

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторної роботи №4

«Дослідження зон огляду з наземного пункту огляду та з ШСЗ»

з дисципліни

«Супутникові інформаційні системи»
для студентів спеціальності 172
«Електронні комунікації та радіотехніка»
всіх форм навчання

Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи №4 «Дослідження зон огляду з наземного пункту огляду та з ШСЗ» з дисципліни «Супутникові інформаційні системи» для студентів спеціальності 172 «Електронні комунікації та радіотехніка» всіх форм навчання/ Укл.: Логачова Л.М., Бугрова Т.І.– Запоріжжя,: ЗНТУ, 2024 – 15 с.

Укладачі: Л.М. Логачова, ст. викладач

Т.І. Бугрова, доцент , к.т.н.

Рецензент : С.С. Самойлик, доцент, к.ф.-м.н.

Відповідальний

за випуск : Л.М. Логачова, ст. викладач

Затверджено
на засіданні кафедри
радіотехніки та телекомунікацій
Протокол № 4
від “15” лютого 2024 р.

Затверджено
на засіданні НМК ФІБЕК
Протокол № 5
від “15” лютого 2024 р.

Зміст

1. Лабораторна робота Дослідження зон огляду з наземного пункту огляду та з ШСЗ	4
1.1. Мета роботи	4
1.2. Короткі теоретичні відомості	4
2. Лабораторні завдання	10
3. Зміст звіту	11
4. Контрольні запитання	11
5. Перелік посилань	12
Додаток 1 Довідковий матеріал до виконання пункту 2	13

1. Лабораторна робота №4 «Дослідження зон огляду з наземного пункту огляду та з ШСЗ»

1.1. Мета: Дослідити вплив місцезнаходження спостерігача на розміри зони огляду

1.2. Короткі теоретичні відомості

Нехай у деякій точці q на поверхні Землі (рис. 1.1) знаходиться наземний пункт прийому інформації (ППІ). Проведемо через точку q дотичну площину до поверхні земної кулі – площина місцевого горизонту. Зоною видимості (зоною огляду) ППІ назвемо область простору, в якій ІСЗ видимий із даного пункту. При чому під видимістю будемо розуміти «практичну радіовидимість», котра починається з деякого мінімального кута піднесення точки спостереження над горизонтом $\delta = \delta_{min} = 5 \dots 10^\circ$. Величина мінімального кута радіовидимості визначається умовами поширення радіохвиль та вимогами впевненого прийому сигналу на ШСЗ та ППІ. На рис. 1.1 штрихуванням зображена зона радіовидимості ППІ. У межах цієї зони, що обмежена геоцентричним кутом $\pm\varphi$, ШСЗ, котрий має кругову орбіту висотою h , буде спостерігатися при кутах місця $\delta > \delta_{min}$. Знайдемо вираз для розрахунку кутового радіусу геоцентричної зони огляду (зони видимості) ППІ $\varphi = \varphi_\delta$, яка відповідає мінімальному куту радіовидимості $\delta = \delta_{min}$. Через R_e позначимо радіус сферичної Землі.

Внутрішні кути трикутника osq задовольняють рівності :

$$\left(\frac{\pi}{2} + \delta\right) + \varphi + \varepsilon = \pi,$$

отже,

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - \varepsilon - \delta. \quad (1.1)$$

За теоремою синусів маємо

$$\frac{\sin(\pi/2 + \delta)}{R_e + h} = \frac{\sin \varepsilon}{R_e}.$$

Звідси, з урахуванням рівності $\sin\left(\frac{\pi}{2} + \delta\right) = \cos \delta$, отримуємо залежність між кутами ε і δ :

$$\varepsilon = \arcsin\left(\frac{R_e}{R_e + h} \cos \delta\right). \quad (1.2)$$

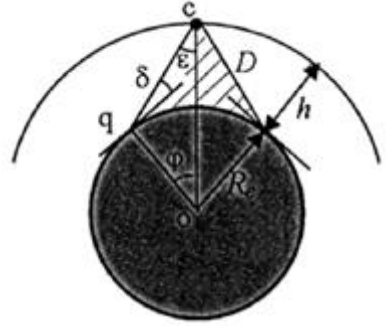
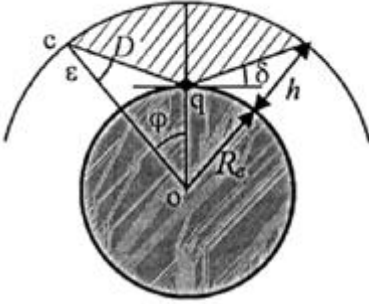


Рисунок. 1.1 – Зона радіовидимості ППП
(точка q)

Рисунок 1.2 – Зона радіовидимості з
ШСЗ (точка c)

Підставивши ϵ з останньої рівності в (1.1) і скориставшись тотожністю

$$\frac{\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{R_e}{R_e+h} \cos \delta\right) = \arccos\left(\frac{R_e}{R_e+h} \cos \delta\right),$$

отримаємо залежність центрального кута φ від кута місця КА δ :

$$\varphi = \arccos\left(\frac{R_e}{R_e+h} \cos \delta\right) - \delta. \quad (1.3)$$

Поклавши у (1.3) $\delta = \delta_{min}$, $\varphi = \varphi_{\delta}$, отримаємо шуканий вираз для кутового геоцентричного радіуса зони огляду ППП:

$$\varphi_{\delta} = \arccos\left(\frac{R_e}{R_e+h} \cos \delta_{min}\right) - \delta_{min}. \quad (1.4)$$

На рис.1.3 приведено дані розрахунків кутового радіуса зони огляду φ_{δ} як функції δ_{min} для різних h .

Межа зони огляду КА з ППП визначається не тільки мінімальним кутом радіовидимості $\delta = \delta_{min}$, але й максимальною дальністю зв'язку D_{max} , яку може забезпечити апаратура ППП та КА. З трикутника ocq (рис.1.1) слідує вираз для дальності D КА від ППП, як функції геоцентричного кута φ та висоти польоту КА h :

$$D = \sqrt{(R_e + h)^2 + R_e^2 - (R_e + h)R_e \cos \varphi}. \quad (1.5)$$

Додамо до цього виразу співвідношення (1.3) та підставимо в них $D = D_{max}$, $\varphi = \varphi_D$, $\delta = \delta_D$. У результаті отримаємо вираз, що встановлює зв'язок між

максимальною дальністю зв'язку D_{max} , кутом місця КА δ_D , при якому ця дальність досягається, та відповідним кутовим радіусом зони огляду φ_D :

$$D_{max} = \sqrt{(R_e + h)^2 + R_e^2 - (R_e + h)R_e \cos \varphi_D};$$

$$\varphi_D = \arccos\left(\frac{R_e}{R_e + h} \cos \delta_D\right) - \delta_D. \quad (1.6)$$

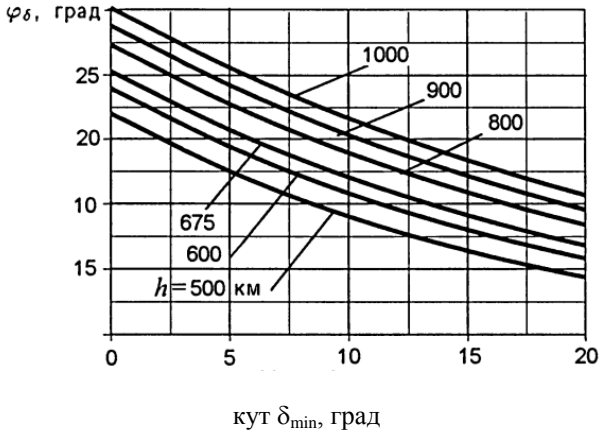


Рисунок 1.3 – Зона видимості як функція δ_{min}

На рис. 1.4 та 1.5 наведено дані розрахунків D_{max} та φ_D за формулами (1.6) для різних h та δ_D .

Тепер знайдемо вираз для розрахунку φ_{ϵ} - зони видимості поверхні Землі с КА (геоцентричний кутовий радіус смуги огляду), вважаючи, що кутове поле огляду апаратури КА є косинус з вершиною в КА та з віссю, що направлена по вертикалі та кутом напіврозтвору ϵ (див. рис. 1.2).

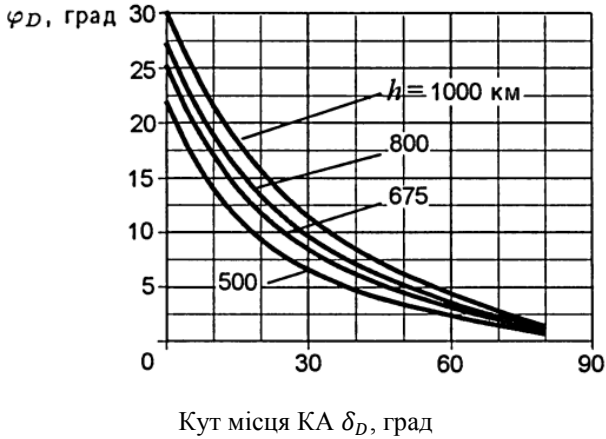


Рисунок 1.4 – Характеристики зони видимості ППІ при обмеженій дальності видимості D_{max}

Повторюючи пророблені вище викладки, прийдемо до формули (1.2), котру тепер запишемо у вигляді :

$$\delta = \arccos \left(\frac{R_e + h}{R_e} \sin \varepsilon \right).$$

Підставимо це співвідношення в (1.1), і в результаті отримаємо вираз для φ_ε .

$$\varphi_\varepsilon = \arcsin \left[\left(1 + \frac{h}{R_e} \right) \sin \varepsilon \right] - \varepsilon. \quad (1.7)$$

Тепер знайдемо зворотнє співвідношення, для цього виразимо ε як функцію φ_ε . Запишемо співвідношення (1.7) у вигляді

$$\sin(\varphi_\varepsilon + \varepsilon) = \left(1 + \frac{h}{R_e} \right) \sin \varepsilon.$$

Розділивши обидві частини рівності на $\sin \varepsilon$, отримуємо

$$\frac{\sin \varphi_\varepsilon}{\sin \varepsilon} = \left(1 + \frac{h}{R_e} \right) - \cos \varphi_\varepsilon.$$

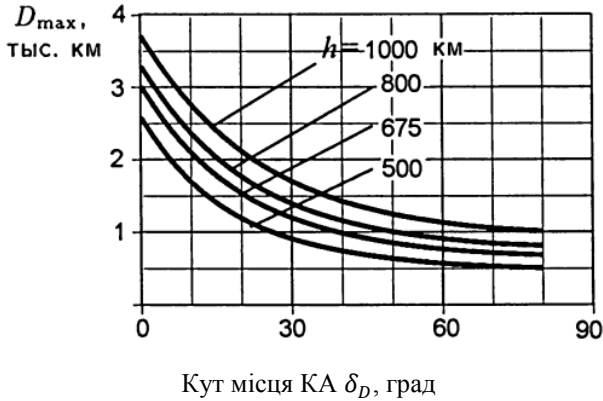


Рисунок 1.4 – Характеристики зони видимості ППЗ при обмеженні дальності видимості D_{max}

З цього співвідношення отримуємо потрібне співвідношення для ε :

$$\varepsilon = \arctg \frac{\sin \varphi_\varepsilon}{\left(1 + \frac{h}{R_e}\right) \cos \varphi_\varepsilon}. \quad (1.8)$$

З формули (1.7) виразимо h як функцію φ_ε та ε :

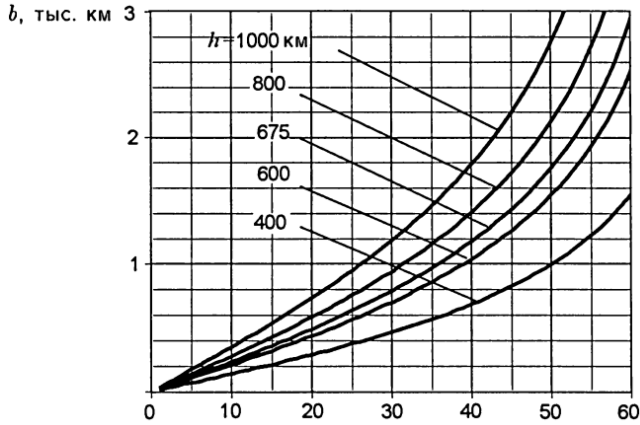
$$h = R_e \left(\frac{\sin(\varphi_\varepsilon + \varepsilon)}{\sin \varepsilon} - 1 \right). \quad (1.9)$$

Для розглянутих значень h близько 1000 км та ε близько 30 ... 45°, кут φ_ε не перевищує 10°, тож покладемо $\sin \varphi_\varepsilon \approx \varphi_\varepsilon$ та $\cos \varphi_\varepsilon \approx 1$. Тоді з виразу (1.8) отримаємо

$$\varphi_\varepsilon \approx \frac{h}{R_e} \operatorname{tg} \varepsilon \quad (1.8')$$

Співвідношення (1.7) – (1.9) дозволяють визначити одну з змінних: h – висоту орбіти КА, ε – кутовий радіус поля огляду апаратури КА, φ_ε – геоцентричний кутовий радіус смуги огляду КА через дві інші.

Таким чином, у своєму русі відносно Землі ШСЗ апаратурою з полем огляду 2ε «висвітлює» на поверхні Землі смугу огляду геоцентричною шириною $2\varphi_\varepsilon$, симетричну відносно траси польоту.



Кутовий радіус поля огляду КА ε , град

Рисунок 1.6 – Ширина смуги огляду b в залежності від кутового радіусу поля зору апаратури ε та висоти орбіти h

Лінійний розмір смуги огляду $b = 2R_e 2\varphi_\varepsilon$, або з урахуванням виразів (1.7) та (1.8')

$$b = 2R_e \left\{ \arcsin \left[\left(1 + \frac{h}{R_e} \right) \sin \varepsilon \right] - \varepsilon \right\} \approx 2h \operatorname{th} \varepsilon. \quad (1.7')$$

На рис. 1.6 приведені дані розрахунків за формулою (1.7'). Зауважимо, до речі, що лінійний розмір L на поверхні Землі зв'язаний з геоцентричним кутом φ° (у градусах) співвідношенням $L \approx 111 \varphi^\circ$ км.

Може виникнути запитання, чого зону радіовидимості ППІ, а тим паче зону огляду поверхні Землі с КА оцінюють геоцентричним кутом.

Сенс використання геоцентричного уявлення зон огляду полягає у тому, що і положення ППІ, і положення КА при проведенні балістичних розрахунків також задаються геоцентричними радіус-векторами, отже, видимість КА та ППІ легко виявляється при обчисленні центрального кута μ між цими векторами: якщо μ менше кутового радіуса зони огляду, то ППІ бачить КА. Для обчислення кута μ відмітимо, що вектори r та $r_{\text{ппі}}$ можуть бути записані у вигляді

$$\begin{aligned} r &= r(\cos \varphi \cos \lambda, \sin \varphi \sin \lambda, \sin \varphi)^T; \\ r_{\text{ппі}} &= R_e(\cos \varphi_{\text{ппі}} \cos \lambda_{\text{ппі}}, \cos \varphi_{\text{ппі}} \sin \lambda_{\text{ппі}}, \sin \varphi_{\text{ппі}})^T, \end{aligned} \quad (1.10)$$

де λ , φ , $\lambda_{\text{ППІ}}$, $\varphi_{\text{ППІ}}$ – довгота та широта КА та ППІ відповідно у деякій геоцентричній прямокутній системі координат (не важливо у якій). Центральний кут μ між векторами r та $r_{\text{ППІ}}$ визначається із співвідношення

$$\cos \mu = \frac{(r, r_{\text{ППІ}})}{(r R_e)}. \quad (1.11)$$

Розкриваючи у (1.11) вираз для скалярного добутку та використовуючи при цьому співвідношення (1.10), отримуємо :

$$\cos \mu = \sin \varphi \sin \varphi_{\text{ППІ}} + \cos \varphi \cos \varphi_{\text{ППІ}} \cos(\lambda - \lambda_{\text{ППІ}}). \quad (1.12)$$

Координати ППІ відомі, координати КА визначаються інтегруванням системи диференціальних рівнянь його руху. Далі визначається кут μ та порівнюється з кутовим радіусом зони огляду. Результат – висновок про видимість КА з заданого ППІ або заданої точки поверхні Землі з КА у даний момент часу.

2 Лабораторне завдання*

2.1 Виконати дослідження максимального часу знаходження КА на круговій орбіті $h=600$ км в зоні радіовидимості пункту приймання супутникової інформації, якщо антена ППІ працює при мінімальному куті $\alpha_{\text{min}}=5^0$ з максимальною дальністю $D_{\text{max}}=2000$ км.

2.2 Визначити азимут та кут місця встановлення телевізійної антени в м. Запоріжжі (довгота 35 град 24 хв., широта 48 град 13 хв.) для приймання телевізійного сигналу з геостационарного супутника, який розташовано над екватором в точці стояння з географічною довготою $L_0=36^0$ східної довготи. Виконати розрахунки для м. Дніпро, Чернігів, Харків.

2.3 Визначити розміри смуги огляду бортової апаратури КА, що знаходиться на орбіті на висоті 500 км. Кут прокачки апаратури становить $\angle 40^0$. Розмірами поля зору апаратури знехтувати.

2.4 Визначити максимальну зону радіовидимості пункту приймання інформації, максимальну дальність видимості від ППІ до КА, а також максимальну геоцентричну зону огляду поверхні Землі з супутника та мінімальне поле зору бортової апаратури для одночасного спостереження всього земного горизонту, якщо КА перебуває на круговій орбіті.

* див. Додаток 1.

3 Зміст звіту

3.1 Результати дослідження максимального часу знаходження КА на круговій орбіті

3.2 Результати визначення азимутів та кутів місця встановлення телевізійних антен в містах Запоріжжя, Дніпро, Чернігів, Харків подати у вигляді таблиці.

3.3 Результати визначення розмірів смуги огляду бортової апаратури.

3.4 Результати визначення максимальної зони радіовидимості пункту приймання інформації, дальності видимості від ППІ до КА, геоцентричної зони огляду поверхні Землі з супутника та мінімального поля зору бортової апаратури.

4 Контрольні запитання

4.1 Що таке зона огляду?

4.2 Чим визначається величина мінімального кута радіовидимості?

4.3 Поясніть поняття зони радіовидимості з КА та з ППІ.

4.4 Що обмежує максимальну дальність видимості?

4.5 Поясніть геоцентричну систему координат.

4.6 Від чого залежить розмір смуги огляду земної поверхні космічним апаратом?

4.7 Поясніть терміни «апогей» та «перигей».

4.8 Що таке довгота висхідного вузла?

4.9 Що таке ексцентриситет орбіти та що він характеризує?

Перелік посилань

1. Омелянюк І.В. Цифрове ефірне телебачення. Практика, нові напрямки розвитку цифрового ефірного телебачення та створення цифрових ефірних телемереж. Посібник для фахівців телебачення. – К.: ЗАО «ТЕЛЕРАДІОКУР'ЄР», 2009. – 192 с., іл.
2. Гризьків З.Д. Прикладні телевізійні системи: навчальний посібник. – Львів, 2003. – 250 с., іл..
3. Основи теорії сигналів: Підручник / За ред. Б.А. Мандзія. –Львів: Видавничий дім «Ініціатива», 2008. – 240 с.
4. В.П. Бабак, О.Г. Корченко. Інформаційна безпека та сучасні мережеві технології. – К. : НАУ, 2003. – 670 с.
5. Recommendation ITU-R. P.1546-1. Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3000 MHz. (2001-2003).

Додаток.1 Довідковий матеріал до виконання пункту 2

Мінімальний кут місця, при котрому працює антена, $\delta_{min} = 5^\circ$. Однак не цей кут у даному випадку є критичним. Максимальна дальність, на якій працює антена, $D_{max} = 2000$ км та досягається вона на куті місця $\delta_D \approx 10^\circ$ (см. рис. 3.5). Відповідний геоцентричний кут (див. рис. 1.4) $\varphi_D \approx 17,5^\circ$. Кутова швидкість супутника дорівнює $\frac{360^\circ}{98 \text{ хв}}$, де 98 хв – приблизний період обертання супутника. Значить, супутник, що проходить через зеніт ППП, буде знаходитися у зоні радіовидимості приблизно $2 * 17,5 * \frac{98}{360} \approx 10$ хв. Якщо супутник проходить не через зеніт ППП, то час його знаходження у зоні огляду буде менший.

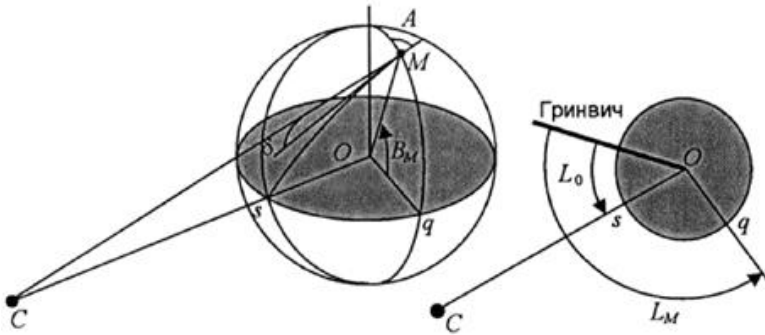


Рисунок Д.1 – До визначення кутів виставлення антени на геостационарний супутник

До завдання 2.2.

Знайдемо кут МОС між напрямками на пункт прийому (Москва) і на супутник (рис.Д.1). Для цього можна використати формулу (6.6) для кута ψ між напрямками на КА і на Сонце :

$$\cos \psi = \sin \delta_C \sin \varphi + \cos \delta_C \cos \varphi \cos \xi .$$

Оскільки КА геостационарний, його орбіта лежить в площині екватора, і широта КА в будь-якій точці траєкторії $\varphi = 0$. В якості напрямку на Сонце в цій формулі роздивимося напрямком на пункт прийому (напрямок в т. М); $\angle \text{МОС} = \psi$; $\angle \xi = \angle sOq = L_M - L_0$. У результаті отримуємо для кута ψ співвідношення

$$\cos \psi = \cos B_M \cos(L_M - L_0),$$

або

$$\psi = \arccos(\cos B_M \cos(L_M - L_0)) .$$

З теореми синусів маємо

$$\frac{\sin\psi}{\sin 90^\circ} = \frac{\sin(L_M - L_0)}{\sin A}.$$

Отже, азимут лінії прицілювання можна знайти із залежності

$$A = \arcsin(L_M - L_0) / \sin\psi).$$

Щоб визначити кут місця супутника δ в точці спостереження, на самперед знайдемо дальність від пункту спостереження до ІСЗ:

$$d = \sqrt{R_e^2 + (R_e + h)^2 - 2(R_e + h)R_e \cos\psi},$$

де $h=35800$ км для геостационарної орбіти. У трикутнику АОС використаємо теорему синусів:

$$\frac{d}{\sin\psi} = (R_e + h) / \sin(90^\circ + \delta).$$

Звідси отримуємо кут місця ШСЗ

$$\delta = \arccos\left(\frac{R_e + h}{d} \sin\psi\right).$$

Користуючись отриманими виразами, знайдемо азимут і кут місця антени для наступних даних: $L_M = 37,5^\circ$, $L_0 = 36^\circ$, $B_M = 56^\circ$, $R_e = 6378$ км, $R_e + h = 6378 + 35800 = 42178$ км. Отримуємо:

$$\psi = \arccos(\cos 56^\circ \cos(37,5^\circ - 36^\circ)) \approx 56^\circ;$$

$$A = \arcsin(37,5^\circ - 36^\circ) / \sin\psi \approx 180^\circ;$$

$$d = \sqrt{6378^2 + 42178^2 - 2 * 42178 * 6378 * \cos 56^\circ} = 38972 \text{ км.}$$

$$\delta = \arccos\left(\frac{42178}{38972} \sin 56^\circ\right) = 26^\circ.$$

Отже, антену у Запоріжжі треба встановлювати в напрямку на південь під кутом 26° до горизонту.

До завдання 2.3

Розміром поля зору апаратури КА, по умові завдання, можна знехтувати. В цьому випадку кутовий радіус поля огляду КА дорівнює куту прокачування бортової апаратури $\xi = \pm 40^\circ$. Використаємо формулу (1.7), отримаємо

$$\varphi_C = \arcsin\left[\left(1 + \frac{500}{6378,14}\right) \sin 40^\circ\right] * 57,29578 - 40^\circ = 3,9^\circ.$$

Лінійний розмір L на поверхні Землі пов'язаний з центральним кутом φ° співвідношенням $L = 111\varphi^\circ$ км, тому смуга огляду Землі із супутника $L_{ог} \approx \pm 111 * 3,9^\circ = \pm 433$ км. Для перевірки результату можна використовувати рис. 1.6.

До завдання 2.4

Уявимо, що ШСЗ проходить точно в зеніті ППІ. Радіовидимість ШСЗ настає при куті місця $\delta = 0^\circ$. Поле зору бортової апаратури утворює конус, утворюючі якого є дотичними до поверхні Землі. Тоді з рис. Д.2 можна визначити все, що треба у завданні: максимальна зона радіовидимості ППІ при $\delta = 0^\circ$:

$$\varphi_\delta = \arccos\left(\frac{R_e}{R_e + h}\right);$$

максимальна дальність видимості від ППІ до КА

$$D_{max} = \sqrt{(R_e + h)^2 - R_e^2};$$

максимальна геоцентрична зона огляду Землі із супутника

$$\varphi_\varepsilon = \arccos(R_e / (R_e + h)) = \varphi_\delta;$$

повне поле зору бортової апаратури, яка призначена для одночасного нагляду усього земного горизонту дорівнює $2\varepsilon = 2 \arcsin\left(\frac{R_e}{(R_e+h)}\right)$.