

PROGRAMUL: IDEI

TIPUL PROIECTULUI: Proiecte de Cercetare Exploratorie (PCE)

Cod Proiect: PN-II-ID-PCE-2012-4-0418

Proiect: Turbulență, intermitență și transfer de energie în vântul solar și magnetosferele planetare (TIMESS)

CONTRACTOR : INSTITUTUL DE ȘTIINȚE SPAȚIALE – FILIALA INFLPR

Descrierea Etapei de execuție Decembrie 2013

Autori : Dr. Marius Echim, Drd. Costel Munteanu, Dr. Eliza Teodorescu, Drd. Gabriel Voitcu

Obiectivele etapei

1. **Evaluarea tipului de discontinuități existente în vântul solar folosind observațiile satelitului ACE**
2. **Testarea unor metode de optimizare a analizei discontinuităților și timpului de propagare folosind wavelets.**
3. **Studiul amprentei spectrale a discontinuităților și importanța pentru turbulența intermitență**

Obiectiv 1. Evaluarea tipului de discontinuități existente în vântul solar folosind observațiile satelitului ACE

Activități pentru atingerea Obiectivului 1

- *Selectarea unei baze de date de discontinuități folosind observațiile satelitului ACE*
- *Analiza proprietăților macroscopice a discontinuităților selectate*

Descrierea activităților desfășurate pentru atingerea Obiectivului 1 și a rezultatelor obținute.

Pentru selectarea bazei de date de discontinuități din observațiile satelitului ACE am abordat o strategie care a vizat (1) validarea selecției prin observații simultane ale satelitului Cluster în proximitatea magnetosferei terestre respectiv (2) selecționarea acelor discontinuități care au fost observate în timpul unor procese tranzitorii din vântul solar de tip “Corotating Interaction Regions (CIR)”. Au rezultat două baze de date de discontinuități, D1DSC respectiv D2DSC, a căror utilitate și relevanță științifică este complementară, după cum vom arăta mai jos.

Discontinuitățile detectate simultan de ACE și Cluster și incluse în D1DSC sunt importante pentru studii de meteorologie spațială («space weather») privind propagarea perturbațiilor din vântul solar în magnetosfera terestră (Figura 1). Aceste discontinuități au fost identificate prin inspecția vizuală a datelor de câmp magnetic ale satelitului Cluster 3 ; pentru identificarea discontinuităților s-a folosit criteriul rotației maxime a vectorului câmp magnetic. După identificarea discontinuităților în datele de

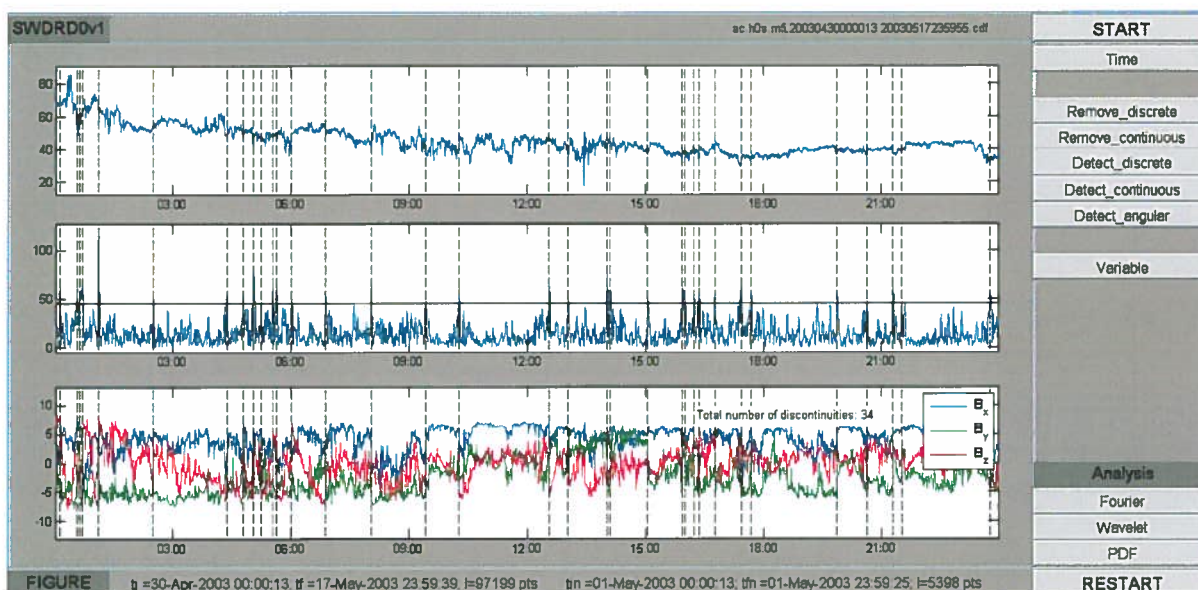


Figura 2. Analiză a datelor de câmp magnetic măsurate în vântul solar de satelitul ACE al NASA. Cele trei paneluri prezintă (a) câmpul magnetic total, (b) unghiul de rotație θ_{12} definit conform (1), respectiv (c) cele trei componente ale câmpului magnetic în sistemul GSE. Liniile punctate cu negru identifică momentele de timp pentru care condiția (1) este satisfăcută, deci practic discontinuitățile magnetice. Figura ilustrează un instantaneu de lucru cu interfața grafică concepută în cadrul proiectului TIMESS pentru analiza discontinuităților.

În general discontinuitățile se propagă cu viteza vântului solar. În distribuția ilustrată de figura 3a se identifică două categorii, corespunzător celor două regimuri ale vântului solar : rapid ($V_{sw} > 450$ km/s), respectiv lent ($V_{sw} < 450$ km/s). Numărul de discontinuități din vântul solar lent este mai mare, probabil în legătură cu compresibilitatea crescută a vântului solar lent. Nu se observă o corelație între unghiul între viteza vântului solar și câmpul magnetic (figura 3b), însă acest aspect necesită o continuare a analizei datelor.

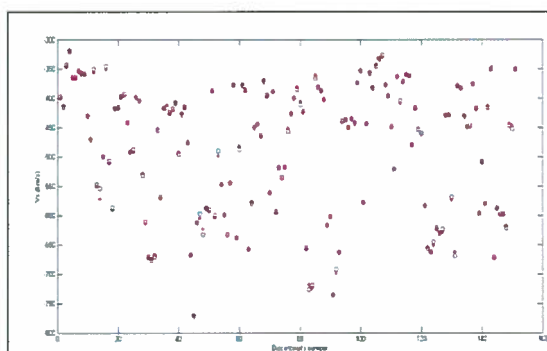


Figura 3a. Distribuția vitezelor pentru un subset de discontinuități din baza de date D1SC.

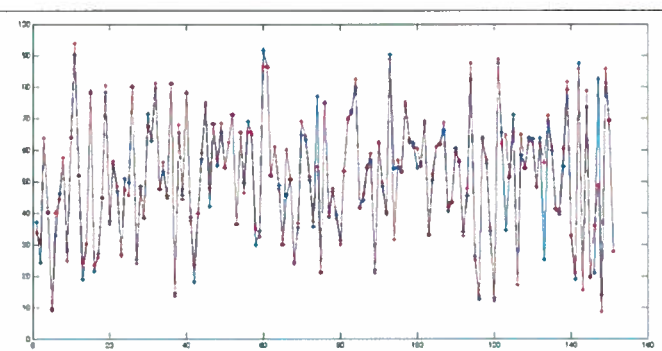


Figura 3b. Distribuția unghiului între câmpul magnetic și viteza vântului solar pentru un subset din baza de date D1SC.

Bazele de date de discontinuități din vântul solar, D1DSC și D2DSC sunt rezultatele cunaticabile ale acestor activități. Bazele de date sunt stocate pe serverul ISS și vor fi incluse în analizele etapele viitoare ale proiectului.

Obiectiv 2. Testarea unor metode de optimizare a analizei discontinuităților și timpului de propagare folosind wavelets.

Activități pentru atingerea Obiectivului 2

- studiul timpului de propagare a discontinuităților în vântul solar
- evaluarea efectului unor metode de tip wavelet denoising asupra timpului de propagare

Descrierea activităților desfășurate pentru atingerea Obiectivului 2 și a rezultatelor obținute.

Optimizarea analizei discontinuităților și a timpului de propagare este un subiect care ne preocupă de mai mult timp. În cadrul proiectului TIMESS valorificăm această experiență în contextul analizei turbulenței și intermitenței. Eforturile noastre principale sunt canalizate în direcția aplicării algoritmilor de eliminare a zgomotului cu ajutorul funcțiilor wavelet. Într-adevăr, această tehnică are aplicații multiple, inclusiv în domeniul analizei intermitenței. Estimarea timpului de propagare a discontinuităților și a metodelor de eliminare a zgomotului comporta mai multe etape : (1) estimarea normalei discontinuității și a direcției de propagare ; (2) estimarea parametrilor optimați pentru algoritmi de eliminare a zgomotului ; (3) evaluarea unor criterii de calitate privind timpul de propagare a discontinuității din vântul solar la magnetopauza terestră ; (4) eliminarea zgomotului și reevaluarea criteriilor de calitate pentru semnalul filtrat.

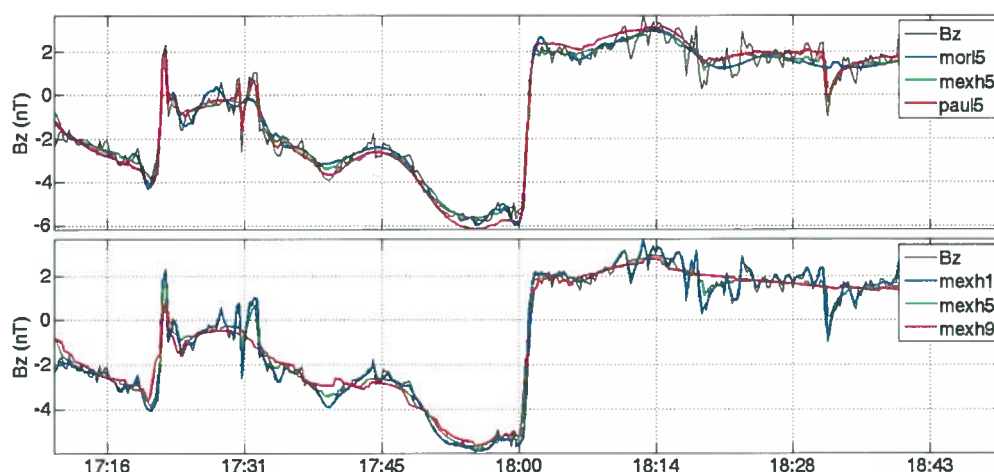


Figura 4. Ilustrare a procedurii de denoising folosind reprezentarea wavelet. Panelul (a) ilustrează rolul familiei de funcții wavelet (morlet, paul și “Mexican hat”); panelul (b) ilustrează efectul pragului p ($p=1,5,9$) pentru filtrarea cu funcția wavelet de tip “Mexican hat”.

În ceea ce privește etapa (1), estimarea normalei la discontinuitate, au fost aplicate trei metode (clasice) alternative : produsul vectorial (CP), metoda minimei varianțe asupra câmpului magnetic (MVAB), respectiv metoda minimei varianțe cu constrângeri geometrice (MVAB0). Fiecare metodă este caracterizată de un set de parametri care sunt optimizați pe baza comparării observațiilor ACE și Cluster ale aceleiași discontinuități. Metodele sunt descrise pe larg în literatură, inclusiv în Munteanu et al. (2013). Eliminarea zgomotului s-a făcut cu ajutorul funcțiilor wavelet. Au fost testate familii reprezentative de funcții wavelet, Morlet (cu o bună rezoluție spectrală), Paul (cu o bună rezoluție temporală), respectiv Gaussian (sau « Mexican Hat »), un compromis între Morlet și Paul. Transformarea wavelet continuă a unei funcții $f(t)$ în baza ψ se definește :

$$T(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi^{a,b}(t) dt, \quad (2)$$

unde

$$\psi^{a,b}(t) = a^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$$

Procedura de filtrare sau de eliminare a zgomotului (“denoising”) se construiește în spațiul coeficienților wavelet, $T(a,b)$, prin anularea acelor coeficienți a căror valoare este mai mică decât un anumit prag, p :

$$T^d(a, b) = \begin{cases} T(a, b), & \text{if } |T(a, b)| > (p/100) \cdot \max(|T(a, b)|), \\ 0, & \text{if } |T(a, b)| \leq (p/100) \cdot \max(|T(a, b)|). \end{cases}$$

Semnalul filtrate se obtine din transformata wavelet inversă :

$$f^d(t) = C_{\psi} \int_a \int_b a^{-2} T^d(a, b) \psi^{a,b}(t) da db,$$

Un exemplu de filtrare și reconstrucție este ilustrat în figura 4. Semnalul analizat este componenta B_z a câmpului magnetic interplanetar măsurat de satelitul ACE. Au fost aplicate trei funcții wavelet diferite și trei praguri diferite ($p=1,5,9$). În general funcțiile wavelet testate (Morlet, Gauss și Paul) au efecte comparabile, totuși funcția Morlet pare să elimine mai eficient variațiile rapide. Efectele relative asupra timpului de propagare au fost estimate comparând timpul prezis de propagarea din poziția ACE în poziția Cluster în direcția normalei discontinuității, și timpul real la care discontinuitatea este detectată în datele Cluster. Un sumar ilustrativ este prezentat în figura 5 care descrie efectul a trei familii de funcții wavelet și a zece valori ale parametrului p asupra timpului de propagare, unghiului relativ de orientare a discontinuității θ , respectiv unghiului de rotație ϕ a câmpului magnetic la traversarea discontinuității.

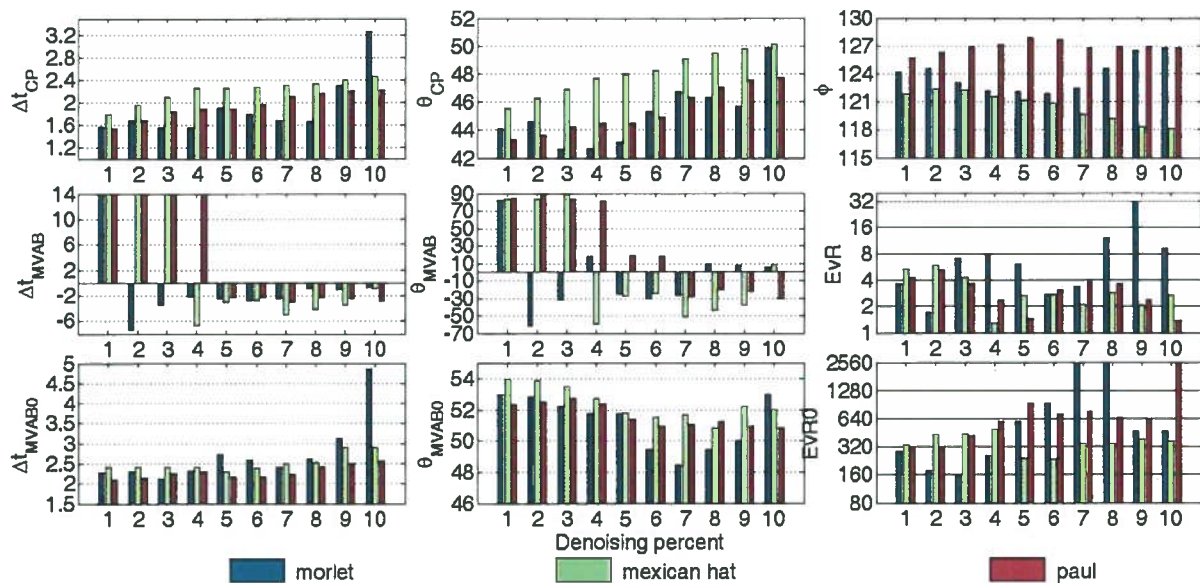


Figura 5. Performanța relativă a filtrării (denoising) cu trei familii de funcții wavelet (Morlet – albastru, Gaussiană – verde, Paul – roșie) și zece praguri $p = 1,10$ asupra timpului de propagare a unei discontinuități tipice detectate de ACE. Coloana din stînga ilustrează valorile timpului de propagare după denoising, coloana din mijloc reprezintă valoarea unghiului între normala la discontinuitate și viteza vântului solar, coloana din dreapta reprezintă valoarea unghiului de rotație a câmpului magnetic la traversarea discontinuității. Se observă rolul critic al parametrului p pentru metoda MVAB.

Proprietățile statistice ale discontinuităților din vântul solar sunt descrise și de rezultatele grafice discutate mai sus și reprezintă rezultatul principal al acestor activități.

Obiectiv 3 Studiul amprentei spectrale a discontinuităților și importanța pentru turbulența intermitență

Activități pentru atingerea Obiectivului 3

- Analiza spectrului de putere (PSD) a câmpului magnetic al discontinuităților din vântul solar
- Analiza funcțiilor de densitate de probabilitate (PDF) ale câmpului magnetic al discontinuităților din vântul solar

Descrierea activităților desfășurate pentru atingerea Obiectivului 3 și a rezultatelor obținute.

Dezvoltarea spectrului turbulent în plasmă spațială ridică în continuare numeroase semne de întrebare, atât din punct de vedere teoretic cât și din punct de vedere experimental. Prezența

intermitenței, i.e. a unor fluctuații cu caracter stocastic în domeniul spațio-temporal, este confirmată experimental în domeniul de scale tipice regimului de disipare. Numeroase studii teoretice dedicate turbulenței în fluide neutre la numere Reynolds mari au reușit parțial să descrie intermitența. Existența fluctuațiilor intermitente în domeniul de inerție este mult mai problematică. Nu există un consens, nici din punct de vedere experimental nici teoretic. Datele înregistrate de sateliți în vântul solar aduc elemente importante din punct de vedere experimental. În plasmă în general, și în plasmă spațială (în general lipsite de ciocniri) în special, situația este și mai complexă. Deși a fost propus un echivalent pentru plasmă (Iroshnikov, 1965 ; Kraichnan, 1965) a teoriei clasice a turbulenței din fluidele neutre, bazată pe principiul self-similarității a lui Kolmogorov, succesul acestui model de turbulență este limitat.

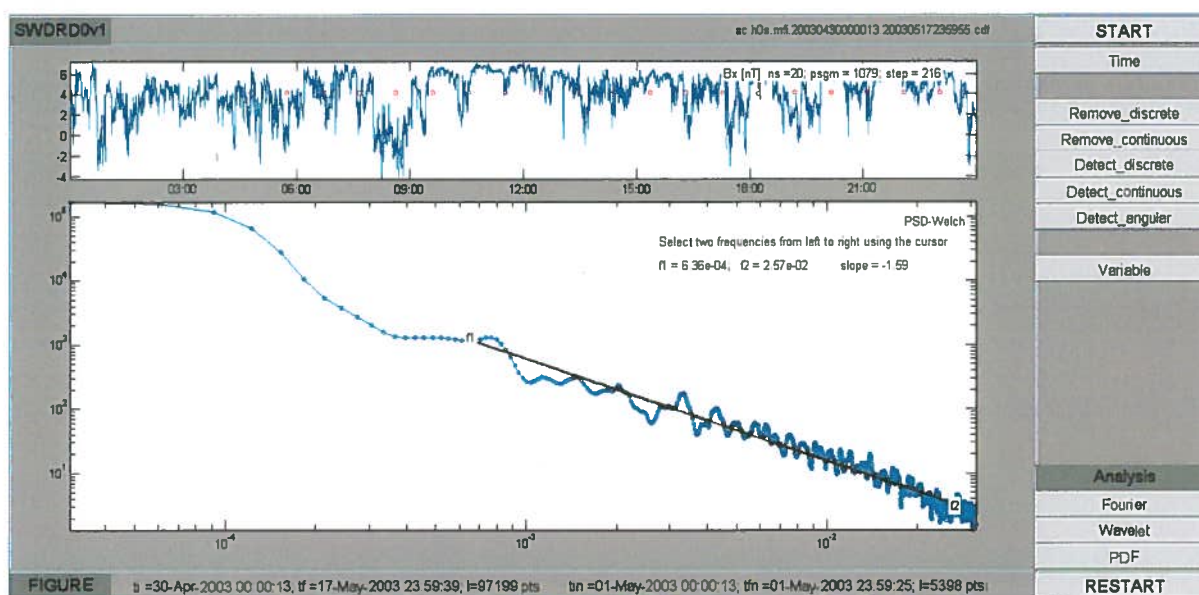


Figura 5. (a) componenta Bx a câmpului magnetic interplanetar în 01-05-2003, în timpul unui eveniment de tip CIR la frontiera magnetosferei terestre ; (b) Spectrul de putere a componentei Bx a câmpului magnetic interplanetar (o analiză similară a fost efectuată asupra celorlalte componente) pentru un interval de timp în care procedura automată a detectat 34 de discontinuități magnetice. De notat valoare indicelui spectral, 1.59 relativ apropiat de indicele Kolmogorovian, $5/3$. Figura este un instantaneu din interfața grafică realizată în proiectul TIMESS pentru analiza discontinuităților.

În plasmă necolizionale nu există un consens privind mecanismul de disipare (e.g. atenuare Landau, unde Alfvén cinetică) și nici privind mecanismele prin care se realizează transferul de energie, dispersia undelor sau interacția între structuri coerente. În ultimii ani au fost aduse argumente în favoarea ambelor mecanisme. Un model integrator este cel al complexității, sursă a unei stări de neechilibru similară criticalității din tranzițiile critice de fază (Chang, 2009) în care structurile coerente acoperă un domeniu extrem de larg de fenomene în plasmă. Structurile coerente (turbioane, structuri de pseudoechilibru, foi de curent, etc) interacționează într-un domeniu larg de scale spațio-temporale iar intermitența este o manifestare a proceselor dinamice prin care sistemul ajunge la o stare de echilibru în sens statistic. Discontinuitățile pot reprezenta zonele de interfață între astfel de structuri coerente implicate în procesul turbulenței intermitente. În acest caz discontinuitățile sunt regiuni în care înregistrăm o rată intermitentă a transferului de energie. Ne propunem să utilizăm datele experimentale privind discontinuitățile disponibile în cadrul proiectului pentru a explora aceste procese fundamentale pentru turbulența intermitentă.

Pentru început am calculat spectrul PSD al seriilor temporale înregistrate de magnetometrul de la bordul satelitului ACE. Un exemplu este inserat în figura 5. Intervalul de timp considerat conține un număr semnificativ de discontinuități magnetice (aproximativ 30). Indicele spectral obținut (1.59) este apropiat de indicele Kolmogorov ($5/3$). Rezultate similare se obțin și pentru celelalte componente și pentru intensitatea câmpului magnetic. Pentru a cuantifica efectul discontinuităților asupra turbulenței și intermitenței am imaginat o procedură care selecționează din ansamblul de discontinuități pe acelea care au o contribuție intermitentă. Procedura constă în calculul unui indice cantitativ al intermitenței,

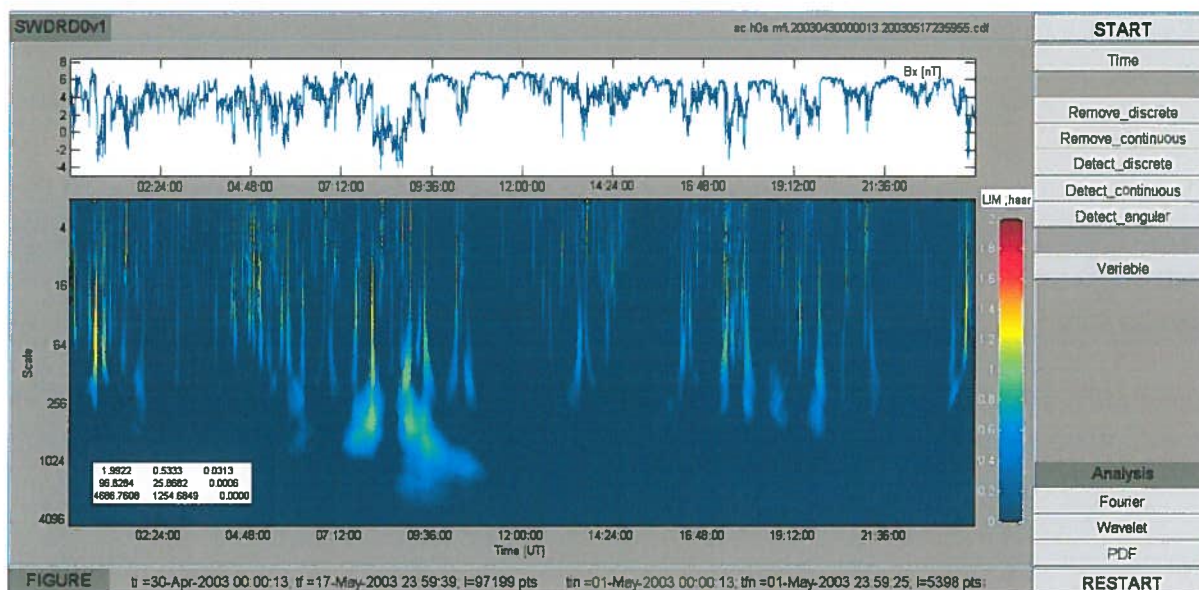


Figura 6. (a) componenta B_x a câmpului magnetic interplanetar în 01-05-2003, în timpul unui eveniment de tip CIR la frontiera magnetosferei terestre ; (b) Spectrul LIM obținut în baza wavelet Haar. Evenimentele intermitente sunt identificate în LIM în regiunile de discontinuitate. Figura este un instantaneu din interfața grafică realizată în proiectul TIMESS pentru analiza discontinuităților.

măsura locală a intermitenței (Local Intermittency Measure – LIM, Farge, 1992), obținut din reprezentarea wavelet a seriilor temporale. Exemplificăm această procedură pentru componenta B_x a câmpului magnetic interplanetar. LIM se obține din reprezentarea wavelet (2) a semnalului magnetic prin normalizarea pătratului coeficienților wavelet la media temporală corespunzătoare fiecărei scale :

$$LIM(\tau, t) = \frac{|C(\tau, t)|^2}{\langle |C(\tau, t)|^2 \rangle}$$

unde $C(\tau, t)$ este spectrul wavelet al semnalului. Evenimentele/discontinuitățile care contribuie la intermitență sunt identificate din spectrul LIM, și corespund acelor intervale de timp și scale pentru care LIM este mai mare decât un prag a cărui valoare depinde de proprietățile semnalului analizat. În figura 6 ilustrăm spectrul LIM al componentei B_x măsurată de satelitul ACE în 01-05-2003, în timpul unui eveniment de tip CIR. Datele analizate corespund regiunii din aval CIR, i.e. zonei de vânt solar lent. Spectrul LIM este obținut în baza de funcții wavelet de tip Haar.

Pentru a cuantifica efectul discontinuităților asupra turbulenței și intermitenței specifice CIR am izolat acele evenimente cu LIM mai mare decât un prag L_0 . Coeficienților wavelet corespunzători scalelor și momentelor de timp pentru care $LIM > L_0$ li s-a atribuit valoarea nulă. Semnalul a fost reconstruit din suma coeficienților wavelet rămași nenuli. Astfel am eliminat din semnal discontinuitățile cu un rol important în dezvoltarea intermitenței. O procedură asemănătoare a fost intitulată de Bruno et al. (2001) procedura « limes ». Rezultatul obținut este ilustrat în figura 7

Efectul discontinuităților asupra proprietăților turbulenței și intermitenței a fost evaluat prin recalcularea spectrului PSD și a densităților de probabilitate (PDF) pentru semnalul filtrat («Limes», Bruno et al., 2001), după cum prezentăm în figura 8, respectiv 9a și b. PDF au fost calculate pentru o versiune preprocesată a semnalului : s-a extras media și s-a împărțit la varianță.

Indicele spectral al componentei B_x în cazul analizat a scăzut de la 1.59 la 1.24, dar puterea totală a rămas în limitele aceluiași ordin de mărime. Această tendință pare să se reproducă și pentru celelalte componente. Implicațiile pentru turbulență sunt încă neclare și vom continua să investigăm aceste aspecte.

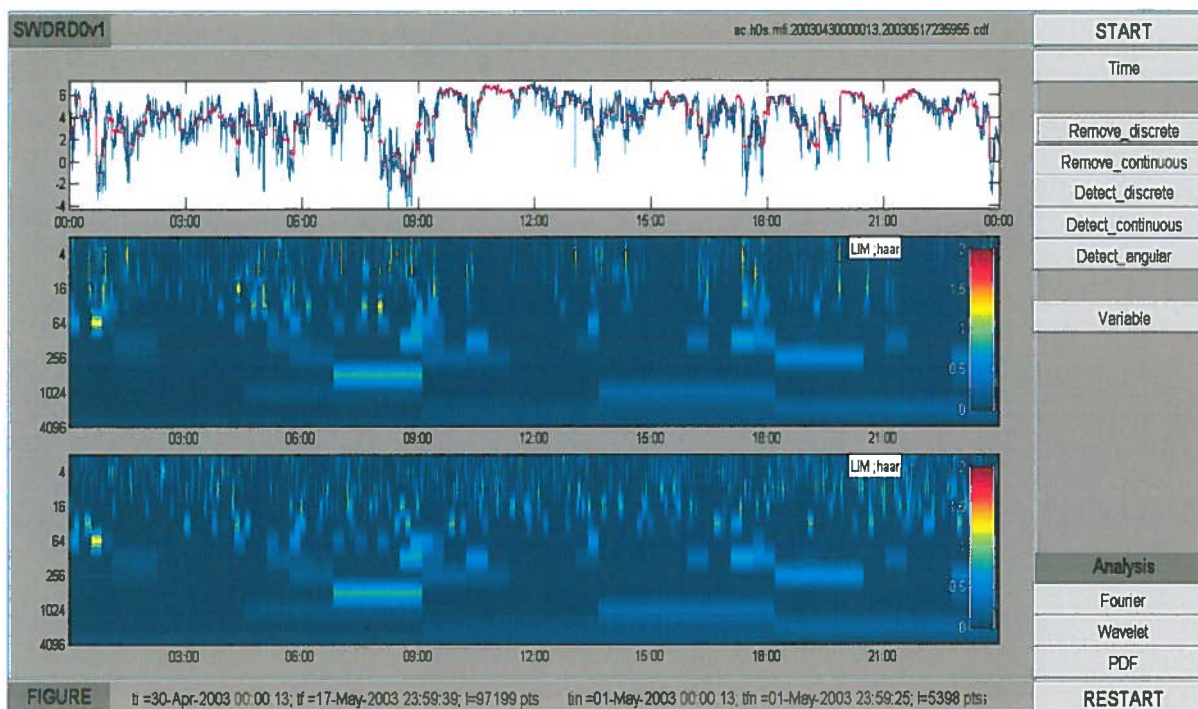


Figura 7. (a) componenta Bx a câmpului magnetic interplanetar în 01-05-2003, în timpul unui eveniment de tip CIR din vântul solar, la frontiera magnetosferei terestre; profilul albastru reprezintă semnalul original, profilul roșu reprezintă semnalul filtrat, i.e. din care au fost eliminate discontinuitățile active din punct de vedere al intermitenței, reconstruit din spectrul wavelet original din care au fost anulați acei coeficienți ce depășesc valoarea de prag a LIM; (b) Spectrul LIM obținut în baza wavelet Haar pentru semnalul original; (c) Spectrul LIM obținut în baza wavelet Haar pentru semnalul din care au fost eliminate discontinuitățile ce contribuie la LIM (profilul roșu din panelul a). Figura este un instantaneu din interfața grafică realizată în proiectul TIMESS pentru analiza discontinuităților.

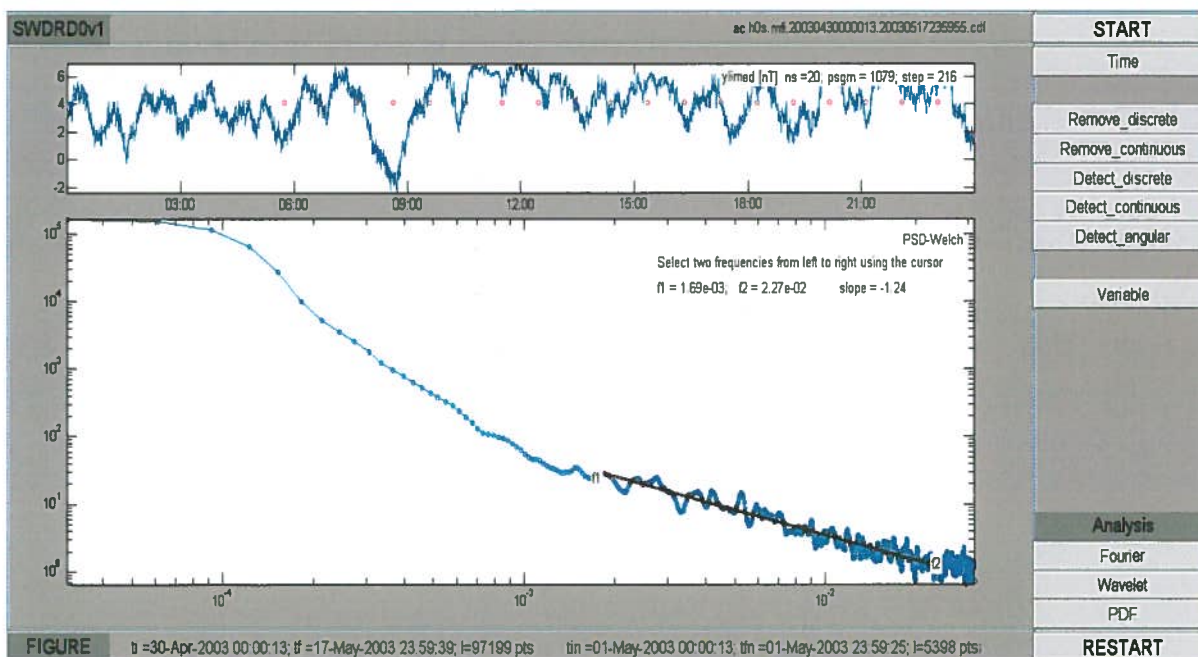


Figura 8. (a) componenta Bx a câmpului magnetic interplanetar în 01-05-2003, în timpul unui eveniment de tip CIR la frontiera magnetosferei terestre după eliminarea discontinuităților cu metoda Limed; (b) Spectrul de putere a componentei Bx din care au fost eliminate discontinuitățile. De notat valoare indicelui spectral, 1.24 diferit de indicele original și spectrul Kolmogorov. Figura este un instantaneu din interfața grafică realizată în proiectul TIMESS pentru analiza discontinuităților.

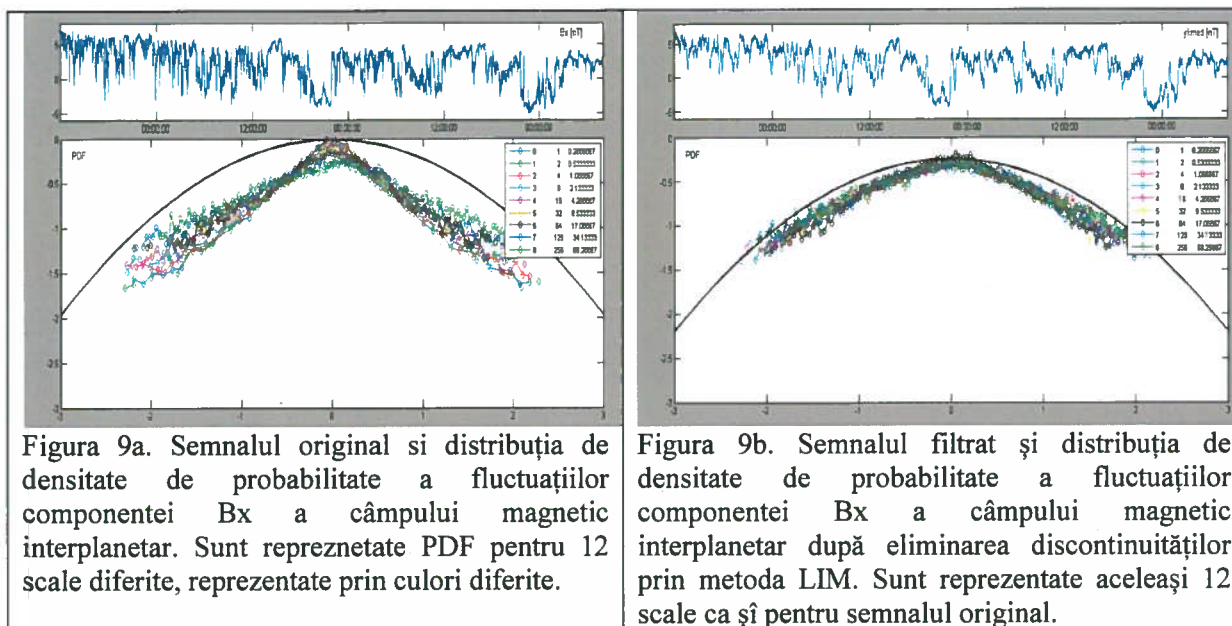


Figura 9a. Semnalul original și distribuția de densitate de probabilitate a fluctuațiilor componentei Bx a câmpului magnetic interplanetar. Sunt reprezentate PDF pentru 12 scale diferite, reprezentate prin culori diferite.

Figura 9b. Semnalul filtrat și distribuția de densitate de probabilitate a fluctuațiilor componentei Bx a câmpului magnetic interplanetar după eliminarea discontinuităților prin metoda LIM. Sunt reprezentate aceleași 12 scale ca și pentru semnalul original.

Funcția de distribuție de probabilitate (PDF) a fluctuațiilor componentei Bx a câmpului magnetic interplanetar este limitată la o regiune centrală, $\pm 2\sigma$, datorită eșantionării la 16 secunde și deci numărului redus de eșantioane. Cu toate acestea se observă caracterul leptokurtik (formarea unor aripi negausiene) al distribuțiilor de probabilitate și faptul că PDF-urile nu au colapsat pe o curbă master, un indiciu al prezenței intermitenței (Figura 9a). După eliminarea contribuției discontinuităților din semnal prin metoda « Limed » PDF pentru același domeniu de scale are un caracter diferit. Toate curbele au colapsat pe o singură curbă, deși aceasta își păstrează caracterul negausian. Este un caz interesant pe care îl vom investiga în continuare și-l vom pune într-un context mai general al turbulenței și intermitenței în vântul solar.

Referințe

1. Borovsky, J E.; Denton, M H., Solar wind turbulence and shear: A superposed-epoch analysis of corotating interaction regions at 1 AU, Journal of Geophysical Research, Volume 115, Issue A10, CiteID A10101, 2010
2. Munteanu, C.; Haaland, S.; Mailyan, B.; Echim, M.; Mursula, K., Propagation delay of solar wind discontinuities: Comparing different methods and evaluating the effect of wavelet denoising, Journal of Geophysical Research: Space Physics, Volume 118, Issue 7, pp. 3985-3994, 2013
3. Farge, M., Wavelet transforms and their applications to turbulence, Annual Review of Fluid Mechanics. Vol. 24 p. 395-457, 1992.
4. Iroshnikov, P. S., Turbulence of a Conducting Fluid in a Strong Magnetic Field, Soviet Astronomy, Vol. 7, p.566, 1964
5. Kraichnan, R. H., Inertial-Range Spectrum of Hydromagnetic Turbulence, Physics of Fluids, Vol. 8, p.1385-1387, 1965
6. Chang, T., Encyclopedia of Complexity and Systems Science, Springer, 2009
7. Bruno, R.; Carbone, V.; Veltri, P.; Pietropaolo, E.; Bavassano, B., Identifying intermittency events in the solar wind, Planetary and Space Science, Volume 49, Issue 12, p. 1201-1210, 2001

Director de Proiect

Dr. Marius Echim