

## Радіолокаційні спостереження Меркурія

### **Мета**

Навчитися визначати швидкість обертання планети на основі вимірювання розширення радіосигналів, відбитих від тіла.

### **Завдання**

Отримати спектри імпульсів на модельному радіотелескопі.

Проаналізувати спектри імпульсів для визначення зсуву частоти імпульса.

Виміряти доплерівський зсув частоти між посланим та прийнятим сигналами.

Визначати радіальну швидкість Меркурія та період його обертання.

### **Вступ**

Оскільки Меркурій – мала планета, поверхневі утворення якої малоконтрастні, а також тому, що вона дуже близько до Сонця і тому, як правило, спостерігається на фоні світлого неба, оптичними спостереженнями з Землі дуже важко визначити її період обертання. Однак, ще у 60-і роки у визначенні швидкості обертання довели свою ефективність радарні методи. Цей метод, звичайно, має більш широке використання, ніж просто для визначення швидкості обертання Меркурія: його можна використати до вивчення параметрів інших планет, наприклад, вкритої хмарами Венери, кілець планет-гігантів, астероїдів, тощо, а також для прямого вимірювання відстаней у Сонячній системі.

Основна ідея методу полягає у використанні радіотелескопа для передачі коротких імпульсів електромагнітного випромінювання відомої частоти у напрямку до Меркурія і подальшому вивченні спектра відбитого сигналу. В залежності від відносного положення Землі та Меркурія, імпульсу потрібно від 10 хвилин до півгодини щоб пролетіти до Меркурія, відбитися і повернутися назад.

Тілесний кут діаграми спрямованості радіотелескопа (градуси) набагато більший, ніж кутові розміри Меркурія (десятки секунд), тому імпульс охоплює всю планету. Оскільки поверхня планети сферична, імпульс падає на різні зони поверхні планети у різні моменти часу. Перший контакт імпульсу та поверхні відбувається у точці, що лежить прямо на лінії радар – центр планети. Це так - звана підрадарна точка. Через мікросекунди він поступово захоплює все нові та нові зони поверхні планети, аж поки не добереться до краю. Отже, можна очікувати, що перше відбиття має місце від підрадарної точки, а далі - послідовність відбитих сигналів від усе дальших точок поверхні, рис.26, (див.дискету,

файл Figs\Pic26.gif). Таким чином, аналізуючи відбитий сигнал, можна спробувати отримати інформацію від різних ділянок поверхні планети.

Частоти відбитих сигналів відрізняються від частоти посланого імпульсу, оскільки відбитий сигнал утворюється відбиттям від рухомої поверхні Меркурія. Як би не рухалось джерело сигналів вздовж лінії зору, завжди буде мати місце доплерівський зсув частоти сигналу. Цей зсув пропорційний радіальній швидкості руху.

Меркурій одночасно приймає участь у двох рухах: орбітальному, планета як ціле рухається навколо Сонця, та обертальному, планета обертається навколо власної осі. Перший відбитий сигнал, той що приходить від підрадарної точки, зсунутий по частоті тільки на величину взаємної орбітальної швидкості Меркурія та Землі в цілому. Ми можемо обчислити як швидко планета рухається по відношенню до Землі з величини зсуву частоти, але ми не можемо обчислити швидкість обертання, оскільки лінійна швидкість обертання перпендикулярна до радіальної швидкості у цій точці і не вносить додаткового зсуву частоти. Звичайно, існує також деякий зсув, що викликаний поперечним ефектом Доплера, але у цій роботі ми не будемо його аналізувати. Однак, сигнали, що приходять після підрадарної точки, мають додатковий зсув частоти, так як вони приходять від більш віддалених ділянок поверхні для яких лінійна швидкість обертання має компоненти вздовж лінії зору. В зв'язку з обертанням Меркурія, один край планети має додаткову швидкість до нас за рахунок обертання, а інший – від нас. Таким чином, завдяки ефекту Доплера частина відбитого сигналу буде мати трошки більшу частоту, а інша частина відбитого сигналу – трохи меншу.

Ви повинні виміряти величину цього зсуву частоти і на основі отриманих значень обчислити швидкість частин поверхні Меркурія а звідси – швидкість його обертання.

Теорію явища наведено дещо далі по тексту.

### **План роботи.**

Ввімкніть радіотелескоп. Обчисліть положення Меркурія та направте телескоп на нього.

Пошліть імпульс. Поки ви чекаєте відбитий імпульс, обчисліть геометричні параметри відбитого сигналу на 120, 210, 300, 390 мікросекунд після підрадарної точки.

Виміряйте найбільший та найменший зсув частоти від чотирьох відбитих сигналів.

Запишіть результати і використайте їх для знаходження швидкості обертання екватора Меркурія від кожного з чотирьох відбитих сигналів.

Обчисліть період обертання в добах виходячи з швидкості та відомого значення радіуса планети.

Для того, щоб розпочати роботу, вибираємо пункт меню **Start**. З'являється панель управління, на якій розміщено тільки три кнопки і три текстових поля для відображення частоти, на яку налаштовано телескоп і небесних координати, на які він направлений. Почніть з натиснення кнопки **Tracking**, щоб увімкнути годинниковий механізм, і щоб телескоп слідував за рухом небесної сфери. Після цього стають доступними інші елементи меню управління.

Якщо ви вже знаєте координати і відстань до планети, натисніть **Set Coordinates**, відповідайте **Ok** на питання комп'ютера, і введіть координати та відстань у текстові поля, що появляються. Після вводу координат натисніть **Ok** і телескоп почне рухатись та встановиться на вказані координати планети. У більшості випадків, ви не знаєте координат планети. У такому випадку спочатку треба вибрати **Ephemeris** у головному меню. Це активує програму, яка допоможе обчислити положення планети на довільний момент часу довільної дати. Якщо викладач вкаже вам конкретну дату і час, введіть його, у протилежному випадку – використайте момент виконання роботи. Натисніть **Ok** і комп'ютер обчислить для вас ефемериду, а результат появиться як таблиця у додатковому вікні. Це вікно не треба закривати і одночасно треба вибрати пункт меню **Set Coordinates**. Якщо тепер відповісти **Yes** на запитання комп'ютера **Use Computed Values**, то радіотелескоп буде встановлено на щойно обчислені координати. У будь-якому випадку вікно ефемериди буде мінімізоване.

Коли рух телескопа закінчиться, з'явиться повідомлення **Slewing Completed** а координати, на які встановлено телескоп будуть на панелі управління. Будьте уважні з кнопкою **Tracking**. Якщо забути увімкнути годинниковий механізм, то майже напевне, Меркурій буде втрачено.

Щоб послати імпульс треба скористатися кнопкою **Send Pulse**. З'являється повідомлення **Pulse Sent** і наближене значення моменту часу, коли він очікується назад. Повідомлення має жовтий колір, якщо імпульс вже повертається, і стає червоним, якщо до очікуваного моменту повернення менше 30 сек. Появляється також вікно з спектром початкового імпульсу яке автоматично мінімізується через 10 сек.

Тепер на екрані показано справжнє положення Меркурія, Венери, Землі і Сонця на момент експерименту, рис.25 (див.дискету, файл Figs\Pic25.gif). Занотуйте їх для подальшого використання. Яскравий імпульс радара рухається до Меркурія а потім слабший відбитий імпульс назад. На дисплеї все це показано у масштабі, хоча діаметри дисків усіх планет дещо перебільшені. Можна не чекати відбитого сигналу а послати новий: натискайте **Send Pulse**, відповідайте **No** на питання комп'ютера. Знайдіть  $d$ ,  $x$ ,  $y$  для кожного з інтервалів часу 120, 210, 300 і 390 мікросекунд і запишіть результати.

Відбитий та прийнятий імпульс займають по кілька мікросекунд часу. Це тому, що поверхня планети має кулясту форму і відбиття відбувається від реальної поверхні планети. При прибутті імпульсу відкривається п'ять вікон. Ці вікна дають миттєвий спектр відбитого сигналу на момент початку прийому, через 120 мкс, і ще три, кожен через 90 мкс після попереднього. Порівняйте вигляд спектра посланого та прийнятого імпульсів. Ви можете помітити, що посланий імпульс має значно плавніший та різкіший спектр, рис.26 (див.дискету, файл Figs\Pic26.gif).

Пункт меню **Pulse** головного меню надає нам можливість керувати виглядом вікон з даними і записувати результати вимірювання профілів сигналів. Вікна даних неможливо закрити, але інформацію в них завжди можна оновити, якщо в цьому є необхідність.

Щоб провести вимірювання, натисніть і утримуйте ліву кнопку миші та розмістіть курсор у довільну точку графіка. При цьому курсор стає хрестиком і внизу екрана з'являється абсциса курсора в пікселях і зсув частоти у Гц від нульового (центрального) положення. Для відбитого від підрадарної точки сигналу ( $DT = 0$ ) ви просто міряєте центральну частоту. А от для всіх більш пізніх сигналів ви мусите поміряти положення правого та лівого максимумів на графіку, тобто знайти частоти, які відповідають сигналам від тих частин планети, які рухаються до нас чи від нас найшвидше. На деяких спектрах ці точки видимі добре, а на деяких ні.

Коли ви встановите курсор на лівому плечі графіка, двічі клацніть на ліву кнопку миші. На екрані з'являється червона стрілка і її виміряне положення в Гц. Для правого плеча, процедура така ж, але треба двічі клацнути правою кнопкою миші. Стрілка вже буде не червоною, а синьою. (Якщо у вікні тільки один максимум, що відповідає підрадарному відбитому сигналу, то його можна виміряти подвійним клацанням довільної кнопки). Щоб змінити відлік, змініть положення миші та двічі клацніть відповідною кнопкою. Стрілка переміститься. Якщо частина графіка щезне (це побічний ефект, що має програмне походження), треба мінімізувати, а потім зразу відновити вікно. Результати цих вимірювань потрібно занести у журнал (це правило хорошого тону, коли всі записи дублюються на папері та в комп'ютері).

Після того, як ви закінчили вимірювання у всіх вікнах, виберіть **Record Measurements** з меню **Pulse** головного меню. З'являється вікно даних зі всіма записаними вимірами, які ви вже зробили. Якщо щось ще не виміряно, відповідні поля порожні, а вікно з невиміряним спектром – поверх усіх. Якщо всі виміри зроблено, відповідне повідомлення підтверджує це.

Як тільки ви записали вимірювання, активується елемент **Work Sheet** головного меню. Виберіть **Work Sheet** а за ним **Display** і з'явиться вікно робочого листа. Цей лист

такий самий, як таблиця, наведена у додатку 8 для зразка. Ви повинні заповнити цю таблицю перед тим, як будете заносити її в комп'ютер. *Комп'ютер тільки записує сирі дані*. Він не виконує ніяких обчислень за вас і тільки від вас залежить, чи будуть обчислення зроблені правильно.

Заповніть усі пункти таблиці. У довільний момент ви можете натиснути кнопку **Check**, і комп'ютер перевірить заповнення таблиці. Якщо дані в таблиці будуть зовсім неправильні, ви отримаєте попереджувальне повідомлення. Ви можете повернутися до вимірювань просто закривши вікно **Work Sheet...Close** і вибравши **Pulse**. Не забудьте записати всі вимірювання перед поверненням до робочого листа.

Якщо з якоїсь причини ви бажаєте повністю переобчислити стовпчик, ви можете витерти його. Для цього вибираємо **Work Sheet...Erase...Column** (або **All**) з головного меню. Ця дія також приведе до очищення усіх спостережень.

Щоб заново ввести спостереження, вибирайте **Work Sheet...Close**, тоді **Pulse...Record Measurements**, знову **Work Sheet... Display**. Пам'ятайте, що **Work Sheet...Close** не знищує елементи таблиці, а **Work Sheet...Erase** так. Коли введення всіх даних буде закінчено, перевірено на правильність, вибирайте **Work Sheet...Print**, тоді ваш результат буде надруковано.

### Обчислення швидкості обертання Меркурія

Тут наведено набір формул, необхідних для виконання роботи, тобто для переходу від сирих спостережень до значення періоду обертання Меркурія. Не забувайте про те, що всі виміри повинні бути проведені у правильних одиницях. Перші три пункти дозволяють переходити від неекваторіальних величин до екватора. Ці значення,  $d$ ,  $x$ , і  $y$  можна знайти ще до отримання спостережень. Інші обчислення будуть виконуватися після отримання спостережень затримок. Ілюстрація для виведення формул наведена на рис.24. (Див.дискету, файл Figs\Pic24.gif).

Зведемо формули до невеликого конспективного викладу. Швидкість обертання Меркурія на екваторі  $V$  обчислюється з елементарних геометричних міркувань. Тут  $R$  – радіус планети,  $d$  – шлях затримки,  $V_0$  – вимірний компонент швидкості обертання вздовж лінії зору.

Отже

$$d = (c \cdot \Delta t) / 2, \quad (1)$$

$$x = R_{mer} - d, \quad (2)$$

$$y = \sqrt{R_{Merc}^2 - x^2}, \quad (3)$$

$$\Delta f_{tot} = (\Delta f_{left} - \Delta f_{right}) / 2, \quad (4)$$

$$\Delta f_c = \Delta f_{tot} / 2, \quad (5)$$

$$V_0 = c \cdot \Delta f_{tot} / f, \quad (6)$$

$$V = V_0 \cdot R_{Merc} / y, \quad (7)$$

тоді період обертання

$$P = 2\pi R_{Merc} / V.$$

Як тільки ви знайшли періоди обертання  $P_{rot}$  для всіх отриманих відбитих сигналів, переконайтесь, що отримані вами результати відповідають дійсності. Далі знайдіть середнє значення періоду обертання і зафіксуйте її. **Наскільки сильно відрізняється ваше значення від загальноприйнятої величини 59 діб?**

### Орбітальна швидкість Меркурія

Ви повинні взяти отримане вами значення зсуву частоти для відбитого підрадарною точкою сигналу та обчислити величину орбітальної швидкості Меркурія. Однак, треба звернути увагу на те, що зсув частоти треба поділити на два (є падаючий та відбитий сигнали!). За допомогою ефекту Доплера визначте орбітальну швидкість Меркурія. Негативні швидкості відповідають руху на зближення, позитивні – віддалення. Виразіть свої результати у км/сек.

**Нанесіть на малюнок положення Сонця, Землі та Меркурія у момент спостереження.**

### Додаткове завдання

Відносні розміри орбіт планет були відомі задовго до того, як стали відомі їх справжні розміри. Затримка у часі повернення відбитого сигналу дає простий і точний спосіб знаходження астрономічної одиниці. Ефемеридна підсистема роботи дає можливість обчислити відстань від Меркурія до Землі у астрономічних одиницях.

**Знайдіть значення астрономічної одиниці у км. Коротко опишіть свою роботу.**