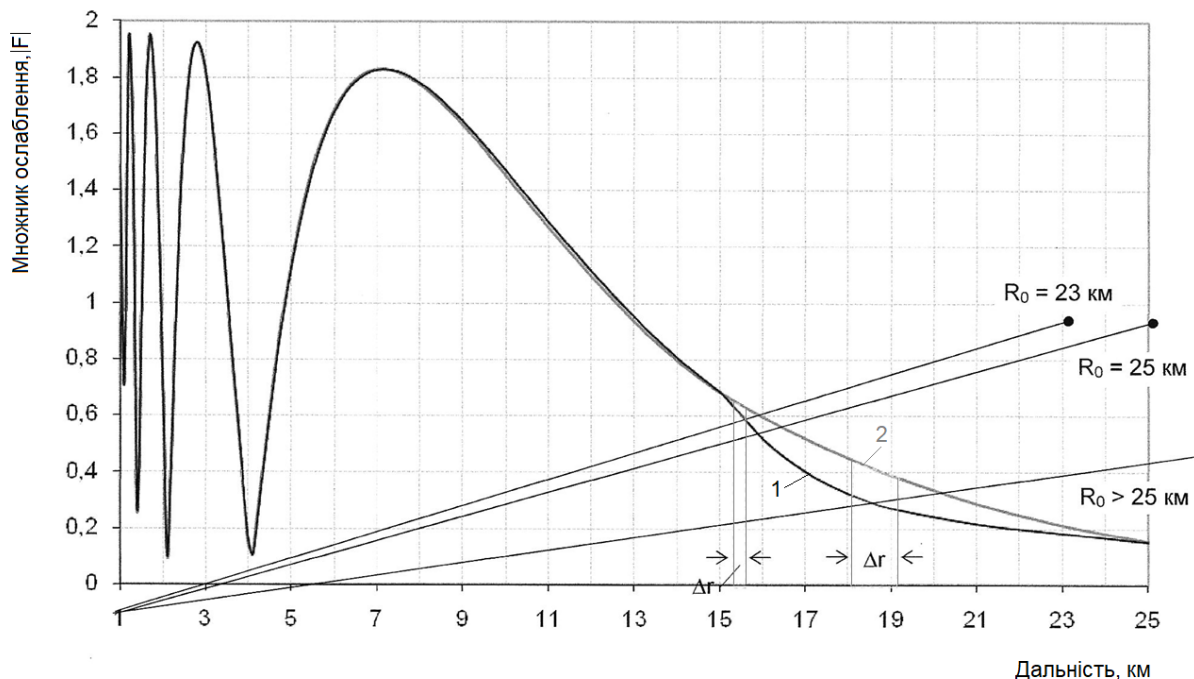


Рис. 6. Залежність множника ослаблення від дальності для висоти цілі 5 м

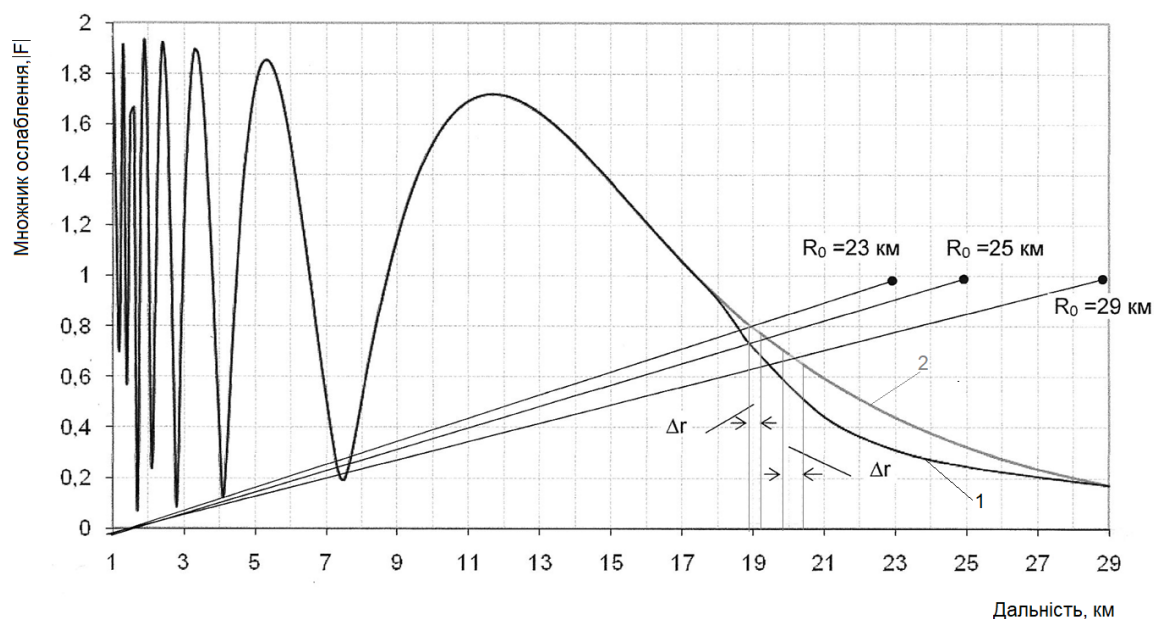


Рис. 7. Залежність множника ослаблення від дальності для висоти цілі 10 м

за виразом (7) для різних значень дальності виявлення у вільному просторі. Похибки визначення дальності виявлення НЛЦ лежать у межах 1...2 км, причому за спрощеними виразами оцінка дальності виходить меншою, а значить, їх застосування цілком допустимо.

Крім наведених методів оцінки дальності НЛЦ, часто використовується поширений у відомих джерелах [2, 6–8] вираз для дальності виявлення НЛЦ, який отримано для плоскої Землі, і в якому інтерференційний множник розраховується за формулою $F = \sin(\theta/2)$:

$$R_{\text{нлц}} = \sqrt[8]{\frac{P \cdot G_0^2 \sigma \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3 P_{\text{пр. min}}}} \cdot \sqrt{\frac{4\pi h_a H}{\lambda}}. \quad (9)$$

Як зазначено вище, плоскою Землю можна вважати лише на дальностях, які не перевищують половину дальності радіогоризонту, тобто при $R \leq D_r/2$. Тому визначення потенційних можливостей РЛС використовувати у розрахунках вираз (9) не коректно. На підтвердження цього на рис. 8 наведено графіки множників ослаблення (інтерференційні множники) для висоти цілі 10 м та висоти установки антени 15 м. Графіки значно розходяться області «хвостів», так як для плоскої Землі (крива білого кольору) ослаблення проходить дуже повільно, і величина множника ослаблення не зменшується навіть поза радіогоризонту. У той самий час відомо [1], що за використання моделі сферичної Землі напруженість поля різко слабшає ($\sim 15\text{...}20$ дБ однією бік).

Відома також спрощена формула для розрахунку дальності НЛЦ з урахуванням сферичності Землі:

$$R_{\text{нлц}} = D_r \left[1 - \frac{D_r}{2A} \left(1 - \frac{D_r}{2A} \right) \right], \quad (10)$$

де $A = \sqrt{\frac{4\pi \cdot h_{\text{ц}} \cdot h_a \cdot R_0}{\lambda}}$; λ – довжина хвилі; R_0 – дальність виявлення цілі у вільному просторі; D_r – дальність радіогоризонту.

У рис. 9 наведені зони виявлення НЛЦ у нижньому промені діаграми спрямованості антени, розраховані за точними формулами з урахуванням того, що Земля є сферою. Розрахунки проведені для набору гіпотетичних РЛС таким чином, щоб отримані графіки можна було використовувати при оцінці дальності цілей для широкого кола розроблюваних РЛС.

Графіки розраховані для середини діапазонів радіохвиль $\lambda_0 = 3,5$ см і $\lambda_0 = 10$ см для діаграми спрямованості з шириною основної пелюстки у вертикальній площині $F(\varepsilon)$ 3° та 2° з рівнем 0,707 (за напругою). Рівні бічних пелюсток не перевищують 26 дБ. Ці результати справедливі для відхилення від середніх значень λ_0 на $\pm \Delta\lambda/\lambda_0 = 0,05$.

При користуванні графіками основними параметрами є:

- дальність D_0 виявлення у вільному просторі цілі з ЕПР $\sigma_{\text{ц}}$;
- висота встановлення антени.

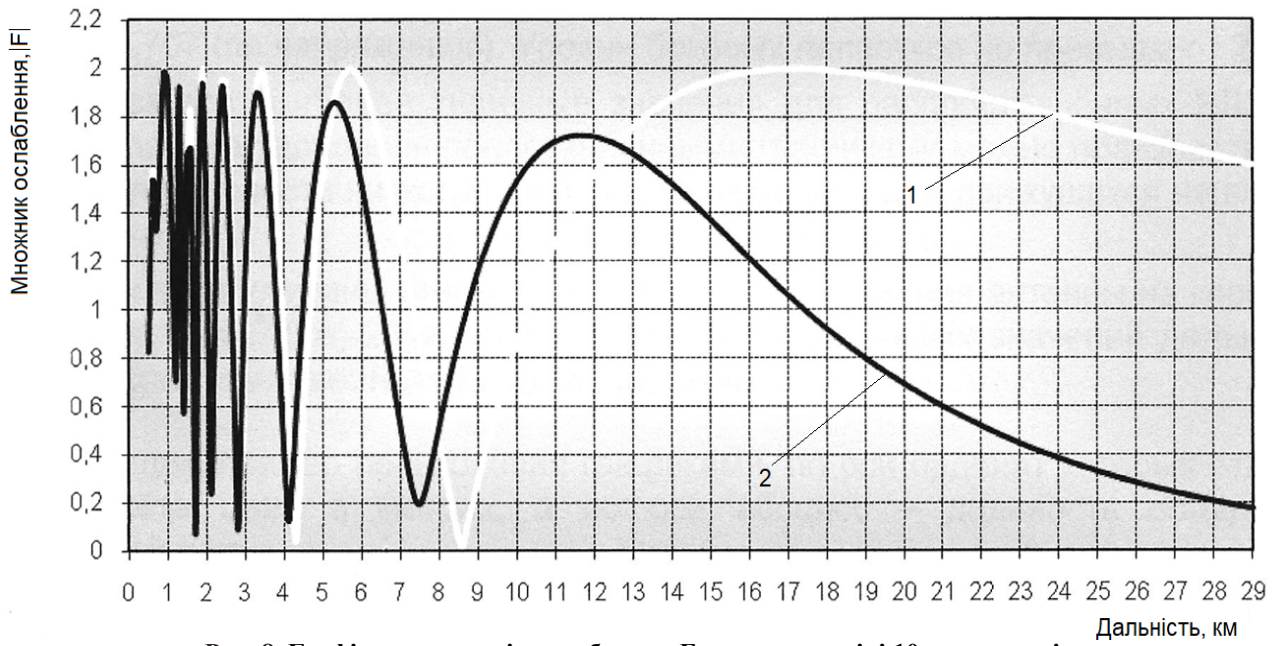
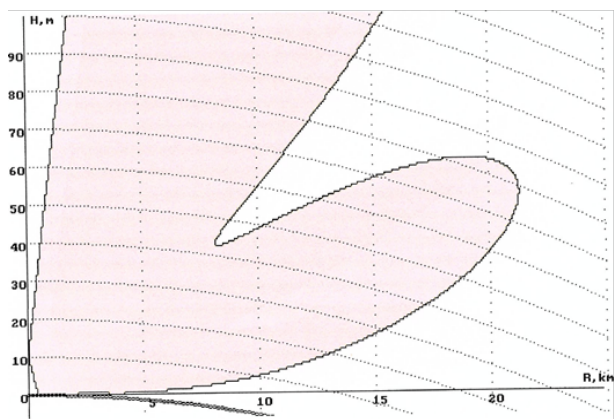
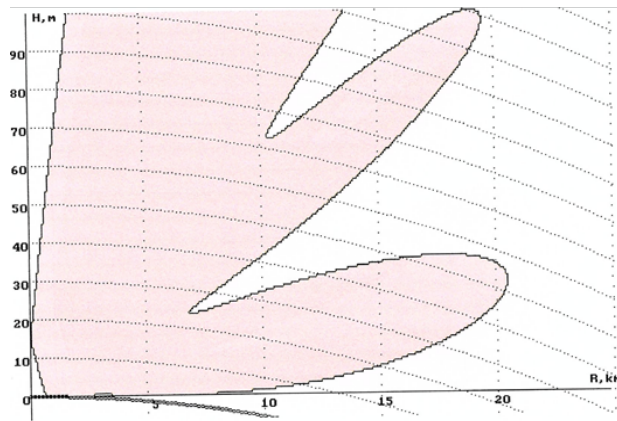


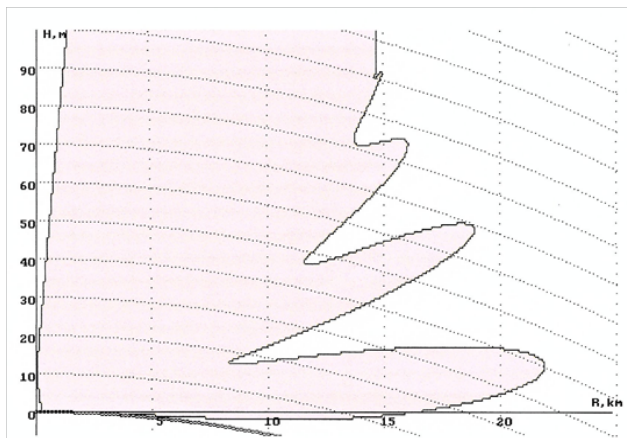
Рис. 8. Графіки множників ослаблення F для висоти цілі 10 м за моделі:
1 – Земля плоска; 2 – Земля сферична



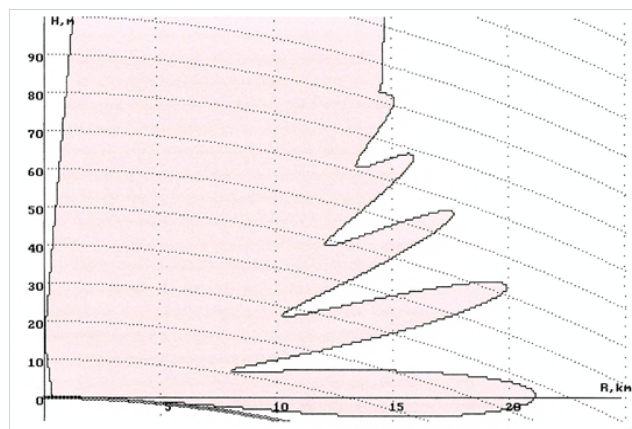
a



b



c



d

Рис. 9. Зони виявлення НЛЦ

Рис. 9. Зони виявлення НЛЦ: $D_0 = 15$ км, довжина хвилі $\lambda_0 = 10$ см, ширина променю $F(\epsilon) = 2^\circ$, кут установки променю $0,8^\circ$, висота антени $h_a = 10$ м (а) та $h_a = 15$ м (б); $D_0 = 15$ км, довжина хвилі $\lambda_0 = 3,5$ см, ширина променю $F(\epsilon) = 3^\circ$, кут установки променю $0,8^\circ$, висота антени $h_a = 10$ м (с) та $h_a = 15$ м (д).

Так як це найбільш типові значення для поширених РЛС, то в даному діапазоні радіохвиль представленими графіками можна користуватися для визначення дальності НЛЦ, особливо для рухомих на висотах, менших 50 м.

Висновки. Графіки розраховані для типових висот розташування антени на висоті зокрема, $h_a = 10$ м, 15 м, 20 м, 25 м, а також кількох значень дальності у вільному просторі: $D_0 = 15$ км, 20 км, 30 км, по осі ординат яких відкладена

висота польоту цілі в метрах, а по осі абсцис дальність виявлення НЛЦ.

Для користування графіками необхідно:

1. Здійснити розрахунок дальності виявлення у вільному просторі для заданої оцінки, відповідної ЕПР НЛЦ.

2. Підібрати графік з близькими до розрахункових значеннями дальності виявлення і передбачуваними висотами установки антени. Далі, опустивши з цієї точки перпендикуляр на вісь абсцис, отримаємо дальність.

Запропоновані графіки не охоплюють усі можливі варіанти РЛС та всі діапазони хвиль, але за потреби, використовуючи формули отримані в роботі, можна розрахувати зони виявлення та дальності виявлення НЛЦ.

Список літератури:

1. Васюта К. С., Тесленко О. В., Купрій В. М., Малишев О. А. Основи побудови радіолокаційних засобів розвідки повітряного простору. Київ : Скіф, 2023. 212 с.
2. Радіотехніка. Енциклопедичний навчальний довідник / за ред. Ю. Л. Мороза, Є. А. Мачуського, В. І. Правди. Київ : Вища школа, 1999. 838 с.
3. Обод І., Свид І., Мальцев О. Обробка даних радіолокаційних систем спостереження повітряного простору : навчальний посібник. Харків : Друкарня Мадрид, 2021. 255 с.
4. Obod I., Syvd I., Maltsev O., Vorgul O., Maistrenko G. and Zavolodko G., Optimization of the Quality of Information Support for Consumers of Cooperative Surveillance Systems. Data-Centric Business and Applications, 2020. P. 133–155.
5. Альошин Г. В. Ефективність інформаційно-вимірювальних радіотехнічних систем. Харків, ХУ ПС, 2005. 294 с.
6. Малайчук В. П., Рожковський В. Ф., Клименко С. В. Теоретичні основи радіолокації. Дніпро : ДНУ, 2017. 212 с.
7. Бондаренко Б. Ф., Вишнівський В. В., Долгушин В. П. та ін. Теорія радіолокаційних систем / За заг. ред. С. В. Ленкова. Київ : Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2011. 383 с.
8. Сухаревський О. І., Василець В. О., Нечитайло С. В. Довідник характеристик розсіювання повітряних та наземних радіолокаційних об'єктів. Харків : ХНУПС ім. І. Кожедуба, 2019. 304 с.
9. Riabukha V. P. Radar Surveillance of unmanned aerial vehicles (review). Radioelectronics and Communications Systems. 2020. No. 63 (11). P. 561–573.
10. Patel J. S., Fioranelli F, Anderson D. Review of radar classification and RCS characterisation techniques for small UAVs or drones. IET Radar, Sonar and Navigation. 2018. Vol. 12. No. 9. P. 911–919.
11. Sukharevsky O. I., Vasilets V. A. Scattering Characteristics of Aerial and Ground Radar Objects. Boca Raton : CRC Press, 2024. 530 p.
12. Lü M., Yi J., Wan X., Liu Y. Experimental research of drone monitoring using multi-static passive radar. The Journal of Engineering. 2019. Vol. 2019. No. 20. P. 6795–6798.
13. Shi X., Yang C., Xie W., Liang C., Shi Z., Chen J. Anti-Drone System with Multiple Surveillance Technologies: Architecture, Implementation, and Challenges. IEEE Communications Magazine. 2018. Vol. 56. No. 4. P. 68–74.
14. Zalevsky G. S., Sukharevsky O. I., Vasilets V. A. Integral equation modelling of unmanned aerial vehicle radar scattering characteristics in VHF to S frequency bands. IET Microwaves, Antennas and Propagation. 2021. Vol. 15. No. 10. P. 1299–1309.

Tachynina O.M., Slobodian O.P., Yenchov S.V., Tachynin Ye.V. DETERMINING THE DETECTION RANGE OF LOW-FLYING TARGETS BY A SURVEILLANCE RADAR STATION

The detection and tracking of low-altitude aerial targets is carried out using a surveillance radar system. This process entails a range of scientific, technical, and engineering challenges that must be addressed at both the design and operational stages of the radar system lifecycle. The effectiveness of target detection is influenced by a number of factors, including physical phenomena associated with radio wave propagation over the Earth's surface, the technical and tactical characteristics of low-flying targets, and the engineering implementation of detection methods and devices, all of which have a significant impact on radar performance.

This study focuses on a current scientific problem: the determination of the detection range for low-flying targets, taking into account relevant physical effects and the tactical-technical characteristics of the targets. The paper examines the impact of several key physical phenomena, including the limitation of maximum detection range due to the radar horizon caused by linear radio wave propagation; interference effects; signal masking resulting from strong reflections of the probing signal from the underlying surface; and signal masking by clutter caused by atmospheric inhomogeneities at the boundary between the surface and the atmosphere.

The causes and trajectories of "angel echoes" are analyzed in the range–azimuth coordinate system. The paper establishes analytical dependencies of the detection range on antenna installation height, target altitude, radar cross-section, radio signal wavelength, transmitted pulse power, antenna radiation pattern, and ambient air temperature, considering both flat and spherical Earth models. Additionally, the study derives attenuation factor dependencies on target range and altitude for both Earth models. Detection zones for low-flying targets within the lower beam of the antenna radiation pattern are constructed using the spherical Earth model for various antenna heights, signal wavelengths, radar horizon ranges, beam widths, and elevation angles.

The proposed analytical expressions enable accurate calculation of detection zones and ranges for low-flying targets under realistic operating conditions.

Key words: surveillance radar, low-flying target, detection range, detection zone, radar cross-section.