

ЗАСТОСУВАННЯ ЕПІПОЛЯРНОЇ ГЕОМЕТРІЇ ДЛЯ СТЕРЕОСКОПІЧНОГО АНАЛІЗУ КОРОНАЛЬНОЇ ХВИЛІ

Ю.Р. ПАВЛЮК, О.В. ПОДЛАДЧІКОВА, В.М. ПОДЛАДЧІКОВ

Досліджено EUV хвилі за допомогою епіполярної геометрії. EUV хвиля ще досі вивчається і щодо неї існує чимало гіпотез. Відновлення просторової структури EUV хвилі дало б змогу пояснити її походження, фізичну природу та оцінити кінематичні характеристики. Запропоновано підхід, що ґрунтується на епіполярній геометрії для ідентифікації та узгодження об'єктів за стереозображеннями з космічних апаратів і визначення висоти хвилі. Показано, що є сегменти фронту хвилі, для яких задача встановлення відповідності стає некоректною і вироджується.

ВСТУП

Корональні викиди маси (КВМ) являють собою гігантські об'єми сонячної речовини, що викидаються в міжпланетний простір з атмосфери Сонця в результаті активних процесів, що відбуваються у ньому. Корональні викиди маси — найбільш великомасштабні явища сонячної активності, які відіграють важливу роль у багатьох сонячних, міжпланетних і геофізичних подіях. Досягаючи Землі, КВМ впливають на її магнітосферу, викликаючи різні ефекти космічної погоди: полярне сяйво, магнітні бурі, порушення в роботі електрообладнання, погіршення умов поширення радіохвиль.

Корональні викиди маси складаються в основному з електронів та протонів і супроводжуються великомасштабним збуренням магнітного поля Сонця, яке найбільш яскраво проявляється у вигляді так званих димінгів і корональних хвиль.

Димінги являють собою області зниженої інтенсивності м'якого рентгенівського і крайнього УФ-випромінювання з часом життя від декількох до десятків годин, які формуються услід за КВМ біля еруптивного центра. Корональні хвилі спостерігаються у вигляді фронтів підвищеної яскравості, що поширюються під час КВМ перед димінгами.

Супутникові спостереження процесів, що відбуваються на сонячному диску, мають велике значення для вивчення КВМ, пошуку відповідей на такі актуальні питання фізики Сонця, як механізм КВМ, природа димінгів і корональних (EUV) хвиль.

26 жовтня 2006 р. NASA були запущені два космічні апарати STEREO (Solar Terrestrial Relations Observatory) з метою отримання стереоскопічних спостережень Сонця з навколоземної орбіти.

Обертаючись по геліоцентричній орбіті, супутник STEREO Behind відстає від Землі, а STEREO Ahead, навпаки, обганяє її. Оскільки вони мають різні орбіти, то кутова відстань між STEREO A і STEREO B збільшується зі швидкістю приблизно 45° за рік. На обох космічних апаратах встановлено фотодатчики EUV Imager, які спостерігають за сонячним диском.

Часовий ряд спостережень SECCHI забезпечив уявлення про EUV хвилю з різних кутів зору. Таким чином, існує геометричне співвідношення між точками простору та їх проекцією на площину зображення. Завдяки отриманим даним стало доступним стереобачення.

Основні принципи стереоскопії для STEREO були описані Інхестером [1]. У цьому дослідженні зосереджено увагу на проблемі ідентифікації та відповідності об'єктів для відновлення елементів стереозображень як одній з найбільш складних проблем і показано, що вирішення проблеми відповідності часто дуже залежить від об'єкта спостереження.

Фізична природа EUV хвиль, великомасштабних яскравих фронтів, що супроводжують KBM і поширюються в сонячній короні, залишається предметом постійних досліджень.

Кінематика і структура EUV хвилі мають важливе значення для розуміння її фізичної природи. Оцінка швидкості хвилі, як правило, визначається вимірюванням положення пікової інтенсивності для кожного фронту хвилі, що поширюється в обраних напрямках. Як зазначається у праці [2], навіть мала висота EUV хвилі може істотно впливати на результати. Зміни зовнішніх меж і ширини EUV хвилі були вивчені в праці [4] у 2015 р.

Надійно оцінити значення висоти EUV хвилі надто складно, оскільки EUV хвиля розглядається як коливання корони, що, як правило, виникає як дифузне світіння, яке поширюється на Сонці. Фронт хвилі не має гладкої поверхні з чіткими краями меж яскравості, кольору і текстури, а характеризується поширенням інтенсивності пікселів. Проведено лише невелику кількість досліджень просторової структури EUV хвилі через складність зіставлення дифузійних об'єктів за допомогою пари стереозображень.

Автори праці [5] оцінили висоту EUV хвилі з безпрецедентних спостережень квадратури STEREO 13 лютого 2009 р., коли хвиля спостерігалася одночасно в центрі диска на зображеннях із STEREO B і на лімбі Сонця на зображеннях із STEREO A. За таких оптимальних умов для спостережень отримано значення висоти хвилі в діапазоні 80–100 Мм.

Оцінку висоти за більш складних умов (7 грудня 2007 р.), коли кут між космічними апаратами становив 45° і з апаратів STEREO A та STEREO B можна було спостерігати різні грані хвилі, отримано Петсоракосом та Вурлидасом [6]. Оскільки триангуляцію виконано без обґрунтованого розв'язання проблеми відповідності вершини EUV хвилі на зображеннях з обох космічних апаратів, то це могло призвести до отримання неточного значення оцінки висоти.

У роботі проблема відповідності розв'язується на основі методів епіпольярної геометрії стереобачення. Досліджуються умови, коли проблема відповідності стає погано обумовленою і вироджується. У такому випадку навіть незначні помилки можуть призвести до спотворення рішення. В умовах надійного розв'язання проблеми відповідності визначається висота EUV хвилі, що супроводжувала корональний викид маси на Сонці 7 грудня 2007 р.

АНАЛІЗ EUV СПОСТЕРЕЖЕННЯ ПОДІЙ З КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ STEREO 7 ГРУДНЯ 2007 Р.

EUVI / STEREO 195 А зображення повного Сонця були отримані 7 грудня 2007 р. з двох космічних апаратів STEREO з інтервалами 10 хв, коли EUV хвиля і KBM спостерігались в активній області 10977.

Динамічні сонячні явища, що супроводжують KBM, такі як EUV хвилі та димінги, вивчаються на основі формування різницевого зображення двох типів. Послідовні різницеві зображення отримуються, коли з кожної поточної геліограми віднімається попередня. Під час формування фіксованих різницевого зображення одне й те саме зображення перед подією віднімається з усіх наступних зображень. На таких різницевих зображеннях димінги проявляються як темні утворення зниженої інтенсивності, а корональні хвилі — у вигляді яскравого фронту, що поширюється вздовж сонячного диска [7].

Для просторового аналізу структури корональних подій сформовано фіксовані EUVI різницеві зображення для обох апаратів STEREO з урахуванням особливостей обертання Сонця. Послідовні різницеві зображення, отримані відніманням попереднього зображення від поточного, хоча і показують більший контраст фронту хвилі, але тут не використовуються, адже їх важче інтерпретувати. Деякі випадки збільшення випромінювання і потемніння, що спостерігаються на послідовних різницевих зображеннях, мають методологічне походження [7].

Фіксовані різницеві зображення, що формуються відніманням еталонного зображення, отриманого до настання події, з кожного наступного зображення показують більш точну геометричну структуру димінгів, внутрішні межі хвильового фронту та фізичні властивості області між затемненням і фронтом хвилі.

Розглянемо EUV спостереження подій з космічних апаратів STEREO 7 грудня 2007 р. з 4:25 UT до 5:05 UT на сонячному диску. Рис. 1 ілюструє ділянки виверження на фіксованих різницевих зображеннях о 4:25 UT – 5:05 UT відносно зображення о 4:15 UT, що йому передує в полі зору STEREO А (рис. 1, а) і STEREO В (рис. 1, б).

Зображення EUV хвилі о 4:25 UT (рис. 1, а, б) та о 4:35 UT (рис. 1, в, г) істотно відрізняються, оскільки кожен із супутників STEREO А і В бачить різні грані хвилі та різні ділянки затемнення (димінгів). Із супутника А видно зовнішню частину західного фронту хвилі, внутрішню частину східного фронту хвилі, а також східну частину димінга. Інша частина димінга, що міститься між еруптивним центром і східним фронтом хвилі, залишається невидимою через високий східний гребінь хвилі.

Із супутника В видно зовнішню частину східного фронту хвилі, внутрішню частину західного фронту хвилі і західну частину диммінга. Високий гребінь західної частини фронту хвилі маскує західну частину диммінга. Найімовірніше права (ліва) межа зовнішньої частини східного (західного) фронту хвилі, якщо дивитися із STEREO В (STEREO А), є проекцією високого гребеня східного (західного) фронту хвилі, що більш чітко видно із STEREO А (STEREO В).

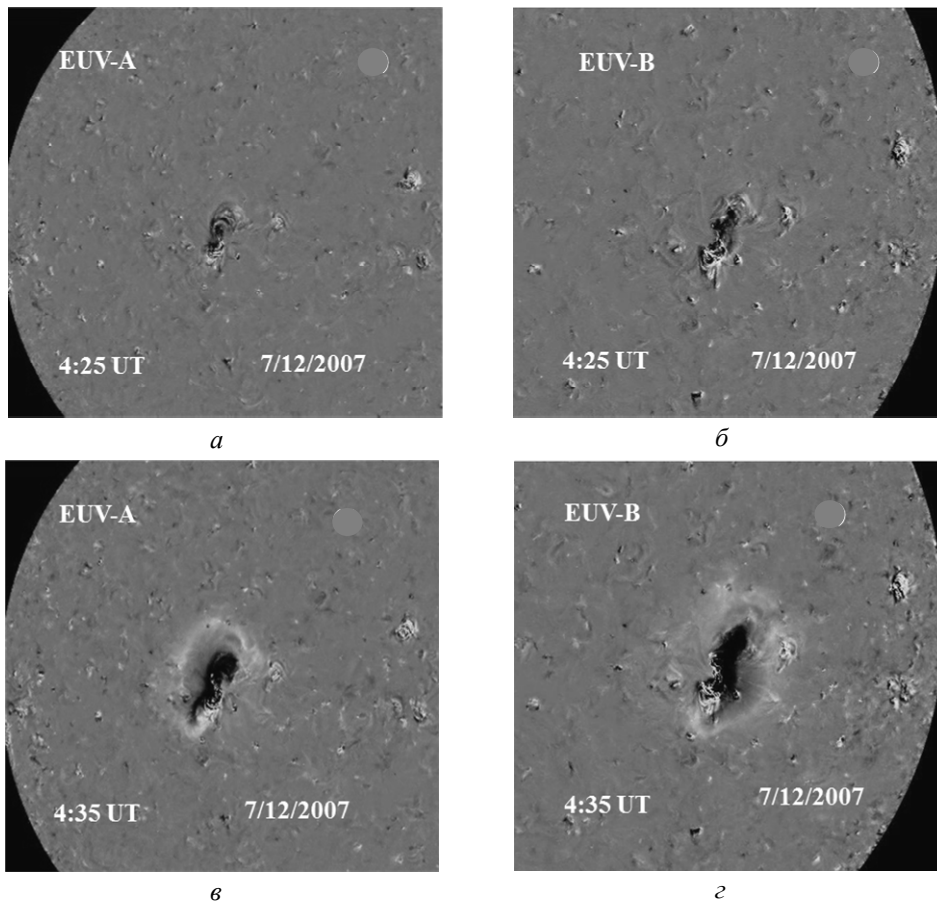


Рис. 1. Зображення з космічних апаратів STEREO А і STEREO В

ВИЗНАЧЕННЯ ВИСОТИ КОРОНАЛЬНОЇ ХВИЛІ

Використання епіполярної геометрії для визначення структури хвилі

Спостереження сонячного диска з різних кутів дає змогу оцінити висоту фронту від поверхні на ранній стадії явища, коли висота хвилі досягає максимальних значень, і зображення з обох космічних апаратів STEREO істотно відрізняються: різні грані хвилі, різні ділянки диммінгів (рис. 1, а, г).

Схематичне зображення космічних апаратів А і В відносно Сонця та EUV хвилі показано на рис. 2. Східна частина затемнення (диммінга) і внутрішня частина фронту східної хвилі спостерігаються з точки А. Однак ця ділянка невидима з точки В. Проте найвища точка гребеня (як, наприклад, точка Е) є доступною для спостереження з обох космічних апаратів.

Пряма, що сполучає точки B і E , перетинається зі сферою в точці D , а продовження прямої AE перетинається зі сферою в точці C . Точка C є проекцією точки E на сферу вздовж лінії AE , а точка D — проекцією точки E на сферу вздовж прямої BE . Для космічного апарата B пряма BE стає точкою, оскільки вона збігається з лінією видимості для STEREO B. Однак зі STEREO A видно частину цієї прямої як епіполярну лінію на своїй площині зображення.

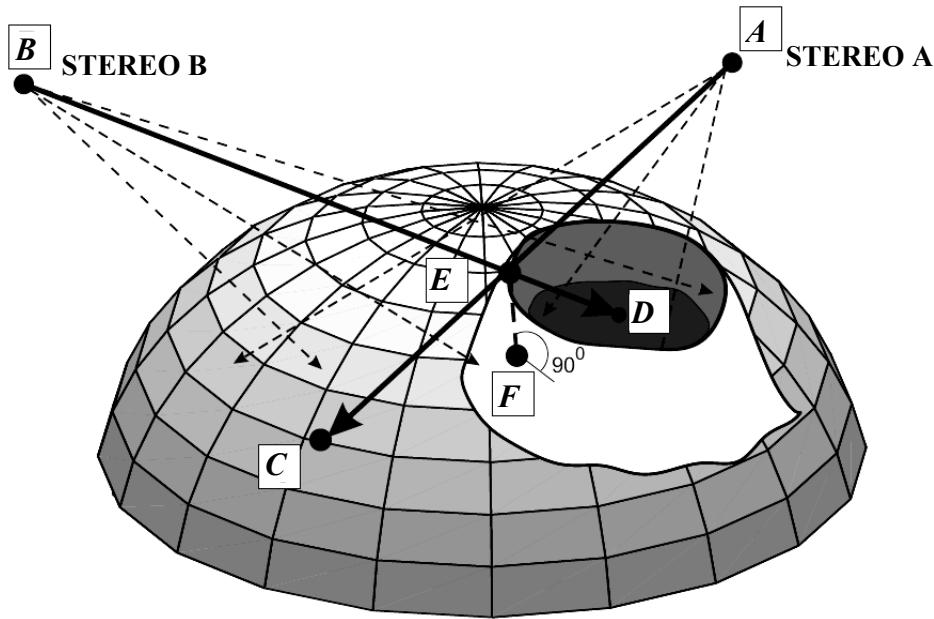


Рис. 2. Схематичне зображення космічних апаратів A і B відносно Сонця та EUV хвилі

Аналогічно пряма AE перетворюється в точку, якщо дивитись із STEREO A, і являє собою епіполярну лінію для STEREO B. Тому точки E , A і B утворюють епіполярну площину. Висота хвилі визначається довжиною фрагмента прямої EF , де F — ортогональна проекція точки E на поверхню (точка перетину зі сферою відрізка, що з'єднує точку E із центром сфери). Відстань між точками C і D і відстань між еруптивним центром та гребенем хвилі збільшуються зі зростанням відстані від точки E до поверхні. Якщо точка E міститься на поверхні, то точки C і D збігаються. Якщо точка E розміщується вище від поверхні, то точка C переміщується вліво відносно точки D .

Якщо точки D і C обрані правильно, то прямі BD і AC у просторі перетинаються точно в точці E . Помилка у виборі прямих BD і AD може призвести до похибки у визначенні координат точок D і C . У такому випадку прямі BD і AC не будуть перетинатися в просторі.

О 4:25 UT та 4:35 UT високий східний гребінь хвилі (рис. 1, *a*, із STEREO A) та західний гребінь (рис. 1, *б*, із STEREO B) істотно відрізняються від внутрішньої частини фронту хвилі за кольором, яскравістю і текстурою. Межа гребеня хвилі характеризується різким стрибком яскравості та неоднорідністю текстури. Яскраві краї вздовж цієї межі

належать до гребеня хвилі. У такому випадку можна реалізувати реконструкцію лише тоді, якщо ці краї можуть бути ідентифіковані за зображеннями. Проблема відповідності полягає у правильному визначенні цих точок за двома стереозображеннями.

Епіполярна лінія — це лінія перетину епіполярної площини, що визначається двома центрами спостереження і точкою об'єкта спостереження, та площини зображення. Тобто проекція епіполярної площини на зображення, отримані з центрів спостереження, утворює епіполярну лінію.

Щоб відновити просторову структуру EUV хвилі, спочатку вибираємо за допомогою курсору точку на гребені хвилі на одному зображенні із STEREO B, як показано хрестиком на рис. 3, б, і в такий спосіб визначаємо координати точки D . Проводимо епіполярну лінію на зображенні від STEREO A як відрізок прямої BD (лінія на рис. 3, а). Далі знаходимо точку перетину епіполярної лінії і гребеня хвилі (хрестик на рис. 3, а), тобто координати точки перетину прямої AE зі сферою. Аналогічно визначаємо точку D для супутника STEREO B.

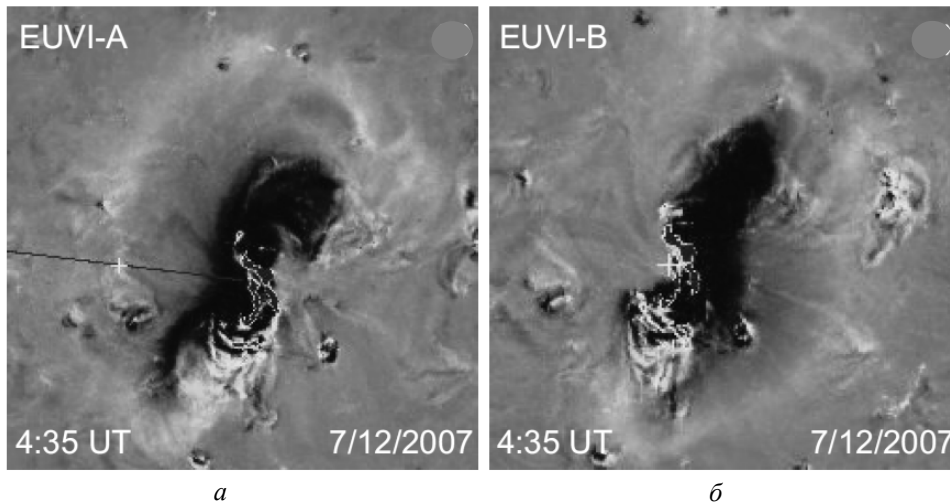


Рис. 3. Знаходження точки перетину епіполярної лінії і гребеня хвилі

ВИЗНАЧЕННЯ ТРИВИМІРНИХ КООРДИНАТ ТОЧОК ЗА ЗОБРАЖЕННЯМИ

Супутники STEREO спостерігають за сонячним диском з різних точок однієї орбіти, формують зображення відносно своєї системи координат. Отримані координати точок належать до геліоцентричних систем координат відповідних супутників (рис. 4), у яких початок координат відповідає центру Сонця, вісь X напрямлена на центр маси супутника, піввісь $+Z$ напрямлена від Землі, на площині $X-Z$ містяться супутник, Сонце і Земля.

Оскільки осі супутників STEREO A і STEREO B різнонапрямлені, то для подальшого оброблення даних необхідно перетворити координати точок з геліоцентричних систем координат супутників у спільну систему координат; як таку використаємо геліоцентричну земну екваторіальну систему (Helio-centric Earth equatorial — HEEQ).

Система координат НЕЕQ або Стоніхерстська геліографічна система координат (рис. 5) утворюється перетином сонячного екватора і центрального меридіана з боку Землі. Отже, система координат зафіксована відносно Землі у той час, як Сонце обертається. Кути задаються у градусах, які збільшуються до північного полюса і західного лімба. Відтань r — це фізична відстань у метрах або відстань відносно сонячного фотосферичного діаметра $R = 6,96 \cdot 10^8$ м.

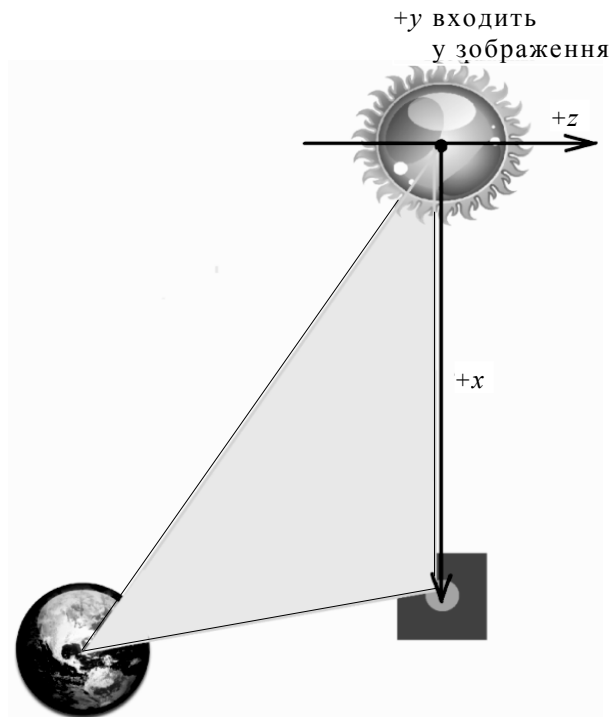


Рис. 4. Геліоцентрична система координат супутника STEREO

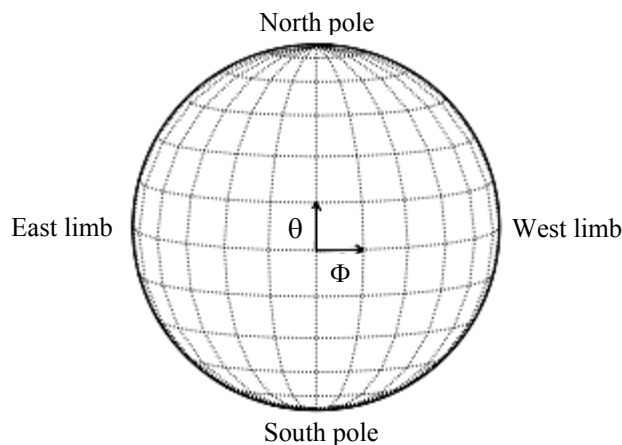


Рис. 5. Геліоцентрична земна екваторіальна система координат

Запишемо взаємозв'язок між координатами (r, θ, Φ) і $(X_{\text{HEEQ}}, Y_{\text{HEEQ}}, Z_{\text{HEEQ}})$:

$$r = \sqrt{X_{\text{HEEQ}}^2 + Y_{\text{HEEQ}}^2 + Z_{\text{HEEQ}}^2},$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{Z_{\text{HEEQ}}}{\sqrt{X_{\text{HEEQ}}^2 + Y_{\text{HEEQ}}^2}} \right)$$

$$\Phi = \arg (X_{\text{HEEQ}}, Y_{\text{HEEQ}}),$$

$$X_{\text{HEEQ}} = r \cos \theta \cos \Phi,$$

$$Y_{\text{HEEQ}} = r \cos \theta \sin \Phi,$$

$$Z_{\text{HEEQ}} = r \sin \theta \sin \Phi.$$

У системі HEEQ вісь Z паралельна сонячній осі обертання і напрямлена в бік північного полюса Сонця, а вісь X утворюється перетином сонячного екватора та сонячного центрального меридіана з боку Землі.

Спочатку знайдемо координати точки A в геліоцентричній системі координат супутника STEREO A з віссю Ox , що проходить уздовж променя OA .

Декартові координати точки A в системі супутника A матимуть такий вигляд:

$$\begin{pmatrix} X_{A\text{STA}} \\ Y_{A\text{STA}} \\ Z_{A\text{STA}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,967A \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

де AU — астрономічна одиниця, що дорівнює 149 597 870 700 м; 0,967 AU — геліографічна відстань від супутника A станом на 7 грудня 2009 р.

Декартові координати точки B у системі супутника B такі:

$$\begin{pmatrix} X_{B\text{STA}} \\ Y_{B\text{STA}} \\ Z_{B\text{STA}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1,03A \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

де 1,03 AU — геліографічна відстань від супутника B станом на 7 грудня 2009 р.

Переведемо координати точок A і B у систему HEEQ. Виконаємо процедуру перетворення для точки A .

На першому кроці повернемо систему координат навколо осі Oy_a на кут dT_a , що відповідає широті точки A , до суміщення осі $x'_{A\text{STA}}$ з екваторіальною площиною:

$$x'_{A\text{STA}} = x_{A\text{STA}} \cos dT_a,$$

$$z'_{A\text{STA}} = z_{A\text{STA}} \sin dT_a.$$

На другому кроці здійснимо поворот навколо осі Oz_E на кут dF_a , що відповідає довготі точки A :

$$x_{A_{\text{HEEQ}}} = x_{A_{\text{STA}}} \cos dT_a \sin dF_a ,$$

$$y_{A_{\text{HEEQ}}} = x_{A_{\text{STA}}} \cos dT_a \cos dF_a ,$$

$$z_{A_{\text{HEEQ}}} = x_{A_{\text{STA}}} \sin dT_a .$$

Для точки B отримуємо такий результат:

$$x_{B_{\text{HEEQ}}} = x_{B_{\text{STB}}} \cos dT_b \sin dF_b ,$$

$$y_{B_{\text{HEEQ}}} = x_{B_{\text{STB}}} \cos dT_b \cos dF_b ,$$

$$z_{B_{\text{HEEQ}}} = x_{B_{\text{STB}}} \sin dT_b .$$

Нехай $(x_{C_{\text{STA}}}, y_{C_{\text{STA}}}, z_{C_{\text{STA}}})$ — декартові координати точки C у системі супутника A ; $F_c > 0$, $\theta_c < 0$ — довгота і широта точки C . Знайдемо координати точки в системі HEEQ.

Спочатку здійснимо поворот навколо осі Oy_a на кут θ_c :

$$x'_{C_{\text{STA}}} = x_{C_{\text{STA}}} \cos \theta_c - z_{C_{\text{STA}}} \sin \theta_c ,$$

$$z_{C_{\text{HEEQ}}} = x_{C_{\text{STA}}} \sin \theta_c + z_{C_{\text{STA}}} \cos \theta_c ,$$

$$y'_{C_{\text{STA}}} = y_{C_{\text{STA}}} ,$$

потім навколо осі Oz_E на кут F_c , отримаємо

$$x_{C_{\text{HEEQ}}} = x'_{C_{\text{STA}}} \cos F_c - y'_{C_{\text{STA}}} \sin F_c =$$

$$= (x_{C_{\text{STA}}} \cos \theta_c - z_{C_{\text{STA}}} \sin \theta_c) \cos F_c - y_{C_{\text{STA}}} \sin F_c ,$$

$$y_{C_{\text{HEEQ}}} = x'_{C_{\text{STA}}} \sin F_c + y'_{C_{\text{STA}}} \cos F_c =$$

$$= (x_{C_{\text{STA}}} \cos \theta_c - z_{C_{\text{STA}}} \sin \theta_c) \sin F_c + y_{C_{\text{STA}}} \cos F_c .$$

У результаті маємо шукані координати точки C у системі HEEQ:

$$x_{C_{\text{HEEQ}}} = x_{C_{\text{STA}}} \cos \theta_c \cos F_c - y_{C_{\text{STA}}} \sin F_c - z_{C_{\text{STA}}} \sin \theta_c \cos F_c ,$$

$$y_{C_{\text{HEEQ}}} = x_{C_{\text{STA}}} \cos \theta_c \sin F_c + y_{C_{\text{STA}}} \cos F_c - z_{C_{\text{STA}}} \sin \theta_c \sin F_c ,$$

$$z_{C_{\text{HEEQ}}} = x_{C_{\text{STA}}} \sin \theta_c + z_{C_{\text{STA}}} \cos \theta_c .$$

Аналогічно знаходимо координати точки D у системі HEEQ за умови $F_d < 0$, $\theta_d > 0$:

$$x_{D_{\text{HEEQ}}} = x_{D_{\text{STA}}} \cos \theta_d \cos F_d - y_{D_{\text{STA}}} \sin F_d - z_{D_{\text{STA}}} \sin \theta_d \cos F_d ,$$

$$y_{D_{\text{HEEQ}}} = x_{D_{\text{STA}}} \cos \theta_d \sin F_d + y_{D_{\text{STA}}} \cos F_d - z_{D_{\text{STA}}} \sin \theta_d \sin F_d ,$$

$$z_{D_{\text{HEEQ}}} = x_{D_{\text{STA}}} \sin \theta_d + z_{D_{\text{STA}}} \cos \theta_d.$$

Знаходимо точку E як точку перетину двох прямих AC і BD . Висоту хвилі (довжина відрізка EF) визначаємо як різницю відстаней від точки E до центра Сонця і його радіуса.

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

Вибір точки перетину епіполярної лінії з гребенем хвилі є обґрунтованим, але не унікальним, оскільки гребінь хвилі має деяку ширину. Похибка візуального вибору цієї точки залежить від ширини гребеня. Вибір точки перетину зовнішньої (внутрішньої) межі гребеня хвилі з епіполярною лінією дозволяє визначити верхню (нижню) межу оцінки висоти хвилі. Висота точки, вказаної на рис. 3, становить 98879 км. Верхня і нижня межі дорівнюють 103 400 км і 94 364 км відповідно. Таким чином, у цьому випадку похибка при визначенні висоти не перевищує 5%.

Визначаючи точку перетину гребеня хвилі з епіполярною лінією, графічно знаходимо розв'язок системи двох рівнянь, одне з яких характеризує межу гребеня хвилі, а друге описує епіполярну лінію. Як показано на рис. 3, a , епіполярна лінія і межа гребеня хвилі взаємно перпендикулярні. Це забезпечує хорошу обумовленість системи, розв'язком якої є координати точки (відміченої жовтим хрестиком) на зображення зі STEREO B (рис. 3, b), і, отже, мінімальний вплив похибок на розв'язок. Якщо кут між цими лініями прямує до нуля, то система стає некоректною і вироджується, якщо кут дорівнює нулю. Навіть незначні похибки можуть призвести до хибного розв'язку. Отже, не варто очікувати, що буде знайдено надійний розв'язок для північних і південних точок фронту хвилі.

Тому визначаємо множину точок C вздовж західної і східної ділянок гребеня хвилі, якщо дивитися з космічного апарата A , і відповідні точки D , якщо дивитися з космічного апарата B у двох східних і західних секторах, у яких кут між епіполярною лінією і гребенем хвилі близький до прямого кута. Після вибору відповідних точок C , визначених із зображень STEREO A і точок D , визначених із зображень STEREO B, розрахуємо просторові координати і висоту. Для всіх вибраних точок визначаємо також відстань від точки C і точки D до еруптивного центра та відстань від ортогональних проєкцій F до еруптивного центра. Ці характеристики наведено в табл. 1 і 2.

Таблиця 1. Характеристики обраних точок E на гребені хвилі о 4:25 UT

Східний фронт хвилі				Західний фронт хвилі			
Точки	Висота E-F	Відстань C-F	EE1	Точки	Висота E-F	Відстань D-F	EE1
1	13745	4327	330	5	41548	23315	136
2	18972	5997	1266	6	38757	21834	457
3	21019	6507	234	7	31327	17727	545
4	18115	5601	734	8	39477	22025	1093
–	–	–	–	9	29617	16443	657
–	–	–	–	10	32458	17972	1152
СЗ	17963	5608	641	СЗ	35530	19886	673
СКП	3065	931	470	СКП	4986	2839	389

Примітка: СКП — середньоквадратична похибка

Таблиця 2. Характеристики точок E на гребені хвилі о 4:35 UT

Східний фронт хвилі				Західний фронт хвилі			
Точки	Висота E-F	Відстань C-F	EE1	Точки	Висота E-F	Відстань D-F	EE1
1	98882	36361	0	12	122810	74893	777
2	96218	35363	711	13	116658	71198	1007
3	100537	37083	1	14	120944	74753	811
4	98484	36336	814	15	114921	71074	825
5	99806	36752	315	16	113891	70651	110
6	89931	33407	906	17	120290	74576	400
7	103436	38974	942	18	110790	68236	40
8	105461	38633	942	19	112226	68898	36
9*	84118	30558	902	20	111174	67334	1493
10*	83904	30630	836	21	94566	55464	867
11*	62501	22639	944	22*	86673	49685	832
–	–	–	–	23*	69782	41185	965
C3	93025	34249	665	C3	107894	65662	680
СКП	12424	4776	375	СКП	16031	10915	445

*Точки, що належать фрагменту фронту хвилі, який поширюється в бік малих активних ділянок.

Як видно з табл. 1 і 2, EUV хвиля виникає з початковою висотою понад 18–36 Мм, висота фронту протягом інтервалу часу 4:25–4:35 UT різко збільшується до 93–109 Мм. Висота точок, що належать фрагменту фронту хвилі, який поширюється в напрямку малих активних ділянок, досягає лише 63–87 Мм о 4:35 UT, у той час, як висота ділянок, що простягаються по спокійному Сонці, зростає до 90–123 Мм над поверхнею (табл. 1, 2). Можна зробити висновок, що висхідний рух хвилі сповільнюється в результаті взаємодії з іншими малими активними ділянками.

О 4:25 UT висота західного гребеня хвилі становила 36 Мм і збільшилася до 109 Мм над поверхнею о 4:35 UT, а о 4:25 UT східний гребінь хвилі був досить низько (18 Мм над поверхнею). Однак він поширюється над поверхнею протягом інтервалу 4:25–4:35 UT з більшою швидкістю, що близька до швидкості західного гребеня хвилі, визначеної раніше. Висота східного гребеня хвилі збільшилася на 75 Мм (з 18 до 93 Мм) протягом інтервалу 4:25–4:35 UT і стала вдвічі меншою за його дальність поширення по диску Сонця. Тому стає очевидним, що висхідний рух гребеня хвилі на ранній стадії набагато інтенсивніший, ніж його поширення по диску Сонця.

ВИСНОВКИ

Розроблено метод відновлення просторової структури EUV хвилі, що супроводжує корональний викид маси на Сонці. Відповідно до стереоскопічних спостережень Сонця в інтервалі часу 4:25–5:05 UT 7 грудня 2007 р. двома космічними апаратами STEREO Ahead і STEREO Behind, що дають уявлення про EUV хвилю з різних кутів зору, визначено висоту хвилі на ранній стадії розвитку події.

Висоту піка EUV хвилі, коли два космічні апарати бачили різні аспекти хвилі і різні ділянки затемнення, визначено з урахуванням того, що внутрішня частина хвилі, яку видно з одного космічного корабля, закривається високим гребенем хвилі для другого космічного апарата. Ідентифікацію та відповідність між точками гребеня хвилі на обох зображеннях встановлено з використанням епіполярної геометрії. Показано, що існують сегменти фронту хвилі, у яких проблема відповідності стає некоректною і вироджується. Ідентифікація цих сегментів з обох зображень призводить до отримання неправильних оцінок. Тому було встановлено відповідність тільки між точками на обох зображеннях, у яких ця проблема є добре обумовленою і похибка визначення висоти не перевищує 5 %.

Під час дослідження просторової структури EUV хвилі отримано такі результати:

- висота EUV хвилі на ранніх етапах розвитку KBM становить від 18–36 Мм о 4:25 UT до 60–120 Мм о 4:35 UT;
- висхідний рух хвилі сповільнюється унаслідок взаємодії з іншими малими активними ділянками;
- на ранній стадії висхідний рух гребеня хвилі набагато інтенсивніший, ніж його поширення по диску Сонця.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Inhester B.* Stereoscopy basics for the STEREO mission / B. Inhester // ArXiv Astrophysics e-prints. — 2006.
2. *Ma S.* A New View of Coronal Waves from STEREO / S. Ma, M.J. Wills-Davey, J. Lin et al. // The Astrophysical Journal. — 2009. — № 707. — P. 503–509.
3. *Veronig A.M.* First Observations of a Dome-shaped Large-scale Coronal Extreme-ultraviolet Wave / A.M. Veronig, N. Muhr, I.W. Kienreich et al. // The Astrophysical Journal. — 2010. — № 716. — P. 57–62.
4. *Podladchikova O.* Automated Detection of EIT-waves and Dimmings / O. Podladchikova, D. Berghmans // Solar Physics. — 2005. — № 228. — P. 265–284.
5. *Kienreich I.W.* STEREO Quadrature Observations of the Three-Dimensional Structure and Driver of a Global Coronal Wave / I.W. Kienreich, M. Temmer, A.M. Veronig // The Astrophysical Journal. — 2009. — № 703. — P. 118–122.
6. *Patsourakos S.* Extreme Ultraviolet Waves are Waves: First Quadrature Observations of an Extreme Ultraviolet Wave from STEREO / S. Patsourakos, A. Vourlidas // The Astrophysical Journal. — 2009. — № 700. — P. 182–186.
7. *Черток И.М.* Крупномасштабные канализированные димминги, вызываемые корональными выбросами массы на солнце / И.М. Черток, В.В. Гречнев // Астрономический журнал. — 2003. — № 80. — С. 162–174.

Надійшла 06.10.2015