

Застосування епіполярної геометрії для стереоскопічного аналізу корональної хвилі

1. Вступ

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

КВМ складається в основному з електронів і протонів і супроводжується великомасштабним збуренням магнітного поля Сонця, яке найбільш яскраво проявляється у вигляді так званих "діммінгів" і корональних хвиль.

Діммінги являють собою області зниженої інтенсивності м'якого рентгенівського і крайнього УФ-випромінювання з часом життя від декількох до десятків годин, які формуються слідом за КВМ біля еруптивного центру. Корональні хвилі спостерігаються як фронти підвищеної яскравості, що поширюються під час КВМ-подій перед діммінгами.

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

26 жовтня 2006 року НАСА були запущені два космічні апарати STEREO (Solar Terrestrial Relations Observatory) з метою отримання стереоскопічних спостережень Сонця з навколосемної орбіти.

Обертаючись по геліоцентричній орбіті, супутник STEREO Behind відстає від Землі, а STEREO Ahead, навпаки, обганяє її. Оскільки вони мають трохи різні орбіти, то кутова відстань між STEREO A і STEREO B збільшується зі швидкістю приблизно 45 градусів на рік. На обох космічних апаратах встановлено EUV Imager, який спостерігає за сонячним диском .Часовий ряд спостережень SECCHI забезпечив уявлення про EUV хвилю з різних кутів зору. Таким чином , існує геометричне співвідношення між 3D точками та їх проекцією на 2D -зображеннях. Завдяки отриманим даним стало доступним стерео бачення.

Основні принципи стереоскопії для STEREO були описані Інхестером (2006). В цьому дослідженні сфокусовано увагу на проблемі ідентифікації та відповідності об'єктів для відновлення стерео зображень як одній з найважчих проблем і показано, що вирішення проблеми відповідності часто сильно залежить від об'єкта спостереження.

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

Кінематика і структура EUV хвилі має важливе значення для розуміння її фізичної природи. Оцінка швидкості хвилі, як правило, визначається вимірами положення пікової інтенсивності для кожного фронту хвилі, що розповсюджуються в обраних напрямках. Як зазначає у роботі [1], навіть незначна висота EUV хвилі, може істотно впливати на результати. Зміни зовнішніх кордонів і ширини EUV хвилі були вперше вивчені Вероніг [2 - 3].

Юля, впервые границы ширины EUV волны определены в работе [3]

в 2005 г. Но лучше не употреблять вообще слово «впервые». Мы не можем гарантировать, что еще кто-то не дал оценки ширине волны. Надо писать осторожней во избежания недоразумений.

Важко оцінити надійні значення висоти EUV хвилі, оскільки вона розглядається як коливання корони, що, як правило, з'являється як дифузне свічення, що поширюється на Сонці. Фронт хвилі не має гладкої поверхні з чіткими краями меж яскравості, кольору і текстури, а характеризується поширенням інтенсивності пікселів. Була проведена лише невелика кількість досліджень з метою вивчення 3D структури EUV хвилі у зв'язку з складністю проблеми співставлення дифузійних об'єктів за допомогою пари стереозображень.

Кенрейч, Теммер і Вероніг [4] оцінили висоту EUV хвилі з безпрецедентних

Три автора не указывают . Пишут так: Кенрейч та ін. [4]

спостережень квадратури STEREO 13 лютого 2009, коли хвиля спостерігалася одночасно в центрі диска на зображеннях з STEREO-B і на лімбі Сонця на зображеннях із STEREO-A. За таких оптимальних умов для спостережень **було отримано** значення висоти хвилі в діапазоні 80-100 Мм.

Оцінку висоти за більш складних умов (7 грудня 2007 року), коли кут між космічними апаратами становив 45 градусів і зі STEREO-A та STEREO-B можна було спостерігати різні грані хвилі, було знайдено . **Петсоракос. та Вурлидас, [5]**. Оскільки триангуляція була виконана без обґрунтованого розв'язку проблеми відповідності вершини EUV хвилі на зображеннях від обох космічних апаратів, то це могло призвести до отримання ненадійного значення оцінки висоти.

В даній роботі підхід, оснований на епіполярній геометрії стерео бачення , використовується для вирішення проблеми відповідності з її обґрунтуванням на зображеннях від обох космічних апаратів вершини EUV хвилі, що супроводжувала корональний викид маси на Сонці 7 грудня 2007 року, і визначення висоти хвилі .

Последнее предложение очень тяжеловесное. Предлагаем его заменить двумя предложениями , которые написаны красным ниже.

В даній роботі проблема відповідності розв'язується на основі методів епіпольярної геометрії стерео бачення. Досліджуються умови , коли проблема відповідності стає погано обумовленою і вироджується. У такому випадку навіть невеликі помилки можуть призвести до спотворення рішення .отримання ненадійного значення оцінки висоти. В умовах надійного розв'язання проблеми відповідності визначається висота EUV хвилі, що супроводжувала корональний викид маси на Сонці 7 грудня 2007 року

2. Аналіз EUV спостереження подій з космічних апаратів STEREO 7 грудня 2007 року.

EUVI / STEREO 195 A зображення повного Сонця були отримані 7 грудня 2007 року з двох космічних апаратів STEREO з частотою 10 хв , коли EUV хвиля і корональний викид маси **спостерігались** в активній області 10977 .

Вивчення динамічних сонячних явищ, **що супроводжують КВМ**, таких як EUV хвилі та димінги, проводиться **на основі** формування різницевих зображень двох типів. Послідовні різницеві зображення отримуються, коли з кожної поточної геліограми віднімається попередня. Під час **формування** фіксованих різницевих зображень одне й те ж **зображення** перед подією віднімається з усіх наступних зображень. На таких різницевих зображеннях димінги проявляються як темні утворення пониженої інтенсивності, а корональні хвилі – у вигляді яскравого фронту, що розповсюджується **вздовж сонячного диска**. [6]

Для просторового аналізу структури корональних подій було сформовано фіксовані EUVI різницеві зображення для обох апаратів STEREO **з урахуванням** особливостей обертання Сонця. Послідовні різницеві зображення, отримані шляхом вирахування попереднього зображення від поточного, хоча і показують кращий 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[6].

Слідом за КВМ в околі еруптивного центру формуються димінги або транзйентні корональні діри, які являють собою області зниженої інтенсивності м'якого рентгенівського і крайнього УФ-випромінювання . На послідовних різницевих зображеннях відбудеться штучне збільшення випромінювання, якщо глибина істинних димінгів, зменшується на двох послідовних зображеннях. Також темні області можуть являти собою частину внутрішньої сторони фронту хвилі на поточному зображенні, якщо ця область відповідає яскравому гребені хвилі на попередньому зображенні.

Это расписывать в статье не надо. Надо только дать ссылку.

Фіксовані різницеві зображення, **що формуються** шляхом вирахування еталонного зображення, отриманого до настання події, з кожного наступного зображення показують кращу геометричну структуру димінгів, внутрішні

кордони хвильового фронту і фізичні властивості області між затемненням і фронтом хвилі.

Розглянемо EUV спостереження подій з космічних апаратів STEREO 7 грудня 2007 року з 4:25 UT до 5:05 UT на сонячному диску. Рис.2.1 ілюструє області виверження на фіксованих різницевих зображеннях 4:25 UT-5: 05 UT відносно зображення о 4:15 UT, що йому передуює в полі зору STEREO A (Рис. 2.1 - зліва) і STEREO B (Рис. 2.1 - справа).

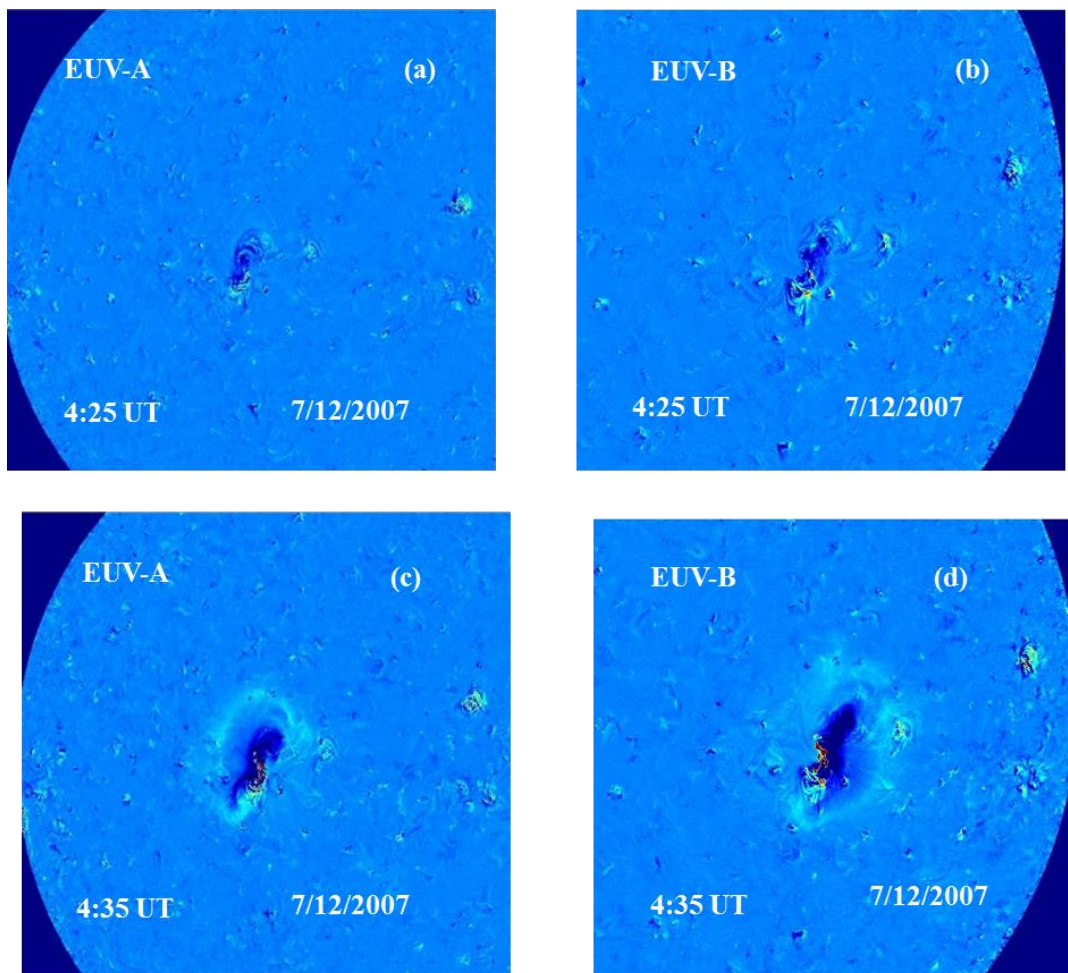


Рисунок 2.1 – Зображення з космічних апаратів STEREO A і B

На початковій стадії утворення EUV хвилі о 4:25 UT також можна побачити еруптивні петлі (Рис. 2.1 (a),(b)).

Это не лекция , а статья. Предыдущую фразу надо брать

Зображення EUV хвилі о 4:25 UT (Рис. 2.1 (a),(b)) та о 4:35 UT (Рис. 2.1 (c),(d)) істотно відрізняються, оскільки кожен з супутників STEREO A і B бачить різні грані хвилі та різні області затемнення(димингов). Із супутника А ми бачимо зовнішню сторону західного фронту хвилі, внутрішню сторону східного фронту хвилі, а також східну частину диммінга. Інша частина диммінга, що знаходиться між еруптивним центром і східним фронтом хвилі, залишається невидимою через високий східний гребінь хвилі.

З супутника В видно зовнішню сторону східного фронту хвилі, внутрішню сторону західного фронту хвилі і західну частину диммінга. Високий гребінь

західної сторони фронту хвилі маскує західну частину диммінга, що видно з. Найімовірніше, правий (лівий) кордон зовнішньої сторони східного (західного) фронту хвилі, якщо дивитися з STB (STA) є проекцією високого гребеня східного (західного) фронту хвилі, що краще видно з STA (STB).

3. Визначення висоти корональної хвилі

3.1. Використання епіполярної геометрії для визначення структури хвилі

Спостереження сонячного диску з різних кутів дає можливість 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 області диммінгів (Рис. 2.1 (a)-(d)).

На Рис. 3.1 схематично показано розташування космічних апаратів А і В відносно Сонця, та зображено EUV хвилю. Східна частина затемнення (диммінга) й внутрішня сторона фронту східної хвилі спостерігаються з точки А. Однак ця область невидима з точки В. Проте найвища точка гребеня (як, наприклад, точка Е) є доступною для спостереження з обох космічних апаратів.

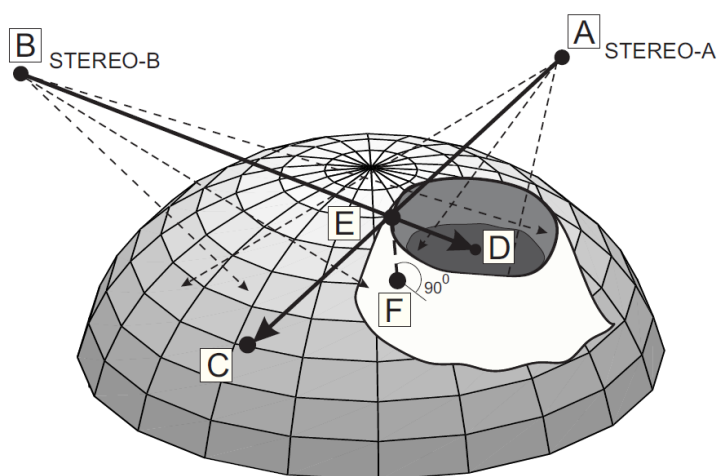


Рисунок 3.1 - Схематичне зображення космічних апаратів А і В відносно Сонця та EUV хвилі.

Лінія видимості з точки В точки Е перетинається зі сферою в точці D, а продовження прямої АЕ перетинається зі сферою в точці С. Точка С є проекцією точки Е на сферу вздовж лінії АЕ, а точка D є проекцією точки Е на сферу вздовж прямої ВЕ. Для космічного апарату В пряма ВЕ стає точкою, оскільки вона збігається з лінією видимості для STEREO В. Однак зі STEREO А видно частину цієї прямої як епіполярну лінію на своїй площині зображення.

Аналогічно, пряма АЕ 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 із сферою прямої, що з'єднує точку E з центром сфери). Відстань між точками C і D, та відстань між еруптивним центром і гребенем хвилі збільшується зі зростанням відстані від точки E до поверхні. Якщо точка E знаходиться на поверхні, то ці точки збігаються. Якщо точка E знаходиться вище (нижче) від поверхні, то точка C переміщається вліво (вправо) відносно точки D.

Якщо точки D і C обрані правильно, то прямі BD і AC в просторі перетинаються точно в точці E. Помилка у виборі прямих BE і AE може призвести до помилки 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. 2.1 (a), з STEREO A) та західний гребінь (Рис. 2.1 (b), з STEREO B) істотно відрізняються від внутрішньої сторони фронту хвилі за кольором, яскравістю та текстурою. Межа гребеня хвилі характеризується різким стрибком яскравості і неоднорідністю текстури. Яскраві краї вздовж цієї межі належать до гребеня хвилі. В такому випадку можна реалізувати реконструкцію, лише якщо ці краї можуть бути ідентифіковані по зображеннях. Проблема відповідності складається з правильного визначення цих точок по двох стереозображеннях.

Для подальшої роботи нам необхідно ввести поняття епіполярної лінії.

Предыдущая фраза не нужна, так как это не лекция, а статья

Епіполярна лінія- це лінія перетину епіполярної площини, що визначається 2 центрами спостереження і точкою об'єкта спостереження, та площини зображення. Іншими словами, проекція епіполярної площини на зображення, отримані з центрів спостереження, утворює епіполярну лінію.

Щоб відновити 3D структуру EUV хвилі, спочатку вибираємо за допомогою курсору точку на гребені хвилі на одному зображенні з STEREO B, як показано жовтим хрестиком на Рис. 3.2 (b). Таким чином, ми визначаємо координати точки D, в якій лінія видимості точки E з точки B перетинається з прямою BD, яку видно зі STEREO A. Тоді ми проводимо епіполярну лінію на зображенні від STEREO A як відрізок прямої BD, (червона лінія на Рис. 3.2 (a)). Далі знаходимо точку перетину епіполярної лінії і гребеня хвилі (жовтий хрестик на Рис. 3.2 (a)), тобто координати точки перетину прямої АЕ зі сферою. Аналогічно визначаємо точку D для супутника STEREO B.

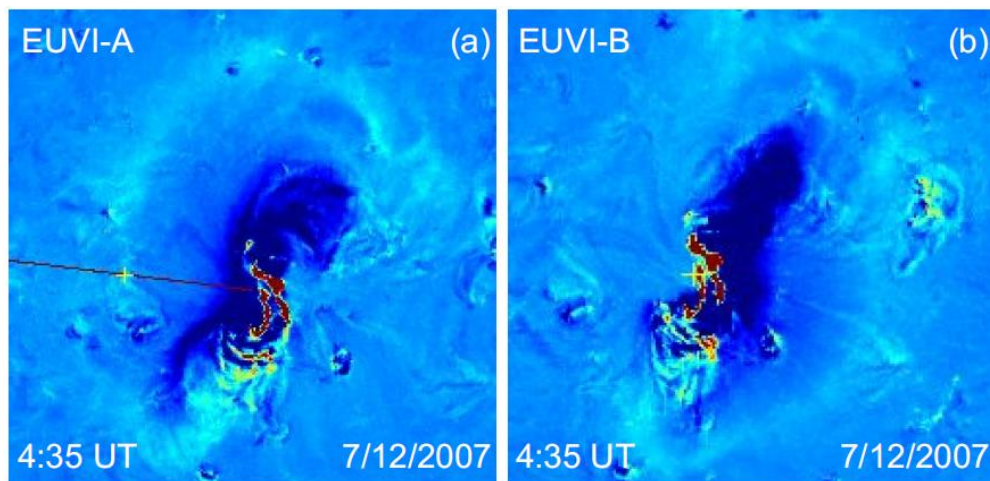


Рисунок 3.2 - Знаходження точки перетину епіполярної лінії і гребеня хвилі.

3.2 Визначення тривимірних координат точок по зображеннях

Супутники STEREO спостерігають за сонячним диском з різних точок однієї орбіти і коронографи формують зображення відносно своєї системи координат. *Причем тут коронографи ?* Координати точок, які ми отримуємо, належать до геліоцентричних систем координат відповідних супутників (Рис. 3.3), в яких початок координат відповідає центру Сонця, вісь X направлена на центр маси супутника, піввісь $+Z$ направлена від Землі, площина $X-Z$ містить супутник, Сонце і Землю.

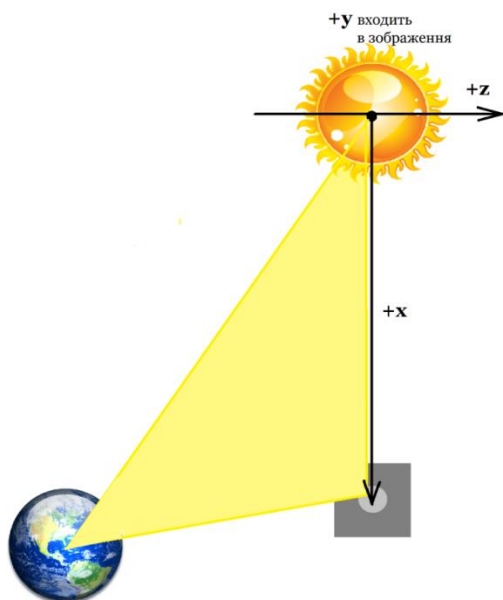


Рисунок 3.3 – Геліоцентрична система координат супутника STEREO

Оскільки осі супутників STEREO A і STEREO B направлені у різні сторони, то для подальшої обробки даних необхідно перетворити координати точок з геліоцентричних систем координат супутників до спільної системи

координат, в ролі якої використаємо геліоцентричну земну екваторіальну систему (Heliocentric Earth equatorial- HEEQ).

Система координат HEEQ або Стоніхерстська геліографічна система координат (рис. 3.4) утворюється перетином сонячного екватора і центрального меридіана зі сторони Землі. Отже, система координат зафіксована відносно Землі, в той час як Сонце обертається. Кути задаються в градусах, які збільшуються до Північного полюсу і до Західного лімбу. Відстань r – це фізична відстань в метрах або ж відстань відносно сонячного фотосферичного діаметру $R=6,96 \times 10^8$ м.

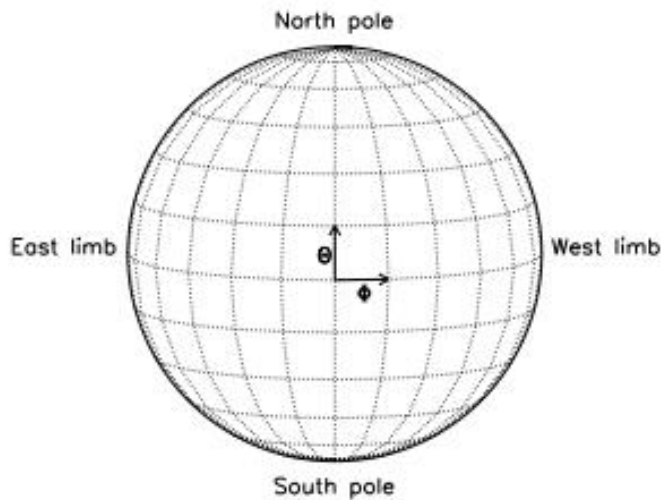


Рисунок 3.4 - Геліоцентрична земна екваторіальна система координат

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

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

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

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

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

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

$$Z_{HEEQ} = r \sin \theta$$

В системі НЕЕQ вісь Z паралельна сонячній осі обертання і направлена з сторону північного полюсу Сонця, а вісь X утворюється перетином сонячного екватора та сонячного центрального меридіану зі сторони Землі.

На початку знайдемо координати точки A в геліоцентричній системі координат супутника STEREO A з віссю Ox , що проходить вздовж променя OA.

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

$$\begin{pmatrix} x_{aa} \\ y_{aa} \\ z_{aa} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.967AU \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

Де AU – астрономічна одиниця, що дорівнює 149 597 870 700 метрам²

0.967 AU – геліографічна відстань від супутника A станом на 7 грудня 2009 року;

Декартові координати точки B в системі супутника B наступні:

$$\begin{pmatrix} x_{bb} \\ y_{bb} \\ z_{bb} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.03AU \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

Де 1.03 AU – геліографічна відстань від супутника B станом на 7 грудня 2009 року.

Переведемо координати точок A та B в систему НЕЕQ. Проведемо 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_{aa}' з екваторіальною площиною:

$$x_{aa}' = x_{aa} \cos dT_a$$

$$z_{aa}' = x_{aa} \sin dT_a$$

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

$$x_{Ea} = x_{aa} \cos dT_a \sin dF_a$$

$$y_{Ea} = x_{aa} \cos dT_a \cos dF_a$$

$$z_{Ea} = x_{aa} \sin dT_a$$

Для точки B отримуємо наступний результат:

$$x_{Eb} = x_{bb} \cos dT_b \cos dF_b$$

$$y_{Eb} = x_{bb} \cos dT_b \sin dF_b$$

$$z_{Eb} = x_{bb} \sin dT_b$$

Нехай $\begin{pmatrix} x_{ac} \\ y_{ac} \\ z_{ac} \end{pmatrix}$ – декартові координати точки С в системі супутника А. $F_c > 0$, $\theta_c < 0$ – довгота і широта точки С. Знайдемо координати точки в системі НЕЕQ.

Спочатку здійснимо поворот навколо осі Oy_a на кут θ_c і отримаємо:

$$x_{ac}' = x_{ac} \cos \theta_c - z_{ac} \sin \theta_c$$

$$z_{Ec} = x_{ac} \sin \theta_c + z_{ac} \cos \theta_c$$

$$y_{ac}' = y_{ac}$$

Тепер будемо обертати навколо осі Oz_E на кут F_c

$$\begin{aligned} x_{Ec} &= x_{ac}' \cos F_c - y_{ac}' \sin F_c = \\ &= (x_{ac} \cos \theta_c - z_{ac} \sin \theta_c) \cos F_c - y_{ac} \sin F_c \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y_{Ec} &= x_{ac}' \sin F_c + y_{ac}' \cos F_c = \\ &= (x_{ac} \cos \theta_c - z_{ac} \sin \theta_c) \sin F_c + y_{ac} \cos F_c \end{aligned}$$

В результаті отримуємо шукані координати точки С в системі НЕЕQ

$$x_{Ec} = x_{ac} \cos \theta_c \cos F_c - y_{ac} \sin F_c - z_{ac} \sin \theta_c \cos F_c$$

$$y_{Ec} = x_{ac} \cos \theta_c \sin F_c + y_{ac} \cos F_c - z_{ac} \sin \theta_c \sin F_c$$

$$z_{Ec} = x_{ac} \sin \theta_c + z_{ac} \cos \theta_c$$

Аналогічно знаходимо координати точки D в системі НЕЕQ за умови $F_D < 0$, $\theta_D > 0$

$$x_{ED} = x_b \cos \theta_D \cos F_D - y_b \sin F_D - z_b \sin \theta_D \cos F_D$$

$$y_{ED} = x_b \cos \theta_D \sin F_D + y_b \cos F_D - z_b \sin \theta_D \sin F_D$$

$$z_{ED} = x_b \sin \theta_D + z_b \cos \theta_D$$

Знаючи координати точок А, В, D, складемо рівняння площини і знайдемо координати точки E, як точку перетину з променя АС з даною площиною. Висота хвилі (довжина відрізка EF) визначається як різниця відстані від точки E до центру Сонця і його радіуса.

4. Аналіз результатів

Вибір точки перетину епіполярної лінії з гребенем хвилі є обгрунтованим, 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 мал. 4 становить 98879 км. Верхня і нижня межі дорівнюють 103 400 км і 94 364 км відповідно. Таким чином, в цьому випадку похибка при визначенні висоти не перевищує 5%.

Визначаючи точку перетину гребеня хвилі з епіполярною лінією, ми графічно знайшли розв'язок системи двох рівнянь, одне з яких характеризує межу гребеня хвилі, а інше описує епіполярну лінію. Як показано на Рис. 3.2 (а), епіполярна лінія і кордон гребеня хвилі практично взаємно перпендикулярні. Це забезпечує хорошу обумовленість системи, розв'язком якої є координати точки (відміченої жовтим хрестиком) на зображення зі STEREO B (Рис. 3.2 (b)), і, отже, мінімальний вплив помилок на рішення (Ортега). Якщо кут між цими лініями прямує до нуля, то система стає некоректною, і вироджується, коли кут дорівнює нулю. Навіть незначні помилки можуть призвести до спотворення рішення. Отож не варто очікувати, що буде знайдено надійний розв'язок для північних і південних точок фронту хвилі.

Тому ми визначили множину точок С вздовж західної і східної ділянок гребеня хвилі, якщо дивитися з космічного апарату А і відповідні точки D, якщо дивитися з космічного апарату В у двох східних і західних секторах, в яких кут між епіполярною лінією і гребенем хвилі близький до прямого кута. Після вибору відповідних точок С, що визначаються із зображень STEREO А і точок D, визначених із зображень STEREO В, розраховуються 3D координати і висота. Для всіх вибраних точок ми визначили також відстань від точки С і точки D до еруптивного центру і відстань від ортогональних проєкцій F до еруптивного центру. Ці характеристики наведені в таблиці 4.1 і таблиці 4.2.

Таблиця 4.1 - 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

Таблиця 4.2 - Характеристики точок E на гребені хвилі о 4:35 UT.

Східний фронт хвилі				Західний фронт хвилі			
Точка	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
СЗ	93025	34249	665	СЗ	107894	65662	680
СКП	12424	4776	375	СКП	16031	10915	445

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

Як показано в таблиці 4.1 і таблиці 4.2, EUV хвиля виникає з початковою висотою, що більше 18 Мм-36 Мм, висота фронту протягом інтервалу часу 4:25 UT-4: 35 UT різко збільшується до 93 Мм-109 Мм. Висота точок, що належать фрагменту фронту хвилі, який поширюється в напрямку малих активних областей, досягає лише 63 Мм-87 Мм о 4:35 UT, в той час як висота ділянок, що розповсюджуються 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 областями.

О 4:25 UT висота західного гребеня хвилі становила 36 Мм і збільшилася до 109 Мм над поверхнею о 4:35 UT. О 4:25 UT східний гребінь хвилі був досить низько (18 мм над поверхнею). Однак він поширюється над поверхнею протягом інтервалу 4:25 UT-4: 35 UT з більш високою швидкістю, близькою до швидкості західного гребеня хвилі, що була визначена раніше. Висота східного гребеня хвилі збільшилася на 75 Мм з 18 Мм до 93 Мм протягом інтервалу 4:25 UT-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 розповсюдження по диску Сонця.

Висновки

Розроблено метод відновлення 3-D структури EUV хвилі , що супроводжує корональний викид маси на Сонці. Відповідно до стереоскопічних спостережень Сонця в інтервалі часу 4:25 UT-5: 05 UT 7 грудня 2007 року двома космічними апаратами STEREO Ahead и STEREO Behind, що забезпечують уявлення про EUV хвилю з різних кутів зору, визначена висота хвилі на ранній стадії розвитку події.

Для визначення висоти піку EUV хвилі, коли два космічних апарати бачили різні аспекти хвилі і різні області затемнення, ми скористалися тим, що внутрішня сторона хвилі, яку видно з одного космічного корабля, закривається високим гребенем хвилі для іншого космічного апарата. Ідентифікація та відповідність між точками гребеня хвилі на обох зображеннях була встановлена з використанням епіполлярної геометрії. Ми показали, що існують сегменти фронту хвилі, в яких проблема відповідності стає некоректною і вироджується. Ідентифікація цих сегментів з обох зображень веде до отримання неправильних оцінок. Тому була встановлена відповідність тільки між точками на обох зображеннях, в яких ця проблема є добре обумовленою і похибка визначення висоти не перевищує 5 %.

Досліджуючи 3D структуру EUV хвилі ми отримали наступні результати:

- Висота EUV хвилі на ранніх етапах розвитку KBM складає від 18 Мм -36 Мм о 4:25 UT до 60 Мм-120 Мм о 4:35 UT
- Висхідний рух хвилі сповільнюється в результаті взаємодії з іншими малими активними областями.
- На ранній стадії висхідний рух гребеня хвилі набагато інтенсивніший , ніж його розповсюдження по диску Сонця.

Література

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