

Kvantitatívna charakteristika slnečnej cykličnosti

L. Pastorek, Slovenská ústredná hviezdáreň, Hurbanovo

Z.Vörös, Geofyzikálny ústav SAV, Hurbanovo a Space Research Institute AAS,
Graz, Austria

Abstrakt

Použitím nelineárnych metód (metóda rekurentných polí - RQA, Hölderova analýza, Waveletova analýza) sú študované vysokofrekvenčné fluktuácie prítomné v dlhodobom časovom rade slnečných škvrn. Analýza 150 ročného časového radu denných hodnôt Wolfovho relatívneho čísla slnečných škvrn pomocou spomenutých metód ukazuje na energetickú väzbu medzi 11 ročnou cykličnosťou tohto radu a fluktuáciami na nižších periódach.

1. ÚVOD

Najznámejším dynamickým prejavom slnečnej aktivity je kváziperiodický výskyt slnečných škvrn, charakterizovaný Wolfom zavedeným relatívnym číslom. Perióda a maximálna amplitúda tohto dlhodobého časového radu však vykazujú istú variabilitu, ktorá je pravdepodobne spojená s nelinearitou procesov odohrávajúcich sa v konvektívnej zóne. Pozoruhodné je napríklad tzv. Maunderovo minimum medzi rokmi 1645 a 1715. Dlhodobé variácie s periódami okolo 80 až 90, 210 a 2400 rokov boli identifikované na základe meraní množstva izotopu C14 v sedimentoch a v atmosfére Zeme (Vos et al., 1996; Hood and Jirikovic, 1990). Avšak ani základná 11/22 ročná perióda nie je úplne vysvetlovateľná na základe teórie slnečného dynama. V teórii dynama dôležitú úlohu zohráva premenlivý charakter magnetohydrodynamickej (MHD) turbulencie v konvektívnej zóne. Závažnou otázkou v týchto modeloch zostáva príliš veľký pomer (>100) medzi priemernou periodou slnečnej aktivity a korelačnou dobou typickou pre MHD turbulenciu v konvektívnej zóne (Rüdiger and Arlt). Je zrejme že tieto procesy, prebiehajúce na veľmi rozdielnych časových škálach, môže vysvetliť len nelineárna teória dynama. Otmianowska et al. (1997) navrhli takýto nelineárny model, v ktorom nestacionárne parametre slnečného dynama boli spájané s turbulenciou plazmových procesov v konvektívnej zóne. Modely zohľadňujúce turbulentné pohyby plazmy okrem vysvetlenia základnej periodičnosti vysvetľujú aj jej pozorovanú variabilitu, a predpovedajú tiež aj výskyt magnetických fluktuácií s periodou okolo 8 rokov alebo s komplikovanejším časovým priebehom so spojitým Fourierovým spektrom.

Pri použití 150 ročného časového radu denných hodnôt Wolfovho relatívneho čísla slnečných škvrn (WRC), v tejto práci analyzujeme vysokofrekvenčné fluktuácie, ktoré môžu súvisieť s turbulentným pohybom plazmy v konvektívnej zóne. Za týmto účelom

aplikujeme nelineárne metódy, ktoré boli úspešne použité pri analýze nelineárnych systémov alebo turbulencie. Naším cieľom je nájsť súvis medzi dlhoperiodickým slnečným cyklom a krátkoperiodickými fluktuáciami. Waveletova analýza časového radu WRC v časovo-frekvenčnej rovine totiž ukazuje na výraznú aktivitu pri nižších periódach, koreľujúcu s vysokými amplitúdami 11 ročného cyklu.

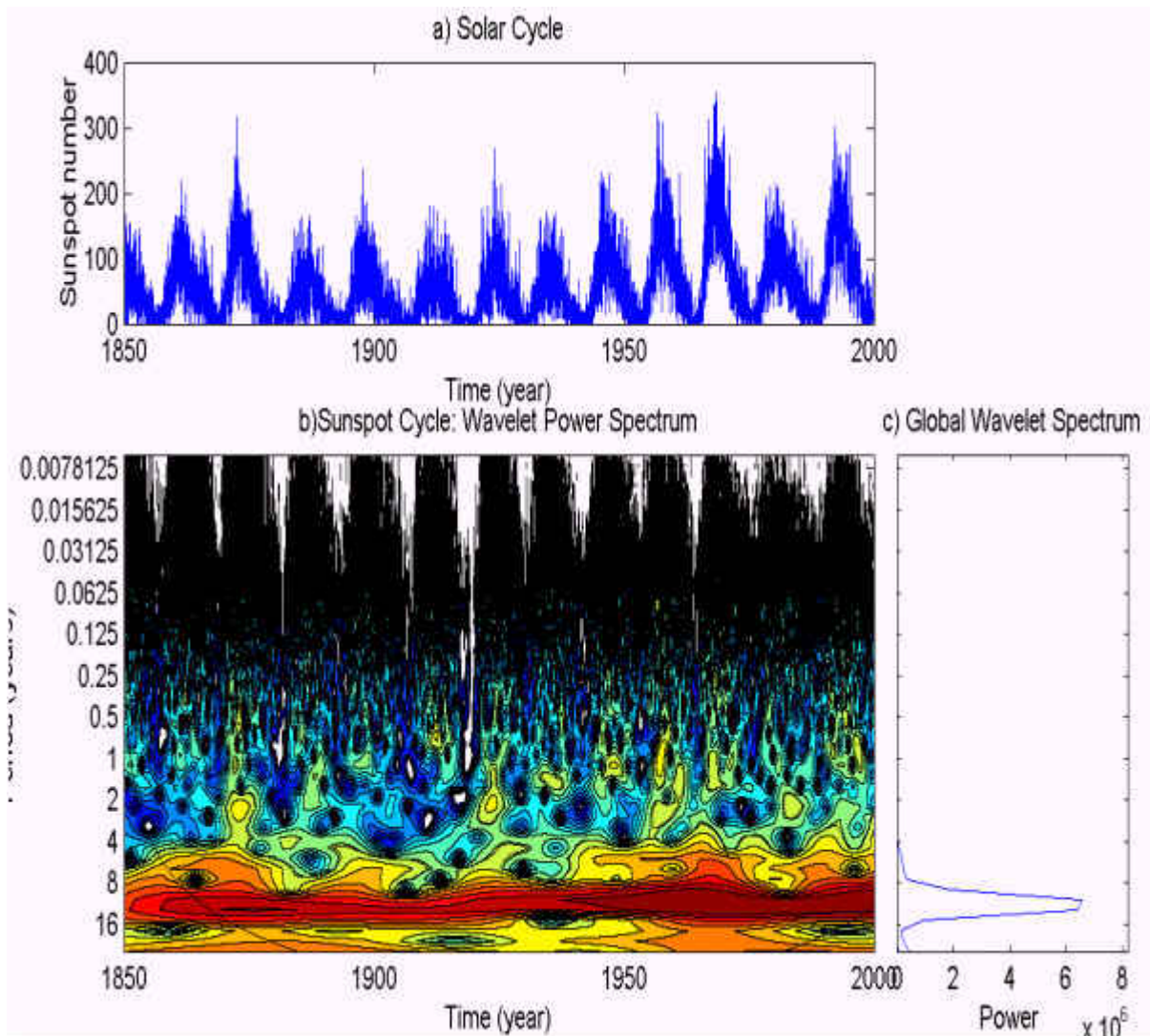
2. WAVELETOVA (VLNKOVÁ) ANALÝZA (WA)

Pri hľadaní rôznych frekvencií, prítomných v nejakom časovom rade (signále) sa obyčajne používa Fourierova analýza (FA). Signál sa pritom porovnáva so sinusovkou danej frekvencie a pri vysokej korelácii je prítomnosť danej frekvencie v signále potvrdená. Ak sú v signále prítomné dve charakteristické frekvencie FA ich ukáže ale nedokáže ich v čase lokalizovať. Tento nedostatok sa snaží odstrániť FA v okne šírky T , ktoré sa posúva v čase t . Avšak pri multifrekvenčnom (škálovanom) signále ani tá nedokáže rozoznať všetky frekvenčné zložky optimálne. Príčinou toho je to, že sinusovky nie sú lokalizované v čase ale sú definované na intervale $(-\infty, \infty)$. Riešením sú lokalizované wavelety (vlnky), ktoré sú definované na časovom intervale (t_1, t_2) s istými matematickými vlastnosťami. Základná vlnka Ψ je takisto porovnávaná so signálom ako sinusovka, ale možno ju roziahnuť a posúvať v čase. Výsledkom je rozdelenie (reprezentácia) signálu v časovo-škálovej rovine. Vlnkovú transformáciu funkcie $f(t)$ možno matematicky vyjadriť nasledovne (Chui 1992):

$$Wf(\lambda, t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(u) \lambda^{-1/2} \psi[(u-t)/\lambda] du$$

kde $\lambda > 0$ je škálový parameter, t je lokalizačný parameter a $\Psi_{\lambda,t}(u)$ je zvolená vlnka určitých vlastností. My sme použili tzv. Morletov wavelet (vlnka), daný vťahom:

$$\Psi(t) = \exp(-t^2/2) \cos(5t)$$



Obr. 1 a) Wolfovo číslo slnečných škvŕn, b) vlnkové spektrum WRČ, c) celkové vlnkové spektrum

Jeho algoritmus navrhli Torrence and Compo (1998). Túto WA sme aplikovali na dlhodobý časový chod denných hodnôt WRČ. Výsledok je znázornený na obr.1. Obr. 1a ukazuje denný chod WRČ od r. 1850 do r. 2000. Odpovedajúca waveletova časovo – škálová reprezentácia je znázornená na obr. 1b, kým obr. 1c, ukazuje celkové vlnkové spektrum s výrazným píkom okolo 11 rokov. Tomuto 11 ročnému slnečnému cyklu odpovedá na spodku b obrázku sa tiahnuca silná tmavá čiara. Čiže vlnkové spektrum nám v časovo-periodickej rovine znázorňuje slnečný cyklus. Ukazuje nám, či v nejakom danom čase (os x) jednotlivé periódny (os y), obsiahnuté v časovom rade akú aktivitu vykazujú. V hornej časti obrázku pri najmenších periódach nevidieť žiadne štruktúry. V páse medzi 1 až 8 rokov vidíme rôzne štruktúry. Tam kde je amplitúda 11 ročného slnečného cyklu na obr. a vyššia, tam je aj na obr. b vyššia štruktúracia pri 1-8 ročných periódach. Naopak pri nižších amplitúdach je na škále 1-8 r. nižšia aktivita. Čiže medzi maloškálovými fluktuáciami (vysoká frekvencia) a dlhými periódami (slnečný cyklus) môže byť

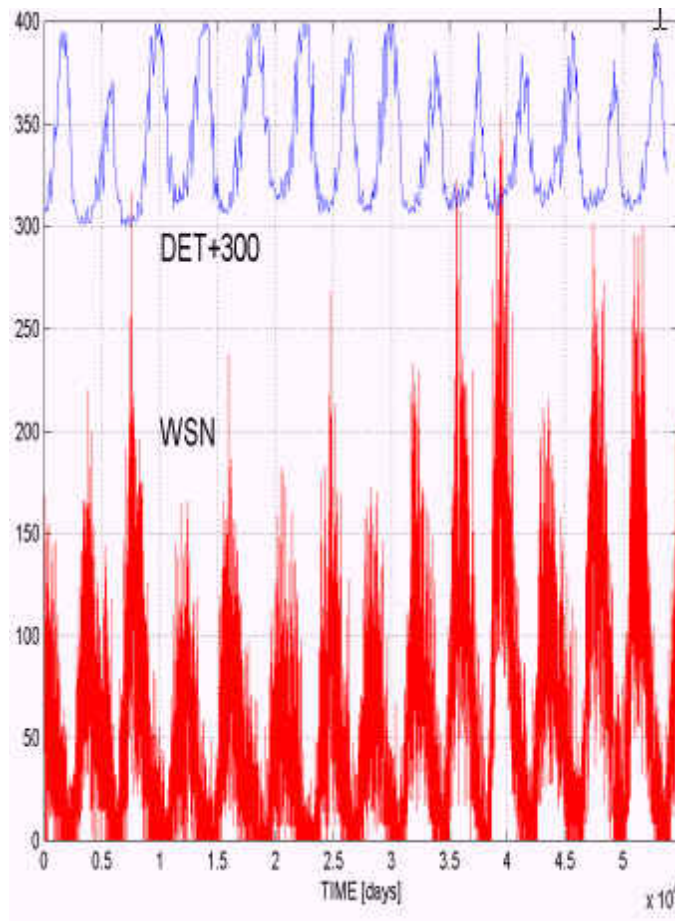
energetické prepojenie. Preto sa oplatí analyzovať ich vzájomný vzťah.

3. CHARAKTERISTIKA FLUKTUÁCIÍ

Na vlastnú charakteristiku fluktuácií na nižších periódach sme použili matematické metódy tzv. rekurenčných polí – RQA (Recurrence Quantification Analysis) a Hölderovu analýzu, ktorých výpočet bol urobený na rovnakej frekvenčnej škále.

A. Metóda RQA.

Táto nelineárna metóda umožňuje projekciu jednodimenzionálneho časového radu WRČ do viacdimeznionálneho priestoru stavov. Výsledkom sú rôzne štatistické parametre, charakterizujúce skúmaný systém, % recurrence (REC), % determinism (DET) a iné, umožňujúce identifikáciu rôznych časových štruktúr, periodičnosti, predpovedateľnosti systémového stavu alebo jeho zmien, fázových prechodov a nestability systému. Popis metódy aj prvé výsledky sú publikované v práci Pastorek, Vörös (2000). Tu sa nám ešte nepodarilo vybrať riadiace parametre (časové posunutie, šírka okna



Obr. 2 Determinizmus (posunutý o 300) odhadnutý na základe rekurenčných polí (hore) z denných hodnôt Wolfovho čísla slnečných škvŕn (dole) za roky 1850 - 2000

a jeho posun), čo je dôležité pre úspešnosť metódy, celkom optimálne. Toto je dôležité aj pri výpočte Hölderovho parametra. Tieto výpočty a výsledky WA nám pomohli optimalizovať riadiace parametre RQA tak aby reprodukovany viacdimenzionálny priestor stavov čo najviac odrážal dynamiku reálnych procesov. Časový chod rekurenčnej krivky DET je znázornený na obr. č. 2. Vidíme, že jej chod je v antikorelácii s chodom WRČ. Ukazuje, že na periódach 0,5 – 8 r. determinizmus dynamiky klesá (nestabilita).

B. Hölderova analýza

Energiu signálu akumulovanú v okne w šírky $(t_i - W, t_i)$ môžeme matematicky vyjadriť nasledovne

$$E(t_i, W) = \sum_{i-W}^i \delta X^2(t_i); i = 1, 2, \dots, N$$

kde $X(t_i)$ je amplitúda časového radu (signálu) a N je počet všetkých údajov radu a $\delta X(t_i) = X(t_i + T) - X(t_i)$. Hölderov parameter potom môžeme určiť regresnou metódou podľa vzťahu

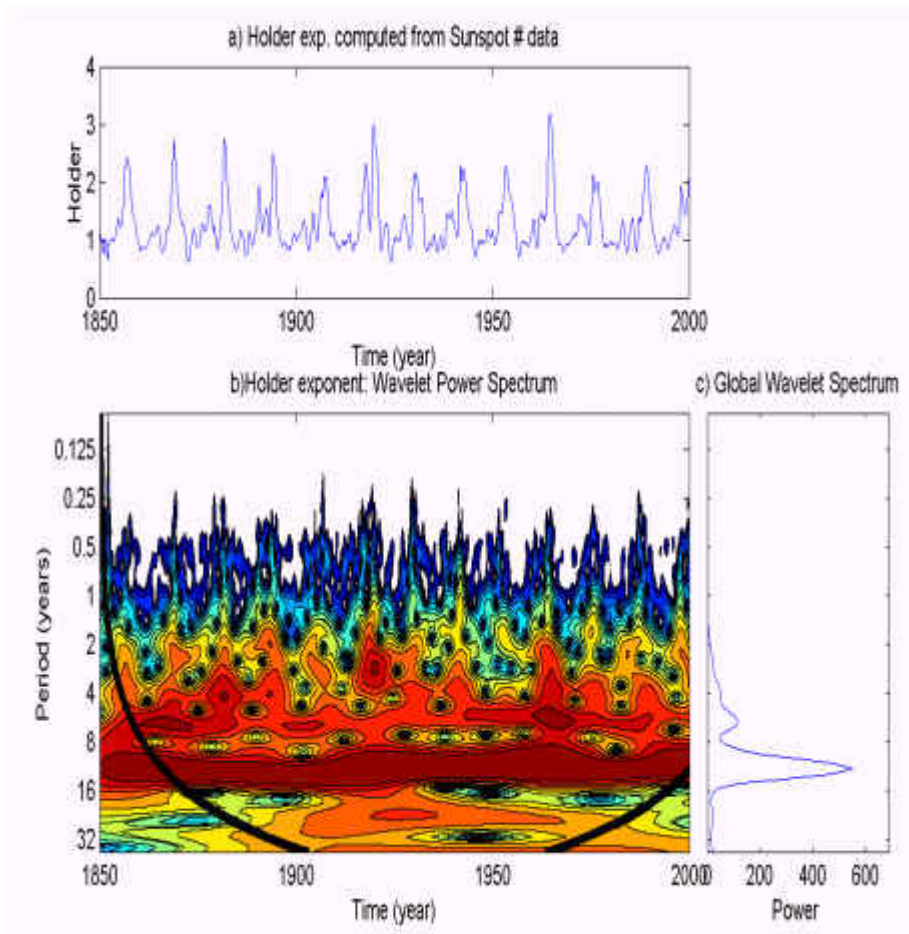
$$\alpha(t_i, W) = \log E(t_i, W) / \log W$$

Posúvaním okna w po časovom rade (podobne ako pri RQA) dostávame jednotlivé hodnoty parametra α a

zároveň aj informáciu o rozdelení energie signálu. Je zrejmé, že ak $\alpha = 1$ energia signálu je homogénne rozdelená. Keď $\alpha \neq 1$ energia je nehomogénne rozdelená v čase. Hodnote $\alpha > 1$ odpovedá stabilný stav, a v prípade, keď $\alpha < 1$ ide o nestabilnú systémovú dynamiku. Časový chod parametra α je znázornený na obr. 3a. Podobne ako pri rekurentnej krivke DET aj v tomto prípade je zrejماً vzájomná antikorelácia s chodom WRČ.

4. VLNKOVÁ ANALÝZA HÖLDEROVHO PARAMETRA A DISKUSIA VÝSLEDKOV

Metódu WA sme aplikovali na časový chod parametra α , ktorý bol vypočítaný z denných hodnôt WRČ. Výsledok je znázornený na obr. 3. Jednotlivé časti obr. 3 ukazujú v podstate to isté ako časti a,b,c obr.1, iba obr. 3a ukazuje parameter α vypočítaný z WRČ na obr.1a. Na obr. 3b je znázornené vlnkové spektrum parametra α ukazujúce jeho zmeny v časovo-frekvenčnej rovine. V tomto prípade však (narozdiel od obr.1b) je pri rozsahu periód 1 – 8 rokov taká výrazná aktivita, že na vedľajšom c obrázku je popri jedenásťročnom cykle aj ďalší menší pík. Keď porovnáme túto



Obr. 3 Vlnková analýza Hölderovho parametra

aktivitu s amplitúdami WRČ vidíme medzi nimi podobné súvislosti aké sme diskutovali v prípade obr. 1a a 1b. Čiže môžeme skonštatovať, že medzi malými škálami (fluktuácie na nižších periódach) a vyššími škálami (jedenásť ročný cyklus alebo jeho amplitúda) je energetická väzba. Teda slnečný cyklus je pravdepodobne modulovaný aktivitou na rozsahu 1 – 8 rokov, ktorá môže súvisieť s turbulenciou a nestabilnou dynamikou systému v konvektívnej zóne. Rekurenčné krivky totiž ukazujú, že pri periódach 1 – 8 rokov determinizmus dynamiky klesá (nestabilita) a Hölderov parameter ukazuje v rovnakom čase a periódach na nehomogénne rozdelenie energie signálu. Tieto ukazovatele dynamiky slnečnej cykličnosti by mali byť zohľadnené pri modeloch nelineárneho dynamika.

POĎAKOVANIE

Práca bola čiastočne realizovaná v rámci projektu VEGA č. 2009/22.

LITERATÚRA

- Chui, Ch.K., An introduction to wavelets, Academic Press, 1992
- Pastorek, L., Vörös, Z., Nelineárna analýza variability dlhodobého časového chodu Wolfvho relatívneho čísla slnečných škvŕn, 15. Celoštátny slnečný seminár, Patince 2000, **81**.
- Hood, L.L., and J.L. Jirikovic, A probable approx. 2400 year solar quasi-cycle in atmospheric delta C-14, In: Climate impact of solar variability, NASA, 1990.
- Otmianowska, M., K.G. Rüdiger, D. Elstner, and R. Arlt, The turbulent EMF as a time series and the „quality“ of dynamo cycles, Geophys. Astrophys. Fluid Dynam., **86**, 229, 1997.
- Rüdiger, K.G., and R. Arlt, Cycle times and magnetic amplitudes in nonlinear 1D $\alpha^2\Omega$ -dynamos, Astron. Astrophys., **316**, L17, 1996.
- Torrence, C., and G.P. Compo, A practical guide to wavelet analysis, Bull. Amer. Meteor. Soc., **79**, 61, 1998.
- Vos, H., J. Kurths, and U. Schwarz, Reconstruction of grand minima of solar activity from radiocarbon data – linear and nonlinear signal analysis, J. Geophys. Res., **101**, 15637, 1996.