

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ імені І. І. МЕЧНИКОВА
ФІЗИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Б. О. Мурніков, Т. І. Кабанова

**ОБРОБКА РАДІОАСТРОНОМІЧНИХ
СПОСТЕРЕЖЕНЬ**

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

для студентів фізичного факультету
спеціальності «астрономія»

ОДЕСА
ОНУ
2018

УДК 52-13:621.396.9(076)
М91

Рекомендовано до друку Вченою радою
фізичного факультету ОНУ імені І. І. Мечникова.
Протокол № 9 від 29 травня 2017 р.

Рецензенти:

С. М. Андрієвський, доктор фізико-математичних наук, професор, директор
НДІ «Астрономічна обсерваторія» Одеського національного університету імені
І. І. Мечникова;

В. В. Ковтюх, доктор фізико-математичних наук, провідний науковий
співробітник НДІ «Астрономічна обсерваторія» Одеського національного
університету імені І. І. Мечникова.

Мурніков Б. О.

М91 Обробка радіоастрономічних спостережень: методичні
вказівки для студентів фізичного факультету спеціальності
«астрономія» / Б. О. Мурніков, Т. І. Кабанова. – Одеса:
Одеський національний університет імені І. І. Мечникова,
2018. – 20 с.

УДК52-13:621.396.9(076)

Мета і зміст роботи

1. Ознайомитись з принципами деяких методів радіоастрономічних спостережень.
2. Засвоїти основні поняття радіоастрономії.
3. Навчитися обробляти записи джерел радіовипромінювання.

Радіовипромінювання космічних об'єктів приймається спеціальними приладами – радіотелескопами. Радіотелескоп – астрономічний інструмент для дослідження радіовипромінювання космічних об'єктів у діапазоні від дека- до міліметрових хвиль (у межах вікон прозорості земної атмосфери для радіохвиль). Земна атмосфера прозора для радіохвиль у діапазоні приблизно від 1 см до 20 м. Хвилі, коротші 1 см, за виключенням вузьких ділянок 1 мм, 3,4 мм і 8 мм, повністю поглинаються нижніми шарами земної атмосфери, а хвилі, довші декількох десятків метрів, відбиваються верхніми її шарами – іоносферою.

Радіотелескоп складається з антени; фідерної лінії (електричної лінії, по якій передається енергія); чутливого радіоприймального пристрою – радіометра, який підсилює прийняте антеною радіовипромінювання і перетворює його у вигляд, зручний для реєстрування й подальшого опрацювання. Радіохвилі, які уловлює антена, створюють в ній електричні коливання високої частоти, котрі надходять у радіометр, де підсилюються та реєструються. Найбільш наочна форма реєстрації – самописцем на паперовій стрічці, що рівномірно рухається. Отриманий на паперовій стрічці запис радіосигналів зветься регістрограмою. Одночасно на цю ж стрічку записуються у вигляді штрихів позначки часу, як правило, з інтервалом в одну хвилину.

Існують найрізноманітніші конструкції антен – у вигляді сферичних і параболічних дзеркал, прямокутних і циліндричних ґрат і т. д.

Антені радіотелескопів, що приймають міліметрові, сантиметрові, дециметрові і метрові хвилі, найчастіше являють собою параболоїдальні відбивачі. У фокусі параболоїда встановлюють

опромінювач – прилад, що збирає радіовипромінювання, яке спрямовується на нього дзеркалом. Опромінювач передає прийняту енергію на вхід приймача (радіометра).

Дзеркала радіотелескопів можна робити не суцільними. Наприклад, можна натягнути металеву сітку на каркас параболоїдальної форми. Радіотелескоп також можна зробити нерухомим, якщо замінити поворот дзеркала зміщенням опромінювача в межах $10\text{--}20^\circ$. Нерухома антена (вона має бути сферичною), що спрямована в zenit, не дозволяє приймати радіовипромінювання з будь-якої точки небесної сфери, але завдяки добовому обертанню Землі і можливості зміщувати опромінювач значна частина неба буде доступною для спостережень.

Найбільша в світі радіоастрономічна антена, що являє собою дзеркало такого типу, має діаметр 500 м і знаходиться у Китаї (FAST – Five hundred meter Aperture Spherical Telescope).

Радіоастрономічні дзеркала менших розмірів встановлюються на вертикально-азимутальному або екваторіальному монтуванні.

Радіотелескопи дуже великого розміру можуть бути побудовані із великої кількості окремих дзеркал, що фокусують випромінювання на один опромінювач.

На хвилях довжиною від декількох метрів і більше використовуються системи, що складаються з великої кількості дипольних антен, електричний зв'язок між якими забезпечує необхідну для радіотелескопа спрямованість прийому.

Кожна антена характеризується кутом спрямованості θ . Для опису кутової роздільної здатності радіотелескопа використовується спеціальна характеристика – діаграма спрямованості – полярна діаграма залежності потужності на виході антени від положення джерела відносно осі радіотелескопа (рис. 1).

Діаграма спрямованості складається з головної пелюстки та не показаних на рис. 1 бокових пелюсток. Ширина головної пелюстки звичайно визначається на рівні половини потужності (θ). Є також і задня пелюстка, яка має напрямок, протилежний головній пелюстці. Діаграма спрямованості антени – це фактично дифракційна картина

за рахунок обмеження діаметра D телескопа. Кут (θ) зветься кутом спрямованості антени на рівні половини потужності.

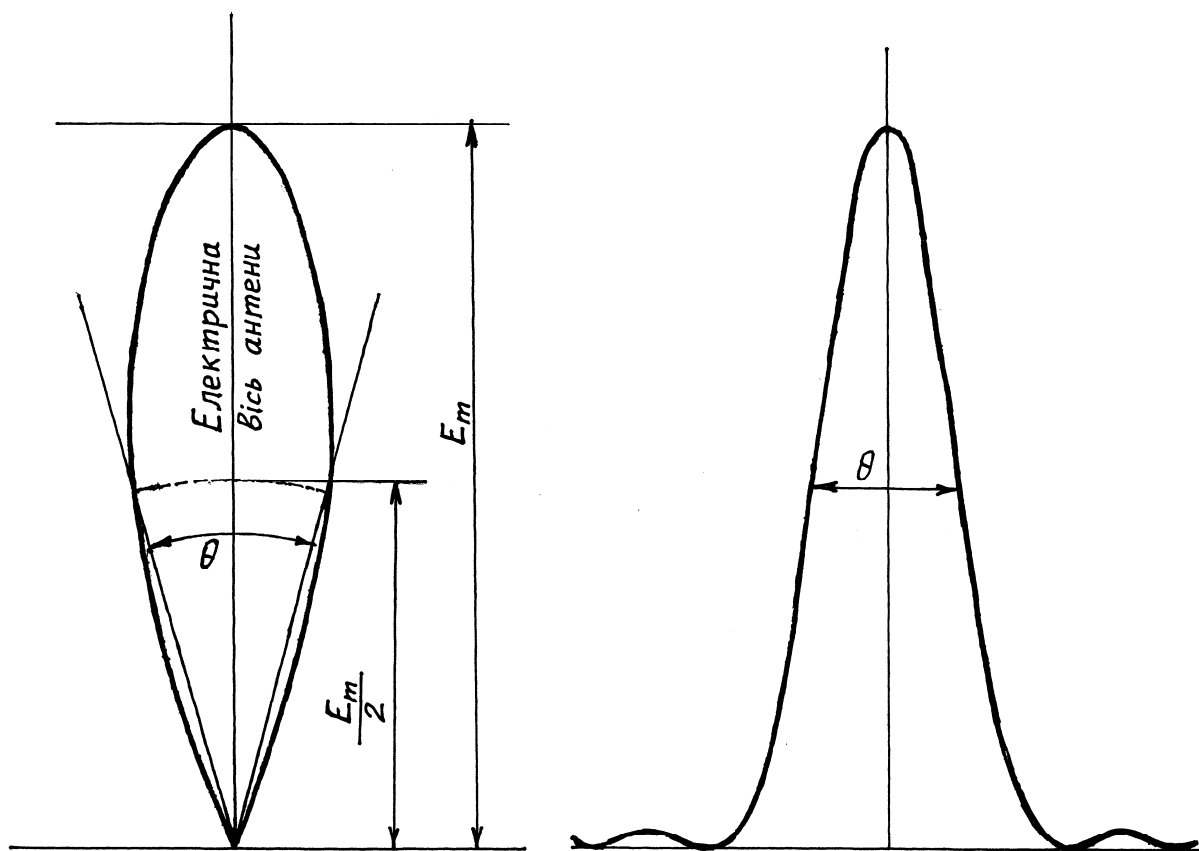


Рис. 1. Діаграма спрямованості (ліворуч) та її переріз (праворуч)

Найбільша потужність енергії випромінювання сконцентрована в головній пелюстці, за шириною якої визначають кутову роздільну здатність антени θ' на рівні половини потужності.

Значення кута спрямованості θ залежить від розмірів антени і довжини хвилі λ , що приймається антеною. Антена у вигляді сферичного або параболічного дзеркала діаметром D має

$$\theta = 140^\circ \frac{\lambda}{D} = 8400' \frac{\lambda}{D}, \quad (1)$$

де λ і D виражені в однакових лінійних одиницях виміру, а θ – в градусах ($^\circ$) або мінутах дуги ($'$).

Роздільна здатність радіотелескопа θ' приймається рівною

$$\theta' = \frac{\theta}{2} = 70^\circ \frac{\lambda}{D} = 4200' \frac{\lambda}{D}, \quad (2)$$

оскільки два радіоджерела, розташовані на взаємній кутовій відстані $d < \theta'$, не будуть розрізнятися окремо, а будуть сприйматися як одне. Чим менший кут спрямованості антени θ , тим більша роздільна здатність радіотелескопа. У сучасних великих радіотелескопів роздільна здатність складає приблизно $30''$, але це значно менше роздільної здатності оптичних телескопів, яка досягає $0,03''$.

Роздільна здатність оптичних телескопів визначається в секундах дуги і обчислюється за формулою (2), в якій діаметр D виражається в см, причому для візуальних телескопів приймають $\lambda = 5500 \text{ \AA} = 55 \cdot 10^{-6} \text{ см}$, а для фотографічних – $\lambda = 4250 \text{ \AA} = 42,5 \cdot 10^{-6} \text{ см}$.

При спостереженні радіоджерел радіотелескоп спрямовують на точку неба, яка розташована дещо на захід від радіоджерела. Внаслідок добового обертання небесного склепіння радіоджерело поступово з'являється в полі зору радіотелескопа, і з його наближенням до електричної осі антени потужність радіовипромінювання, що сприймається антеною, поступово збільшується, сягає максимального значення, а потім (при віддаленні радіоджерела від електричної осі антени) знову поступово зменшується до нуля.

Якщо кутові розміри θ_0 джерела радіовипромінювання значно менші кута спрямованості антени θ ($\theta_0 \ll \theta$), то для такої антени джерело буде точковим, а ідеальна регістрограма запису його потужності, що сприймається, буде мати вигляд кривої Гаусса (рис. 2). Якщо ж $\theta_0 \gg \theta$, то джерело є протяжним, і регістрограма має вигляд сходинок (рис. 3).

По регістрограмі потужності, що сприймається, можна визначити кутовий розмір радіоджерела θ_0 . Для цього достатньо виміряти на регістрограмі відстань $\theta_{\text{п}}$, яка відповідає половині найбільшої потужності (рис. 2). Ця відстань $\theta_{\text{п}}$ вимірюється на регістрограмі в міліметрах, а потім за масштабом вздовж осі часу t виражається в одиницях часу $\tau = \mu \theta_{\text{п}}$. Тут масштаб μ визначається за позначками часу на цій самій регістрограмі. Очевидно, τ показує проміжок часу, протягом якого джерело радіовипромінювання

перетинало б діаметр поля зору радіотелескопа, якби потужність, що сприймається, дорівнювала би половині максимальної. Тоді кутовий діаметр радіоджерела на половині потужності

$$\theta_m = 15\tau \cdot \cos \delta, \quad (3)$$

де δ – схилення радіоджерела.

Якщо τ виражено в хвилинах часу, то θ_m ми отримаємо в мінутах дуги; якщо τ виражено в секундах часу, то θ_m – в секундах дуги.

За значенням θ_m обчислюється кутовий діаметр джерела радіовипромінювання

$$\theta_0 = \sqrt{\theta_m^2 - \theta^2}, \quad (4)$$

де θ – кут спрямованості антени, виражений в тих самих одиницях виміру, що і θ_m .

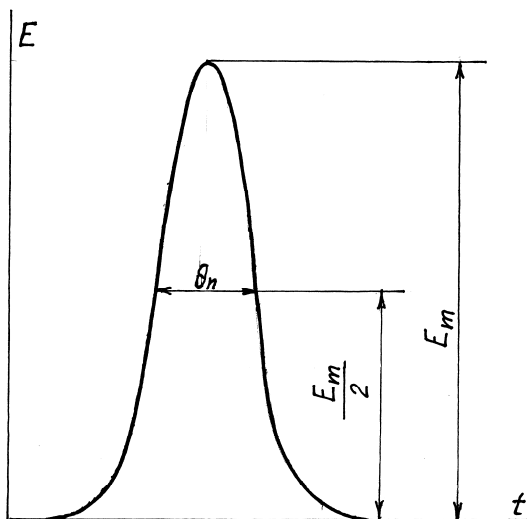


Рис. 2

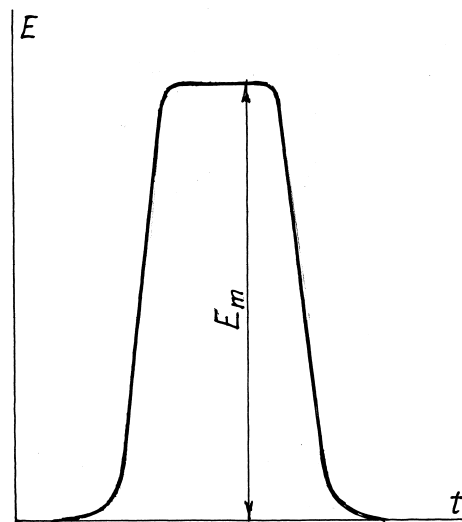


Рис. 3

У дійсності регістрограма не має виду плавної кривої, оскільки антена сприймає не тільки радіовипромінювання спостережуваного радіоджерела, але й численні природні та індустріальні радіозавади (шуми), в тому числі і власні шуми радіоприймальної апаратури. Внаслідок накладання завад на випромінювання радіоджерела регістрограма має вигляд зазубленої кривої, що зветься шумовою доріжкою (рис. 4а, запис випромінювання природного радіоджерела). Для того, щоб відокремити завади від радіовипромінювання джерела,

необхідно по середній лінії регістрограми провести плавну криву, яка і буде зображати прийняте радіовипромінювання природного джерела.

Це радіовипромінювання характеризується спектральною густиною потоку енергії S_ν , тобто кількістю енергії, що проходить через одиницю поверхні антени за одну секунду в одиничному інтервалі частот $\Delta\nu = 1$ Гц. Одиницею спектральної густини потоку енергії в СІ є $1 \text{ Дж}/(\text{с} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{Гц}) = 1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{Гц})$.

Однак для радіоастрономічних вимірювань використовується інша одиниця, яка зветься янським (на честь інженера К. Янського, який вперше виявив космічне радіовипромінювання в 1932 році). $1 \text{ Ян} = 10^{-26} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{Гц})$.

Спектральна густина потоку енергії дорівнює

$$S_\nu = \frac{2kT_a}{A_e}, \quad (5)$$

де $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ – стала Больцмана, A_e – ефективна площа антени, T_a – антенна температура джерела.

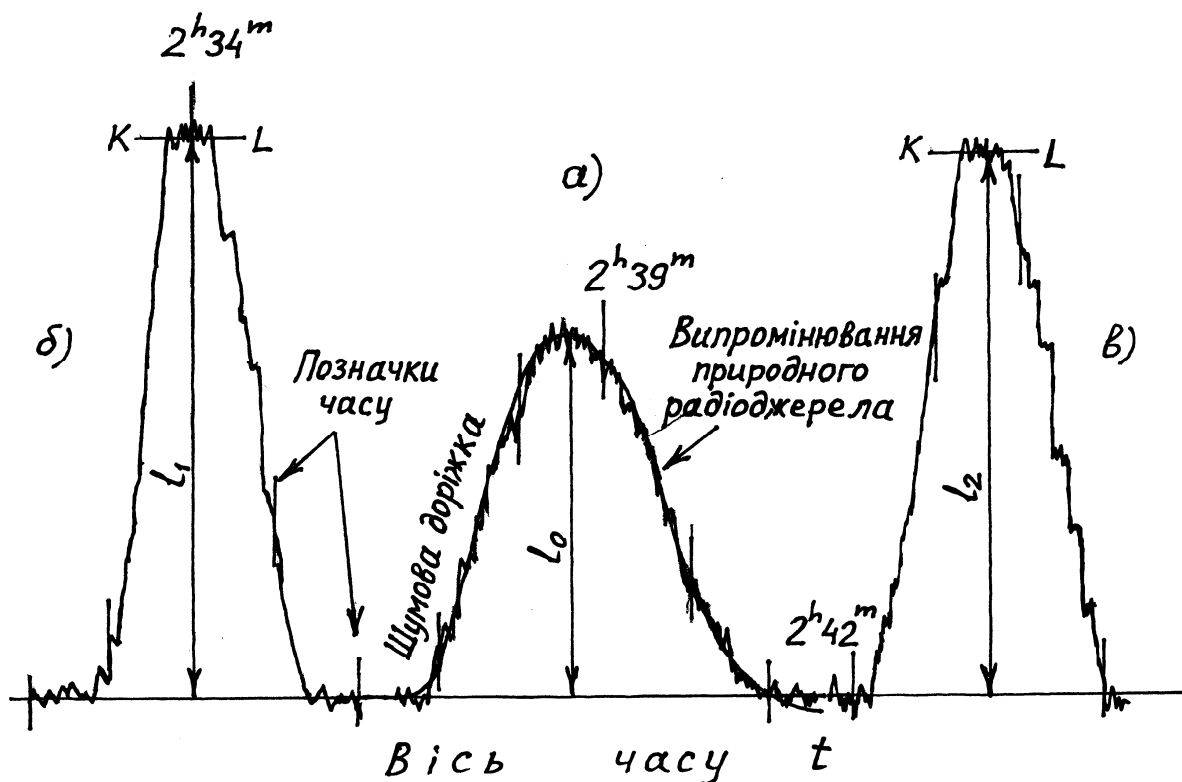


Рис. 4

Ефективна площа антени A_e не дорівнює її геометричній площі і залежить від типу антени та умов її опромінення. Зокрема, для параболічної антени

$$A_e \approx \frac{A}{2}, \quad (6)$$

де A – геометрична площа антени.

Антенна температура джерела T_a – така температура, до якої необхідно нагріти узгоджений опір, підключений до входу приймача замість антени, щоб отримати у приймачі шум такої самої інтенсивності, як і від природного джерела радіовипромінювання. Інакше кажучи, антенна температура – це приріст температури антени при наведенні її на джерело.

Сигнал, що реєструється на виході приймача, не дозволяє безпосередньо встановити спектральну потужність P_v космічного радіоджерела, оскільки невідома відповідність між показами приладу, що записує прийняте радіовипромінювання, і потужністю самого випромінювання. Ця невизначеність виключається шляхом калібрування, тобто записом радіовипромінювання штучного джерела з відомою температурою T_k , що зветься антенною температурою калібрувального джерела або просто калібрувальною температурою. До входу радіоприймача підключається стандартний генератор шуму, зокрема, таким генератором може бути опір, поміщений у киплячий гелій або азот, температура кипіння якого добре відома. Запис радіовипромінювання генератора шуму проводиться двічі – до і після спостережень космічного радіоджерела. Тоді на реєстрограмі (рис. 4), окрім запису радіовипромінювання космічного джерела (а), виходять калібрувальні записи (б і в), що зветься калібрувальними сходишками. Вони також викривлені сторонніми шумами, для виключення котрих проводять по їхнім середнім точкам пряму лінію KL. Ординати l_1 і l_2 калібрувальних сходинок, хоча дещо відрізняються одна від одної внаслідок неврахованих похибок, але обидві пропорційні калібрувальній температурі T_k , а ордината l_0 гауссової кривої запису

радіовипромінювання космічного джерела пропорційна його антенній температурі T_a . Тому, вимірявши на регістрограмі ординати l_1 і l_2 в міліметрах та знаючи значення T_k , знайдемо

$$l = \frac{l_1 + l_2}{2} \quad (7)$$

і

$$T_a = T_k \frac{l_0}{l}, \quad (8)$$

що дозволяє за формулою (5) обчислити спектральну густину потоку радіовипромінювання S_v .

Для того, щоб визначити спектральну інтенсивність радіовипромінювання I_v космічного джерела, необхідно знати тілесний кут Ω_0 , в якому це радіовипромінювання розповсюджується. Величини S_v і I_v пов'язані співвідношенням

$$S_v = I_v \Omega_0, \quad (9)$$

причому Ω_0 визначається за кутовим діаметром θ_0 радіоджерела у допущенні, що радіоджерело має вигляд диска. Тоді виражений в стерadianах кут Ω_0 такий:

$$\Omega_0 = \frac{\pi}{4} \theta_0^2 = 0,785 \theta_0^2, \quad (10)$$

де θ_0 – в радіанах.

Оскільки із спостережень θ_0 ми отримуємо в мінутах дуги ('), то більш зручною для обчислень є формула:

$$\Omega_0 = \frac{0,785}{11,82 \cdot 10^6} \theta_0^2 = 6,64 \cdot 10^{-8} \theta_0^2, \quad (11)$$

в якій $11,82 \cdot 10^6$ є число квадратних мінут в 1 квадратному радіані, θ_0 береться із формули (4) в мінутах дуги, а Ω_0 – в стерadianах.

Знаючи спектральну інтенсивність I_v , легко обчислити спектральну потужність радіовипромінювання джерела у всіх напрямках:

$$P_v = 4\pi I_v, \quad (12)$$

причому P_v , в залежності від одиниць вимірювання I_v , виражено або у Вт/(м²·Гц), або в Ян.

Загальна потужність радіовипромінювання в інтервалі частот $\Delta\nu = \nu_2 - \nu_1$ буде дорівнювати

$$P = \int_{\nu_1}^{\nu_2} P_\nu \cdot d\nu,$$

і, якщо P_ν для інтервалу частот $\Delta\nu$ однакова, тоді

$$P = P_\nu \cdot \Delta\nu. \quad (13)$$

Яскравісна температура T_b – це температура абсолютно чорного тіла, котре дає на даній частоті в одиничному інтервалі частот таку саму спостережну інтенсивність, як джерело.

Яскравісну температуру джерела космічного радіовипромінювання можна обчислити за формулою

$$T_b = T_a \frac{\Omega_0}{\Omega_a}, \quad (14)$$

де T_a – антенна температура джерела, Ω_0 – його тілесний кут, Ω_a – антенний тілесний кут, що обчислюється за кутами стеження γ і β , котрі визначають просторову форму діаграми спрямованості.

Якщо γ і β виражені в мінутах дуги ('), то

$$\Omega_a = \frac{\gamma\beta}{11,82 \cdot 10^6} = 8,46 \cdot 10^{-8} \gamma\beta \text{ (стерадіан)}. \quad (15)$$

Будь-який радіоприймач (радіометр) характеризується чутливістю, тобто мінімальною зміною вхідної температури, яку може зафіксувати радіотелескоп. Визначається чутливість радіометра за формулою

$$\Delta T = \frac{\pi}{2} \frac{T_{ш}}{\sqrt{\tau_0 \cdot \Delta\nu}}, \quad (16)$$

де $T_{ш}$ – шумова температура, τ_0 – стала часу (у секундах), $\Delta\nu$ – смуга пропускання (в Гц).

Шумова температура $T_{ш}$ характеризує величину власного шуму в приймачі. Стала часу τ_0 характеризує проміжок часу, протягом якого відбувається усереднення сигналу, що приймається, тобто це час накопичення сигналу. Таким чином, ΔT визначає ступінь реагування приймача на радіосигнал.

Зміст роботи

1. Отримати у викладача реєстрограму радіовипромінювання одного із наведених радіоджерел:

- 1) А ($\alpha = 3^{\text{h}}16^{\text{m}}09^{\text{s}}$, $\delta = +16^{\circ}17'40''$);
- 2) В ($\alpha = 22^{\text{h}}30^{\text{m}}08^{\text{s}}$, $\delta = +11^{\circ}28'24''$);
- 3) С ($\alpha = 1^{\text{h}}34^{\text{m}}50^{\text{s}}$, $\delta = +32^{\circ}54'20''$);
- 4) D ($\alpha = 3^{\text{h}}16^{\text{m}}09^{\text{s}}$, $\delta = +16^{\circ}17'40''$);
- 5) E ($\alpha = 22^{\text{h}}30^{\text{m}}08^{\text{s}}$, $\delta = +11^{\circ}28'24''$);
- 6) F ($\alpha = 1^{\text{h}}34^{\text{m}}50^{\text{s}}$, $\delta = +32^{\circ}54'20''$);
- 7) G ($\alpha = 23^{\text{h}}21^{\text{m}}12^{\text{s}}$, $\delta = +58^{\circ}32'06''$);
- 8) H ($\alpha = 5^{\text{h}}26^{\text{m}}00^{\text{s}}$, $\delta = -66^{\circ}06'12''$).

2. Ототожнити на реєстрограмі калібрувальні сходишки, шумову доріжку, позначки часу і визначити тривалість запису радіовипромінювання калібрувального і природного радіоджерел.

3. Виключити із реєстрограми завади і графічно зобразити ймовірну криву запису радіовипромінювання тих самих радіоджерел.

4. По реєстрограмі радіовипромінювання природного радіоджерела визначити його кутовий діаметр на половині потужності.

5. Обчислити кут спрямованості антени, вважаючи її параболічною діаметром 50 м, а довжина хвилі прийнятого радіовипромінювання дорівнює: 1) 3,6 см; 2) 4,8 см; 3) 6,0 см; 4) 7,1 см; 5) 8,3 см; 6) 9,5 см; 7) 10,2 см; 8) 11,4 см.

6. Обчислити кутовий діаметр природного радіоджерела.

7. Визначити антенну температуру природного радіоджерела, якщо антенна температура калібрувального джерела дорівнює 5,5 К.

8. Вважаючи геометричну площу параболічної антени радіотелескопа рівною 1600 м^2 , визначити (в янських) спектральну густину потоку радіовипромінювання природного радіоджерела.

9. Обчислити спектральну інтенсивність радіовипромінювання природного джерела і його спектральну потужність радіовипромінювання у всіх напрямках.

10. Вважаючи спектральну потужність радіовипромінювання природного джерела постійною, визначити загальну потужність його радіовипромінювання в інтервалі частот $\Delta\nu = 10^9$ Гц.

11. Визначити яскравісну температуру природного радіоджерела, якщо кути стеження антени дорівнюють:

- 1) 1° і $8'$; 2) $1,5^\circ$ і $10'$; 3) 2° і $15'$; 4) 2° і $20'$; 5) 2° і $8'$; 6) $1,5^\circ$ і $20'$; 7) 1° і $15'$; 8) $1,5^\circ$ і $15'$.

12. Обчислити чутливість приймача радіотелескопа за смугою пропускання $\Delta\nu$, сталою часу τ_0 і шумовою температурою $T_{ш}$:

- 1) $\Delta\nu = 10^7$ Гц, $\tau_0 = 10$ с, $T_{ш} = 250$ К;
2) $\Delta\nu = 10^6$ Гц, $\tau_0 = 20$ с, $T_{ш} = 300$ К;
3) $\Delta\nu = 10^8$ Гц, $\tau_0 = 10$ с, $T_{ш} = 270$ К;
4) $\Delta\nu = 10^7$ Гц, $\tau_0 = 20$ с, $T_{ш} = 310$ К;
5) $\Delta\nu = 10^6$ Гц, $\tau_0 = 10$ с, $T_{ш} = 280$ К;
6) $\Delta\nu = 10^8$ Гц, $\tau_0 = 20$ с, $T_{ш} = 290$ К;
7) $\Delta\nu = 10^7$ Гц, $\tau_0 = 15$ с, $T_{ш} = 260$ К;
8) $\Delta\nu = 10^6$ Гц, $\tau_0 = 15$ с, $T_{ш} = 320$ К.

13. Знайти роздільну здатність Кримського фотографічного рефлектора, діаметр дзеркала якого дорівнює 2,6 м, і радіотелескопа діаметром D , що працює на довжині хвилі λ :

- 1) $D = 300$ м, $\lambda = 70$ см;
2) $D = 150$ м, $\lambda = 50$ см;
3) $D = 200$ м, $\lambda = 60$ см;
4) $D = 100$ м, $\lambda = 30$ см;
5) $D = 92$ м, $\lambda = 21$ см;
6) $D = 65$ м, $\lambda = 21$ см;
7) $D = 250$ м, $\lambda = 40$ см;
8) $D = 22$ м, $\lambda = 65$ см.

14. За результатами п. 13 сформулювати висновок про роздільну здатність великих радіотелескопів у порівнянні з роздільною здатністю потужних оптичних телескопів.

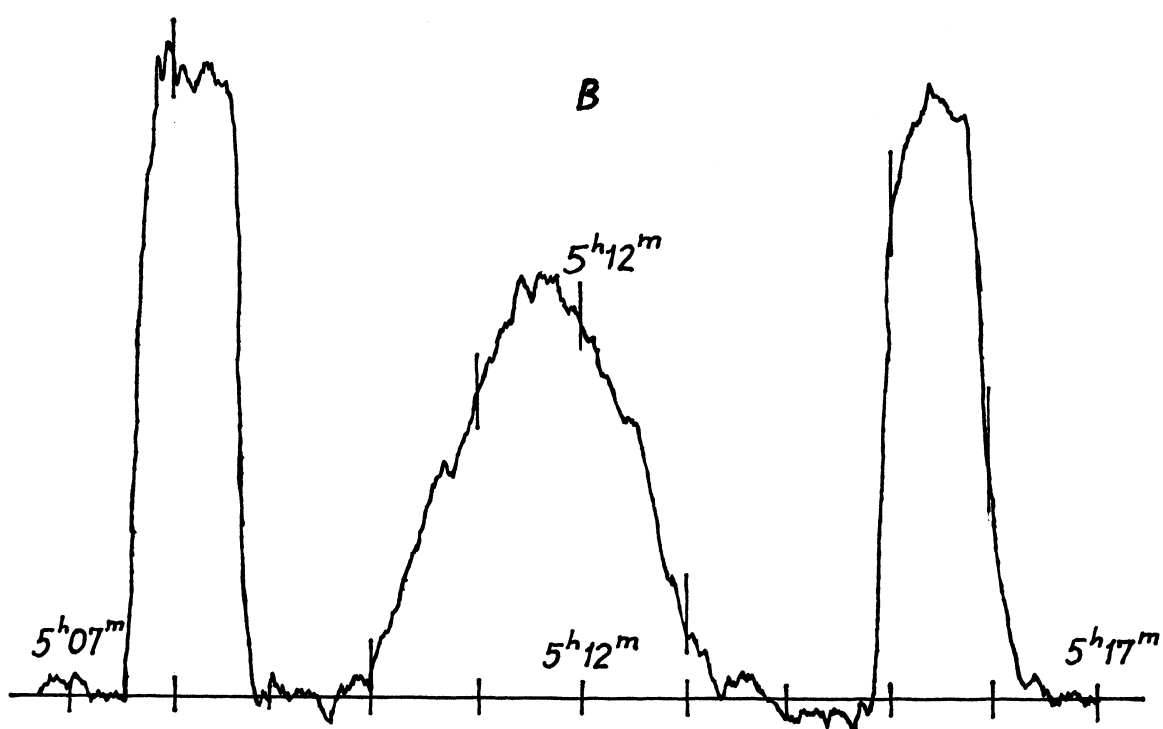
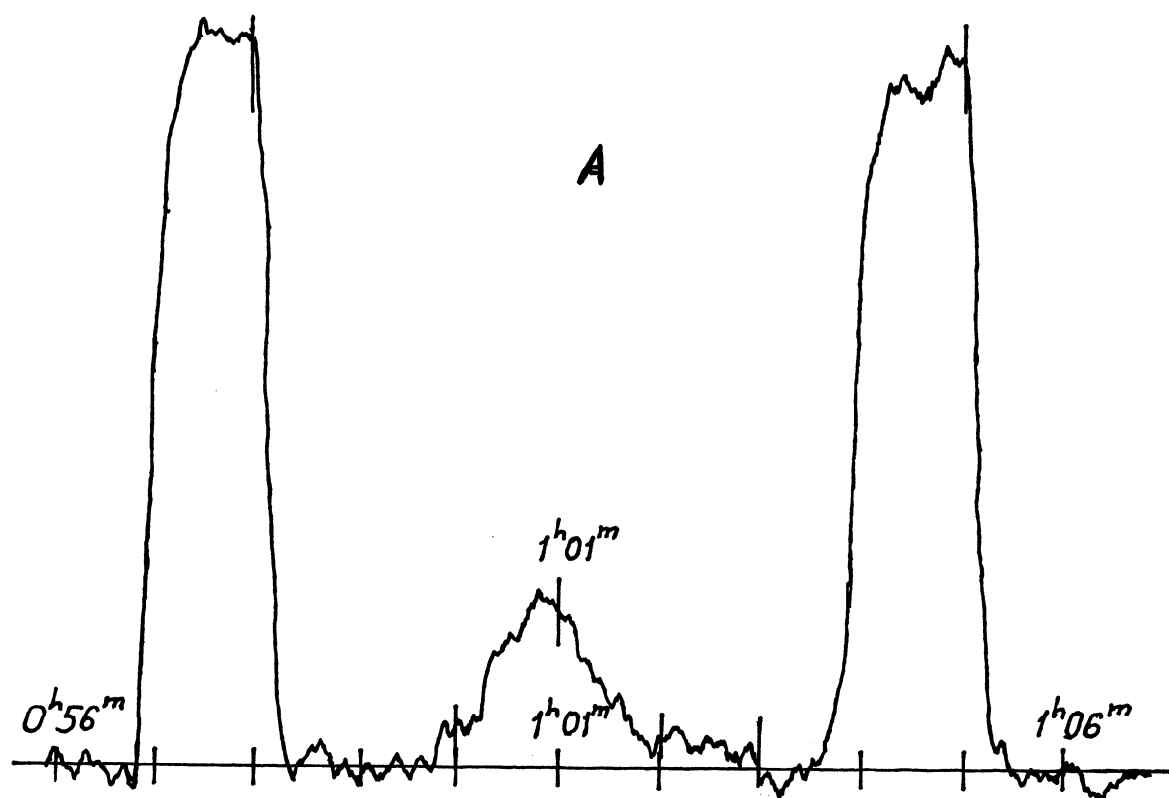
15. Надати звіт про виконану роботу зі всіма обчисленнями та результатами.

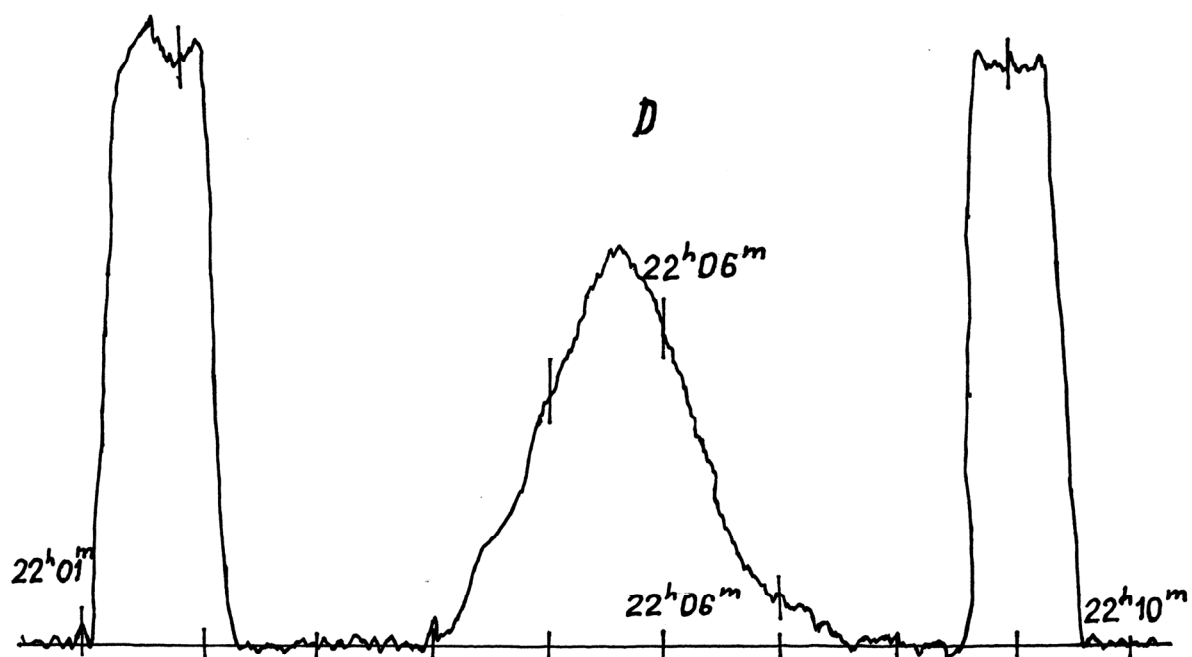
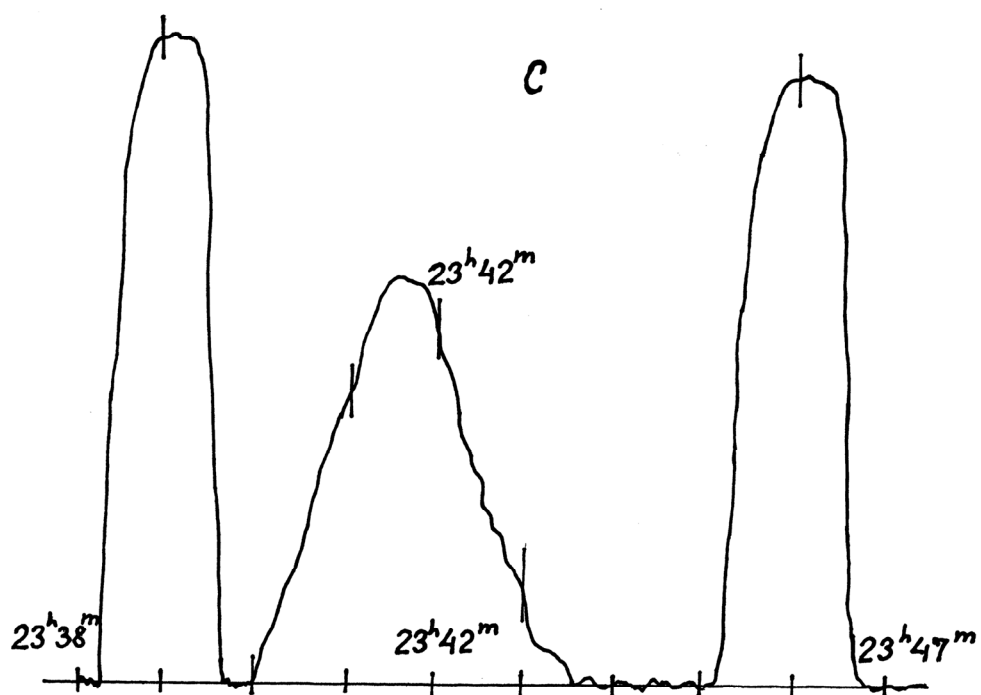
Контрольні запитання до лабораторної роботи

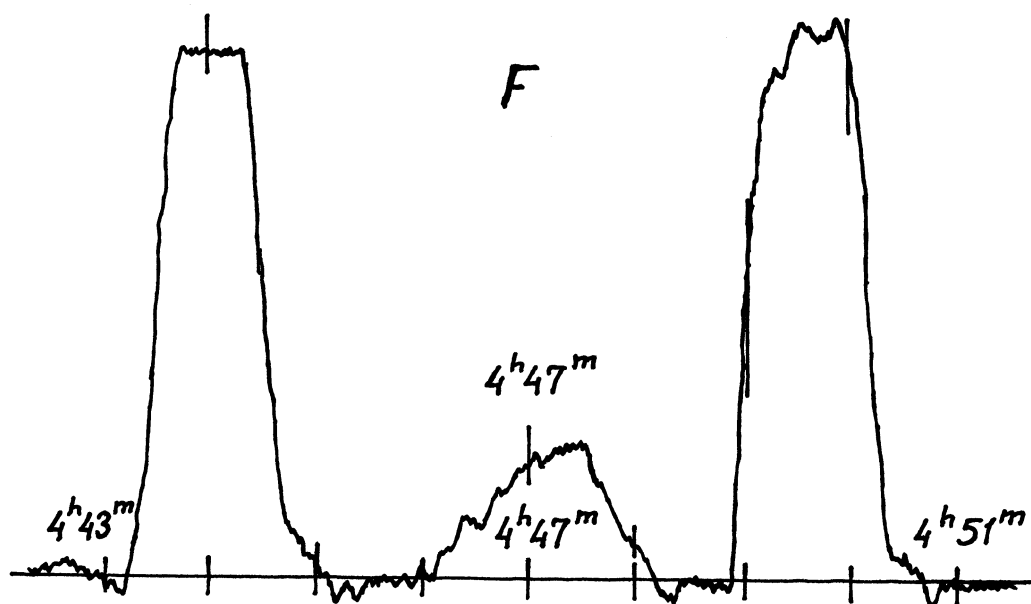
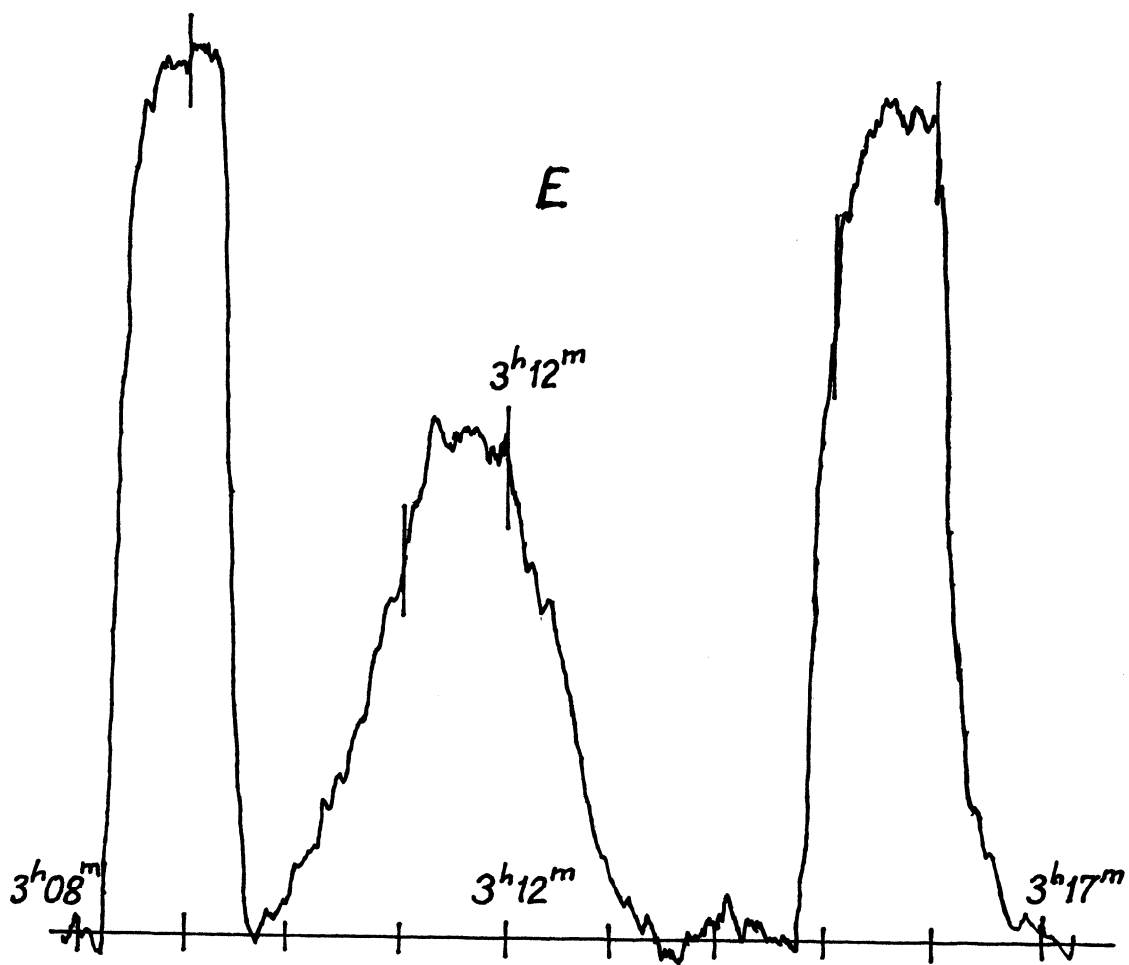
1. З яких основних пристроїв складається радіотелескоп?
2. Для чого слугує радіометр?
3. Намалюйте діаграму спрямованості.
4. Від чого залежить значення кута спрямованості?
5. Наведіть формулу для роздільної здатності радіотелескопа.
6. Як визначається кутовий діаметр радіоджерела на половині потужності?
7. Наведіть формулу для визначення спектральної густини потоку радіовипромінювання.
8. В яких одиницях вимірюється спектральна густина потоку?
9. Як пов'язана ефективна площа антени з її геометричною площею для параболічних антен?
10. Дайте означення антенної температури.
11. Як пов'язані спектральна інтенсивність та спектральна густина потоку радіовипромінювання?
12. Як визначається спектральна потужність радіовипромінювання джерела у всіх напрямках?
13. Дайте означення яскравісної температури.
14. Що таке чутливість радіометра та як її визначити?

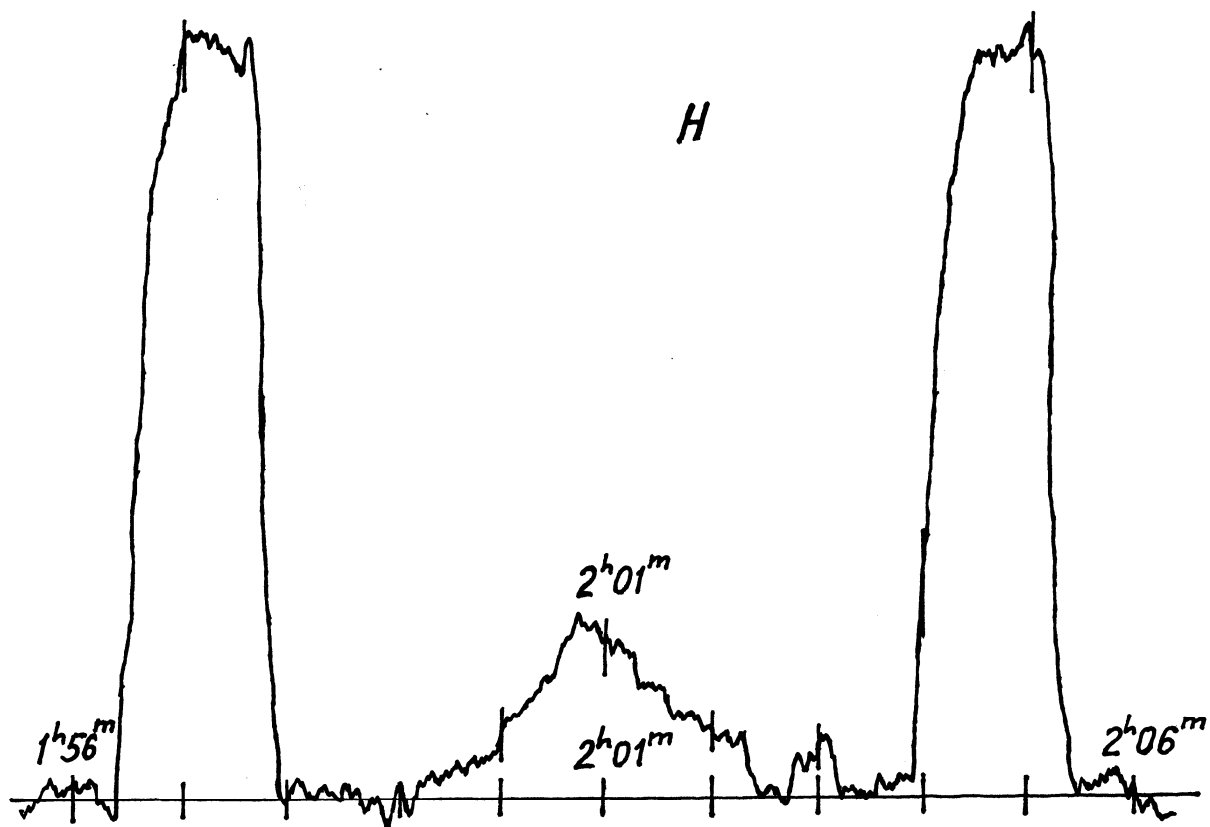
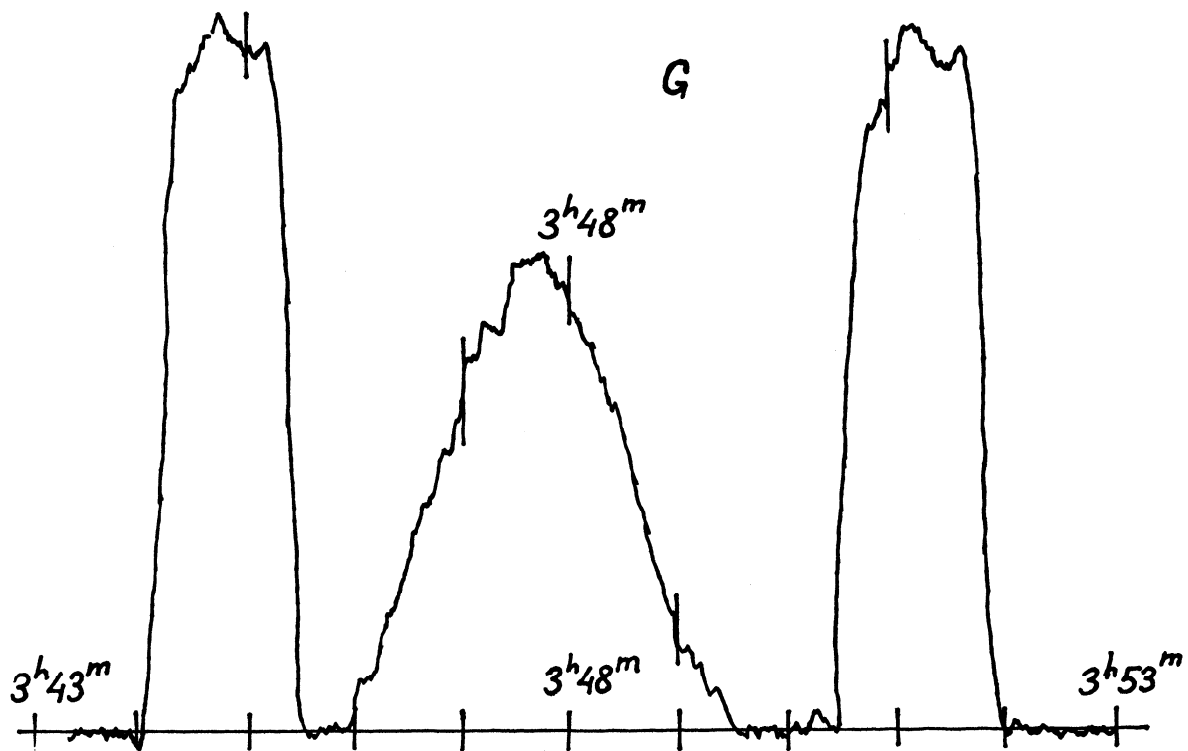
Список рекомендованої літератури

1. Астрономічний енциклопедичний словник / За загальною редакцією І. А. Климишина та А. О. Корсунь. – Львів, 2003. – 548 с.
2. Дагаев М. М. Лабораторный практикум по курсу общей астрономии. – М. : Высшая школа, 1972. – 280 с.
3. Конникова В. К., Лехт Е. Е., Силантьев Н. А. Практическая радиоастрономия. – М. : Изд-во Московского ун-та, 2011. – 304 с.
4. Краус Джон Д. Радиоастрономия. – М. : Сов. радио, 1973. – 456 с.









Навчальне видання

Мурніков Борис Олександрович

Кабанова Тамара Іванівна

ОБРОБКА РАДІОАСТРОНОМІЧНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

для студентів фізичного факультету
спеціальності «астрономія»

В авторській редакції

Підп. до друку 10.04.2018. Формат 60х84/16.

Ум. друк. арк. 1,16. Тираж 30 пр.

Зам. № 1738.

Видавець і виготовлювач

**Одеський національний університет
імені І. І. Мечникова**

Україна, 65082, м. Одеса, вул. Єлісаветинська, 12

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4215 від 22.11.2011 р.

Тел.: (048) 723 28 39. E-mail: druk@onu.edu.ua