

Тема 4

Дальність дії радіолокатора

Заняття №1 Дальність дії радіолокатора

Питання заняття

1. Дальність дії РЛС у вільному просторі.
2. Вплив атмосфери на дальність дії РЛС.
3. Вплив Землі на дальність дії РЛС.

Дальність дії РЛС у вільному просторі

Дальність дії РЛС – найбільша відстань між РЛС і ціллю, на якій виявлення цілей проводиться із заданими імовірністю правильного виявлення і рівнем хибних тривог.

Постановка задачі

Вважаємо, що відомі наступні параметри:

а) для РЛС: P_i – імпульсна потужність.

$P_{pr. min}$ – чутливість приймача.

G – коефіцієнт підсилення передавальної антени.

A_{ef} – ефективна площа приймальної антени.

λ – довжина хвилі.

б) для цілі: $\sigma_{ц}$ – середнє значення ефективної поверхні розсіяння.

Припущення:

- середовище розповсюдження радіохвиль ізотропне і однорідне;
- вплив атмосфери і землі на процес розповсюдження радіохвиль не враховується.

Визначення $D_{\text{макс}}$ у вільному просторі

Припустимо, що передавач і приймач знаходяться в точці “ O ”, а ціль на відстані r , тобто в точці “ C ”. Густина потоку потужності $S_{\text{ц}}$ в точці знаходження цілі при ненаправленій передавальній антені РЛС буде

$$S_{\text{ц}} = P_i / 4\pi r^2 \text{ (Вт/м}^2\text{)}$$

З урахуванням направлених властивостей передавальної антени – густина потоку потужності $S_{\text{ц}}$ збільшується на коефіцієнт підсилення передавальної антени G разів.

$$S_{\text{ц}} = P_i G / 4\pi r^2 \text{ (Вт/м}^2\text{)} \quad (1)$$

Потужність сигналу, що перевипромінюється ціллю, з урахуванням (1) визначається виразом

$$P_{\text{вип.ц}} = S_{\text{ц}} \sigma_{\text{ц}} = P_i G \sigma_{\text{ц}} / 4\pi r^2 \quad (2)$$

З урахуванням (1) і (2) густина потоку потужності відбитої хвилі в точці розташування приймальної антени РЛС дорівнює

$$S_{np} = P_{\text{вип.ц}} / 4\pi r^2 = S_{\text{ц}} \sigma_{\text{ц}} / 4\pi r^2 = P_i G \sigma_{\text{ц}} / (4\pi r^2)^2 \quad (3)$$

Помноживши S_{np} на ефективну поверхню приймальної антени A_{ef} , визначимо потужність відбитого сигналу на вході приймача.

$$P_{np} = P_i G \sigma_{\text{ц}} A_{ef} / (4\pi r^2)^2 \quad (4)$$

Розрахунок дальності дії РЛС з (4)

$$r = D = \sqrt[4]{\frac{P_i G \sigma_{\text{ц}} A_{ef}}{(4\pi)^2 P_{np}}} \quad (5)$$

При збільшенні відстані до цілі потужність прийнятого сигналу P_{pr} зменшується і при $D=D_{max}$ стає мінімальною необхідною потужністю відбитого сигналу на вході приймача ($P_{pr.min}$), тобто дорівнює чутливості приймача. Тоді рівняння (5) приймає вигляд

$$r = D = \sqrt[4]{\frac{P_i G \sigma_{ц} A_{ef}}{(4\pi)^2 P_{pr.min}}} \quad (6)$$

Величина G і A_{ef} взаємозв'язані співвідношенням.

$$G = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_{ef} \quad , \text{ або} \quad A_{ef} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G$$

Якщо в РЛС використовується одна антена на передачу і на прийом, то можна записати

$$D_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_i G^2 \sigma_{ц} \lambda^2}{(4\pi)^3 P_{pr.min}}} \quad (7)$$

Рівняння (6) і (7) називають **основними рівняннями радіолокації** для вільного простору. Воно показує залежність дальності дії РЛС від технічних параметрів РЛС і цілі.

Вплив параметрів РЛС і цілі на дальність дії РЛС

1) Максимальна дальність дії РЛС слабо залежить від енергетичних параметрів. Для збільшення дальності дії вдвічі треба підвищити енергетичний потенціал в 16 разів.

2) Дальність дії одноантенної РЛС суттєво залежить від коефіцієнту підсилення антени. Наприклад, для підвищення $D_{\text{макс}}$ в 2 рази при інших рівних умовах треба підвищити коефіцієнт підсилення антени тільки в 4 рази.

3) Ефективна поверхня розсіяння цілей може змінюватись в широких межах. Так, наприклад, для крилатої ракети $\sigma_{\text{ц}} = 0,1 \text{ м}^2$ в той час як для бомбардувальника $15-20 \text{ м}^2$. Отже можна зробити висновок, що дальність дії РЛС суттєво залежить ЕПР цілі.

4) Залежність дальності дії РЛС від λ . Треба розглянути з урахуванням направлених властивостей антени. Так при $G=const$ зменшення λ призводить до зменшення D_{max} , оскільки зменшується A_{ef} . При $A_{ef}=const$ зменшення λ призводить до підвищення дальності дії, через те, що зростає G .

Зменшення λ призводить:

- зниження практично досягнутої середньої і пікової потужності при зменшенні λ ;
- різного впливу умов розповсюдження радіохвиль на дальність дії РЛС різних діапазонів хвиль. Короткі хвилі сильніше затухають в атмосфері і гірше відбиваються від поверхні землі;
- погіршення $P_{pr.min}$ при зменшенні λ ;
- залежність ЕПР цілі від довжини хвилі.

Дальність прямої видимості.

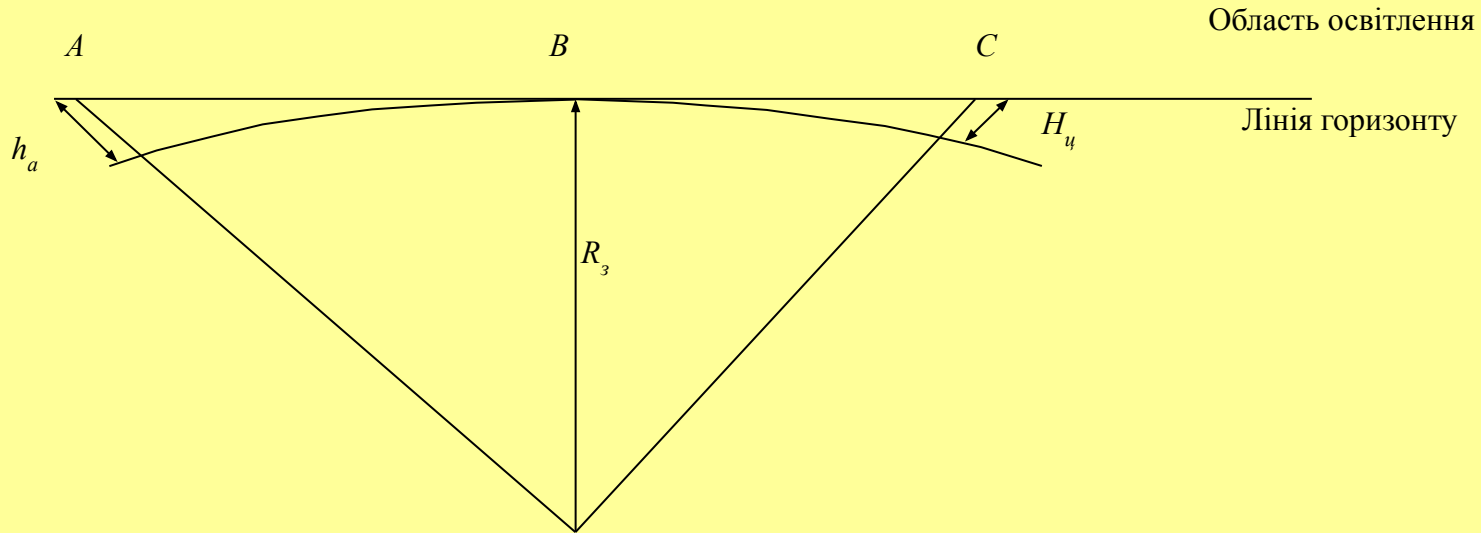


Рис. 1. Пояснення визначення дальності прямої видимості

$$D_{np} = AB + BC = \sqrt{(R_3 + h_a)^2 - R_3^2} + \sqrt{(R_3 + H_{ц})^2 - R_3^2} = \sqrt{R_3^2 + 2R_3 h_a + h_a^2 - R_3^2} + \sqrt{R_3^2 + 2R_3 H_{ц} + H_{ц}^2 - R_3^2} = \sqrt{2R_3} \left(\sqrt{h_a + \frac{h_a^2}{2R_3}} + \sqrt{H_{ц} + \frac{H_{ц}^2}{2R_3}} \right)$$

Оскільки $R_3 \gg h_a$ і $R_3 \gg H_u$, то другими додатками в підкореновому виразі можна знехтувати. Тоді

$$D_{np} = \sqrt{2R_3} \left(\sqrt{h_a} + \sqrt{H_u} \right)$$

З урахуванням того, що $R_3 = 6375$ км (в середніх широтах), цей вираз можна записати так

$$D_{np[\text{км}]} = 3.57 \left(\sqrt{h_{a[\text{м}]}} + \sqrt{H_{u[\text{м}]}} \right) \quad (8)$$

З формули (8) видно, що НЛЦ виявляються на значно менших відстанях, аніж висотні.

Для підвищення D_{np} антену РЛС треба піднімати над поверхнею землі якомога вище, тобто розміщувати РЛС на домінуючих висотах, горах, естакадах тощо.

Формула (8) справедлива для вільного простору без урахування впливу атмосфери на розповсюдження радіохвиль.

Вплив атмосфери на дальність дії РЛС

Затухання радіохвиль у просторі.

Затухання радіохвиль при розповсюдженні в атмосфері відбувається завдяки поглинанню і розсіянню енергії радіохвиль молекулами і атомами газів, парами води, гідро метеоорами, частинками пилу, які завжди присутні в земній атмосфері.

Це призводить до зменшення дальності дії РЛС.

Для характеристики ступеня затухання радіохвиль використовують поняття коефіцієнта затухання, який залежить від довжини хвилі, атмосферного тиску, вологості і температури середовища, а також від параметрів частинок, що розсіюють радіохвилі (краплі дощу, граду, туману, снігу).

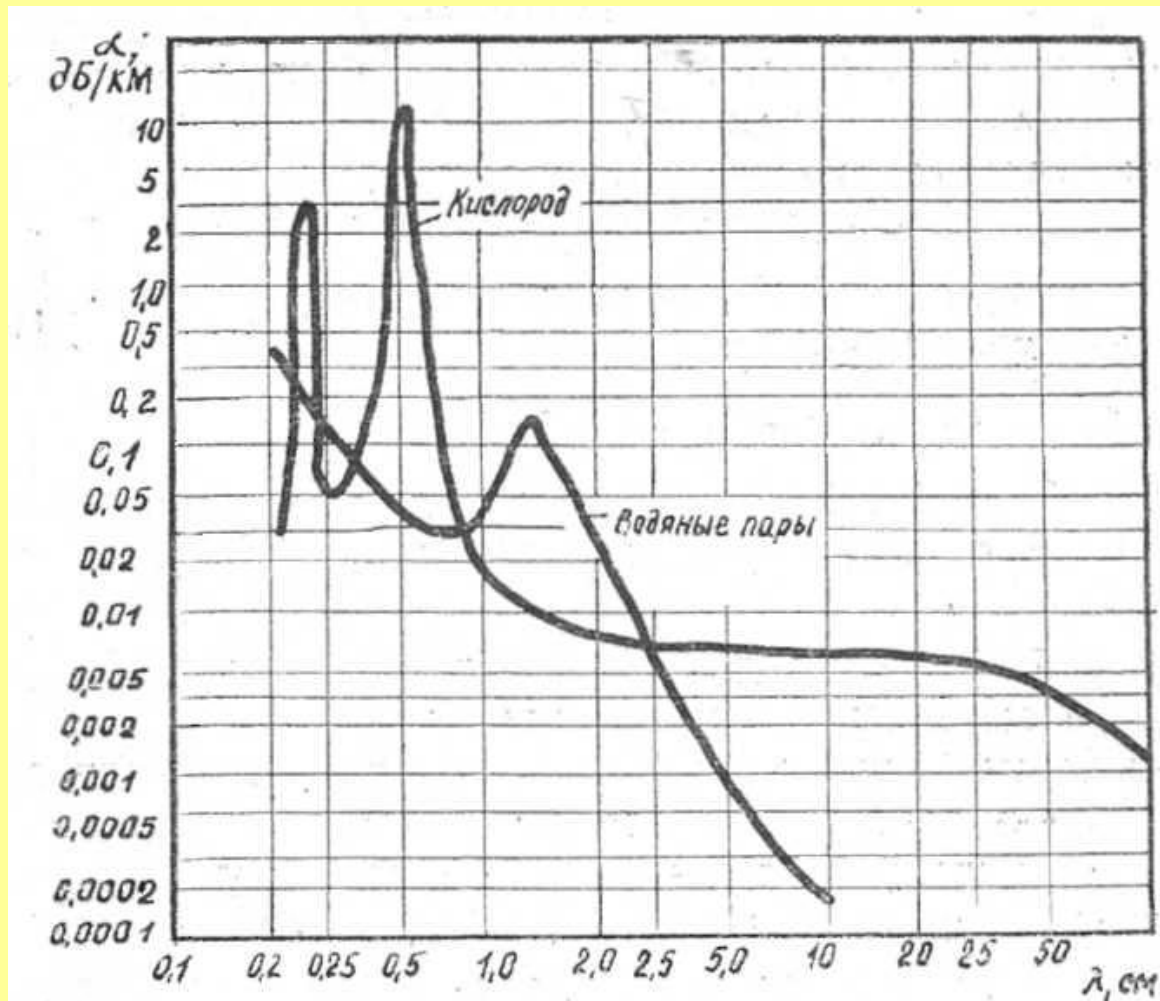


Рис. 2. Графіки залежності коефіцієнтів затухання від довжини хвилі для кисню і парів води показані на рисунку

На довгих хвилях явищами поглинання і розсіювання можна знехтувати. На хвилях $\lambda < 10$ см ці явища набувають суттєвих значень, втрати енергії радіохвиль зростають по мірі скорочення довжини хвилі, що призводить до різкого зменшення дальності дії на деяких хвилях.

Кисень вносить особливо значне затухання на $\lambda = 0,25$ см і $\lambda = 0,5$ см, водяні пари на $\lambda = 0,17$ см і $\lambda = 1,3$ см.

Таким чином затухання енергії радіохвиль в атмосфері обмежує нижню межу довжин хвиль, що використовуються в РЛС.

Викривлення траєкторії розповсюдження радіохвиль.

Наявність атмосфери, котра являє собою шарове середовище, веде до викривлення траєкторії радіохвиль і до їх затухання, в зв'язку з тим, що кожний шар має різні значення електричних параметрів.

Рефракція радіохвиль відбувається за рахунок змінювання коефіцієнта заломлення середовища з висотою. Причиною зміни коефіцієнту заломлення є змінювання температури, вологості і тиску з висотою. В результаті при зростанні висоти діелектрична проникність повітряного шару зменшується. Характер і величина рефракції залежить від величини вертикального градієнта коефіцієнта заломлення dn/dH .

Траєкторію хвилі характеризують радіусом кривизни радіопроменя, який визначається за формулою $\rho = 1 / (\cos\theta_0 dn / dH)$, де θ_0 початковий кут посилення радіохвилі.

Для характеристики рефракції радіус кривизни прийнято порівнювати з радіусом землі за допомогою коефіцієнта кривизни променя.

$$\rho = mR_3$$

Рефракцію поділяють на два види: позитивну коли $m > 0$ і негативну коли $m < 0$.

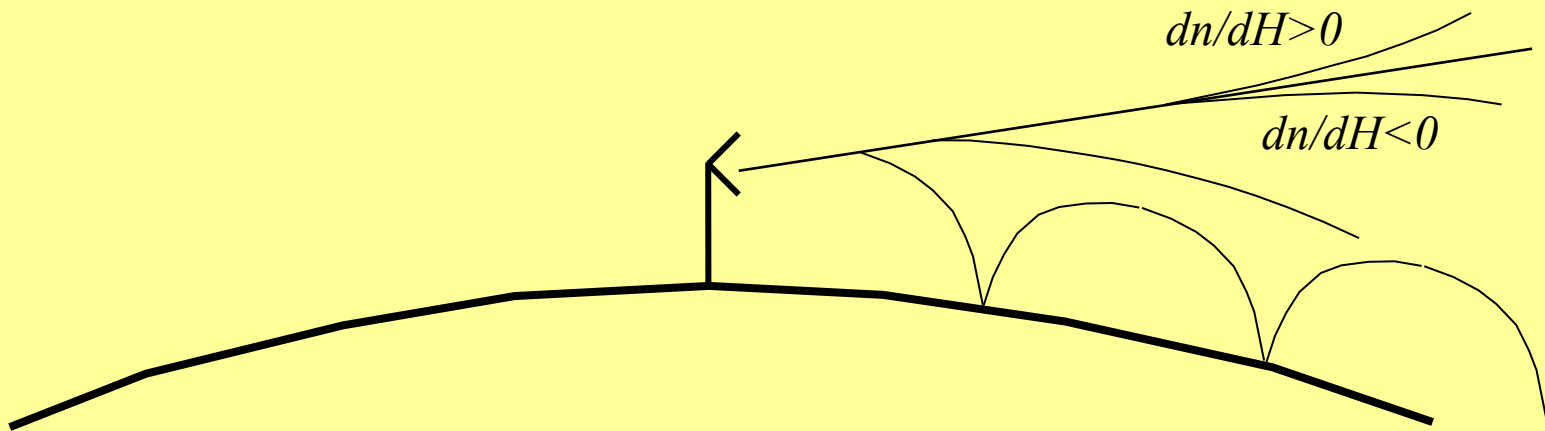


Рис. 3. Види рефракції

Позитивна рефракція спостерігається за умов, коли показник заломлення зменшується з висотою ($dn/dH < 0$, промінь відхиляється вниз до землі), а негативна – коли він зростає з висотою ($dn/dH > 0$, промінь відхиляється відносно прямої лінії вгору).

В залежності від стану атмосфери позитивна рефракція може бути нормальною (при нормальній тропосфері), пониженою, підвищеною, критичною і надрефракцією.

Критична рефракція ($dn/dH = -0,157 \times 10^{-6} \text{ 1/м}$) спостерігається дуже рідко ($m=1$). Промінь розповсюджується паралельно поверхні Землі.

У випадку, коли ($dn/dH < -0,157 \times 10^{-6} \text{ 1/м}$) радіус кривизни стає меншим за радіус Землі ($m < 1$) і пологий промінь падає на землю. Відбитий від Землі промінь може багаторазово скривитись і відбитись від Землі і без ослаблення досягти віддалених точок. Це явище носить назву надрефракції. При надрефракції хвиля розповсюджується в шарі висотою ($H_0 \approx 200 \text{ м}$), який називають тропосферним хвилеводом.

Рефракція не тільки впливає на дальність виявлення НЛЦ, але й призводить до помилки при визначенні кута місця і як наслідок, помилки вимірювання висоти. Для врахування цієї помилки вводять поняття еквівалентного радіуса Землі.

$$R_{екв} = \frac{4R_з}{3} = 8500км$$

В інтерференційних формулах рефракція враховується заміною $R_з$ на $R_{екв}$. Так у випадку нормальної рефракції дальність прямої видимості

$$D_{пр[км]} = \sqrt{2R_{екв}} \left(\sqrt{h_a} + \sqrt{H_{ц}} \right) = 4.12 \left(\sqrt{h_{a[м]}} + \sqrt{H_{ц[м]}} \right)$$

Вплив землі на дальність дії РЛС

Вплив землі на дальність дії РЛС обумовлений тим, що частина енергії, котра випромінюється антеною, падає на земну поверхню і відбивається від неї.

Інтерференція прямої і відбитої хвиль приводить до зміни поля антени у вертикальній площині. Результуюче поле залежить від кута місця цілі і представляє собою суму двох полів.

$$E_{рез}(\theta) = E_{пр}(\theta) + E_{від}(\theta)$$

де $E_{пр}(\theta)$ - вектор напруженості електричного поля прямої хвилі.

$E_{від}(\theta)$ - вектор напруженості електричного поля відбитого від землі.

В залежності від кута місця θ поля складаються в фазі або проти фазі і, отже, результуюче поле буде збільшуватись чи зменшуватись. Таким чином, зона огляду виходить порізаною, з провалами, де цілі не виявляються.

Кількість пелюсток, їх величина і глибина провалів, розташування у просторі залежить від висоти підйому антени, довжини хвилі, поляризації і властивості земної поверхні.

Вплив землі на розповсюдження радіохвиль помітно проявляється в метровому і дециметровому діапазонах хвиль. Це пов'язано з тим, що відбиття радіохвиль в реальних умовах в цих діапазонах наближається до дзеркального. В сантиметровому діапазоні має місце дифузне (розсіяне) відбиття радіохвиль від земної поверхні. ДН антени РЛС відриваються від землі, щоб уникнути зайвих втрат енергії. Вплив землі при визначенні зони огляду враховується за допомогою множника землі $\Phi(\theta)$ (інтерференційного множника).

Узагальнюючи результати аналізу інтерференційного множника для реальних ґрунтів, можна зробити наступні висновки:

1) Горизонтально поляризовані хвилі краще відбиваються від земної поверхні аніж вертикально поляризовані. Тому дальність дії РЛС з горизонтальною поляризацією випромінювання більше чим з вертикальною.

2) При вертикальній поляризації і властивостях відбитої поверхні – провідник, перший максимум ДН антени РЛС максимально притулено до землі, що дає певні переваги вертикальній поляризації перед горизонтальною для локації морських і низьколітних повітряних цілей.

3) При горизонтальній поляризації перший пелюсток завжди “відірвано” від землі, тому для підвищення дальності дії РЛС по НЛЦ треба антену станції піднімати якомога вище.

4) Площадка для розташування РЛС повинна відповідати певним умовам щодо своїх розмірів і допустимих нерівностей на поверхні. (Зовнішній радіус площадки $R_{нл} = 23,3h_a^2/\lambda$, внутрішній $r_{нл} = 0,7h_a^2/\lambda$, висота допустимих нерівностей на поверхні площини $h_{нер} < \lambda/16\sin\varepsilon$).