

Invariance délek v ionosféře

Petra Šaulí⁽¹⁾, Patrice Abry⁽²⁾, Xavier Cosson⁽²⁾, Stephane Roux⁽²⁾

(1) ÚFA AVČR, Boční II/1401, 14131, Praha 4 – Spořilov, Česká republika

(2) Laboratoire de Physique (UMR5672), CNRS, Ecole Normale Supérieure, Lyon, France

1. Úvod

Geofyzikální data jsou většinou fluktuující signály s velmi výraznou proměnlivostí ve velkém rozpětí period. Proměnlivost systému souvisí jednak s vnějším působením na systém a jednak s jeho vlastní vnitřní nestabilitou. Popis a předpověď chování systému výhradně pomocí základních oscilací systému se jeví jako nedostatečné. Problémy popisu pomocí několika základních frekvencí (period) souvisí s nelineární dynamikou systému, dlouhodobou pamětí, vzájemným překryvem trendů apod., a je tedy nutné využít dalších vlastností studovaného fyzikálního systému. Mnohé časové řady/signály vykazují fraktální strukturu (Mandelbrot, 1985) a právě fraktální dimenze těchto řad často souvisí s jejich fyzikálními vlastnostmi (Wiscombe, 1994). Jako možný se jeví popis systému pomocí indexů „fraktality“. Hledáním těchto parametrů se zabývá „scaling analýza“. Termín „scaling“ označuje existenci mocninného vztahu

$y = AX^\alpha$ mezi určitými studovanými proměnnými, kde α , A jsou konstanty a y , X jsou proměnné. Tento zdánlivě banální vztah se nikdy nevyskytuje v systému náhodně, ale odráží schopnost systému reprodukovat sebe sama na různých časových a prostorových škálách. Nemusí se vždy nutně jednat o systém ve smyslu matematického signálu (obr.1, obr. 2). Oblasti, ve kterých neexistuje žádná význačná charakteristická délka procesu, představují domény „scaling invariance“. Invariance délek poukazuje na důležitou vlastnost systému: soběpodobnost. Soběpodobnost (matematicky se tato vlastnost nazývá invariance vůči změně měřítka) je vlastnost objektu, kdy objekt či jeho část vypadá podobně při pohledu v různém zvětšení. Soběpodobnost je jedním z hlavních znaků fraktálních útvarů. Složitě struktury/procesy nelze popsat jedinou dimenzí, ale je třeba užít celého spektra dimenzí. Takové případy nazýváme multifraktální. Struktura, jejíž spektrum je degenerováno na jedinou hodnotu dimenze, se nazývá monofraktální. Multifraktální chování přírodních signálů můžeme přičíst vlivu dvou a více různých procesů vedoucích k formování dané struktury. Každý z procesů může

ovlivnit charakteristiku struktury svým vlastním způsobem. Teoreticky tedy vzniká možnost na základě multifraktální povahy stanovit, který proces a do jaké míry se mohl uplatnit na formování signálu a jaký má ten který proces vliv na jeho uspořádání (Mandelbrot, 1985).



(S laskavým svolením Dr. P.Flandrina)

Obr. 1: Soběpodobný systém se třemi úrovněmi.



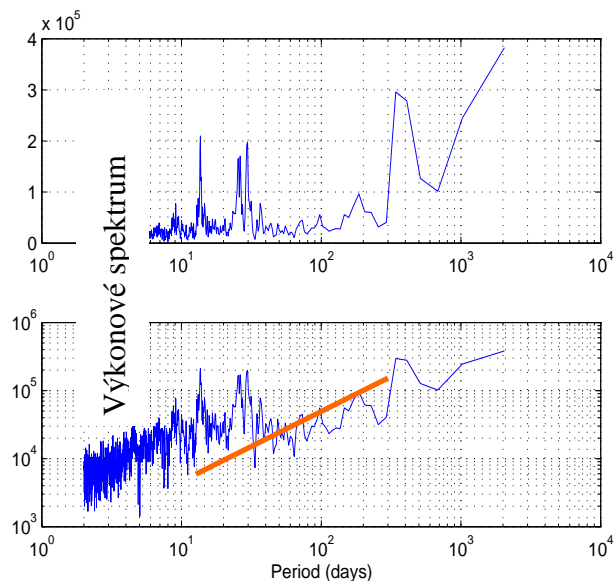
Obr. 2: Soběpodobný systém se šesti úrovněmi.

2. Scaling analýza

„Scaling“ analýza je zaměřena na nalezení vazby v systému, mechanismu větvení, kaskády spíše než na nalezení význačné délky některého z formujících procesů. Cílem analýzy je tedy nalézt „scaling“ exponenty, stanovit strukturu signálu (monofraktální, multifraktální) a vhodný model popisující chování systému. O charakteru dané časové řady $\{X(t), t \in R\}$ vypovídá chování jejich statistických momentů $\langle |X(t)|^q \rangle$. K jejich odhadu je výhodné využít waveletovou

transformaci, protože koeficienty transformace tvoří stacionární sekvence, sekvence krátkodobých závislostí s krátkou pamětí a **PŘESNĚ REPRODUKUJÍ** „**SCALING**“ vlastnosti analyzovaného systému, přestože původní systém může být nestacionární se vzájemným překryvem trendů a dlouhou pamětí (Abry et al., 2000; Chainais, 2000; Lashermes, 2005).

Potenciální oblasti s fraktální strukturou jsou takové, kde platí mocninný vztah (1). Na obrázku 3 je znázorněno výkonové spektrum (Fourierova transformace) AE indexu (Auroral Electrojet). Oblast period 1 den – 60 dní vykazuje přibližně mocninný vztah mezi periodou a výkonovým spektrem. Jedná se o oblast, kterou je možné charakterizovat pomocí



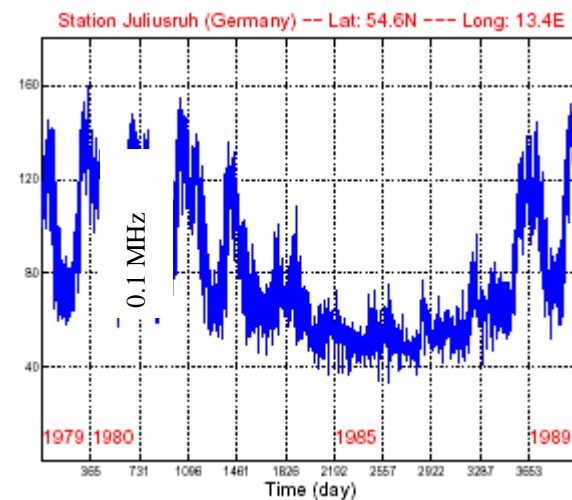
Obr.3.: Výkonové spektrum AE indexu. Analyzované období 1957-2003.

3. Ionosféra a fraktální struktura

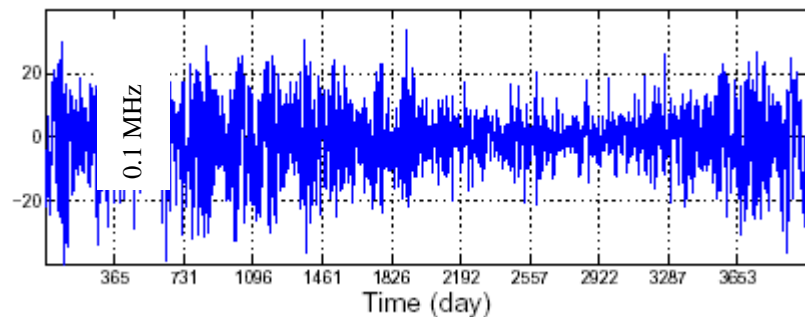
„Scaling“ analýza je velice náročná na délku časových řad a také na jejich kvalitu (chybějící data, přesun měřící stanice apod.). Většina dostupných pozemních měření začíná v roce 1957-1958 (Mezinárodní geofyzikální rok), satelitní měření jsou záležitostí posledního výzkumu. „Scaling“ analýza byla úspěšně použita pro studium slunečního větru a chování magnetosféry. Většina prací se soustřeďuje na oblast period do několika hodin. Nejčastěji analyzovaným parametrem je již zmíněný AE index (Consolini and De Michelis, 2005; Consolini and Marcucci, 1997; Freeman et al., 2000; Price and Newman, 2001; Watkins, 2002 a další). Hlavním projevem interakce mezi slunečním větrem, magnetosférou

a následně ionosférou jsou magnetické bouře, které reprezentují globální odezvu systému na změnu podmínek ve slunečním větru. Výsledky Consolini et al., 1996 a Consolini and De Michelis, 2005 odhalily část fluktuací AU a AL indexu (složky AE indexu), které přímo odrážejí fluktuace slunečního větru. Práce Uritsky et al. (2001) ukazuje, že sluneční vítr má odlišnou fraktální strukturu a neřídí dynamiku magnetosféry (AE index) pro periody kratší než 3.5 hodiny. Srovnání fraktálních vlastností meziplanetárního magnetického pole mimo magnetopauzu a magnetického pole v magnetickém ohonu ukazuje, že magnetické pole snižuje turbulenci ve slunečním větru a tím pádem dochází k redukci fraktální dimenze měřeného magnetického pole (Kabin and Papitashvili, 1998)

Při analýze chování ionosféry jsme použili časové řady geomagnetických indexů (Dst, Kp, AE), slunečních indexů (SSN, solar flux F10.7) a kritických frekvencí vrstvy F (foF2). Studovali jsme variabilitu časových řad popisujících sluneční aktivitu a jak se tato variabilita projevuje v signálech popisujících geomagnetické pole. Hledali jsme domény s podobnou fraktální strukturou od slunečních indexů až po kritické frekvence ve vrstvě F2. Obrázek 4 ukazuje průběh denních poledních hodnot foF2 ze stanice Juliusruh během období 1979-1989. Časovou řadu (obr.5) vhodnou pro „scaling“ analýzu jsme získali odfiltrováním známých vlivů (sluneční cyklus, roční chod) z původní časové řady.



Obr.4: Denní hodnoty foF2 (medián hodnot v intervalu 10 UT – 14 UT) zaznamenané na stanici Juliusruh.



Obr.5: Časová řada foF2 po odfiltrování známých složek variability (sluneční cyklus atd.).

Analýza scaling exponentů pro jednotlivé stanice ukazuje, že kritické frekvence foF2 mají obecně multifraktální strukturu (Juliusruh, Poitiers, Průhonice, Rome, Slough, Uppsala). Fraktální struktura řady foF2 ze severní stanice v polární oblasti (Lycsele) se blíží monofraktální, což může souviset se vstupem částic slunečního větru do zemské magnetosféry v polárních oblastech (Šauli et al., 2005). Stejnou doménu invariance délek v intervalu 2 – 16 dní jsme našli jak v časových řadách geomagnetických indexů tak i slunečního záření F10.7. Časové řady geomagnetických indexů (Dst, Kp, AE) a slunečních indexů (SSN, solar flux F10.7) mají stejnou monofraktální strukturu. Šířková závislost fraktální struktury signálů je předmětem našeho dalšího studia.

4. Závěr

Ionosféra jako součást zemské atmosféry představuje důležitou oblast vazby mezi neutrální atmosférou a magnetosférou. Stav ionosféry je především ovlivňován sluneční a geomagnetickou aktivitou. Vliv dolních vrstev atmosféry je ovšem nezanedbatelný a to především díky přenosu energie vzhůru pomocí gravitačních, přílivových a planetárních vln. Ionosféra je variabilní na široké škále period, které zahrnují jak krátkodobé oscilace s minutovými periodami (např. TID) tak i dlouhodobé změny (sluneční cyklus, sekulární geomagnetické variace). Systém ionosféry je velice komplikovaný a vzhledem ke zmíněným vnějším vlivům je velice obtížné předpovídat jeho chování. Popis systému pomocí „scaling“ exponentů tak představuje možnost zlepšení ionosférických předpovědí.

Poděkování: Práce vznikla za podpory projektu 205/06/1619 Grantové agentury České republiky.

Reference

- Abry, P., Flandrin, P., Taqqu, M.S., Veitch, D., 2000. Wavelets for the analysis, estimation and synthesis of scaling data, *Self Similar Network Traffic Analysis and Performance Evaluation*, K. Park and W. Willinger, Eds., Wiley, 39–88.
- Chainais, P., Abry, P., Veitch, D., 2000. Multifractal analysis and alpha-stable processes: A methodological contribution. In *Proc. of the Int. Conf. on Acoust. Speech and Sig. Proc.*
- Consolini, G., De Michelis, P., 2005. Local intermittency measure analysis of AE index: The directly driven and unloading component. *Geophysical Research Letters* 32 (5), Art. No. L05101.
- Consolini, G., Marcucci, M.F., 1997. Multifractal structure and intermittence in the AE index time series. *Nuovo Cimento della Societa Italiana di Fisica C-Geophysics and Space Physics*, 20 (6), 939-949.
- Consolini, G., Marcucci, M.F., Candidi, M., 1996. Multifractal Structure of Auroral Electrojet Index Data. *Physical Review Letters*, 76 (21), 4082-4085.
- Freeman, M.P., Watkins, N.W., Riley, D.J., 2000. Evidence for a solar wind origin of the power law burst lifetime distribution of the AE indices. *Geophysical Research Letters* 27 (8), 1087-1090.
- Kabin, K., Papitashvili, V.O., 1998. Fractal properties of the IMF and the Earth's magnetotail field. *Earth Planets Space*, 50, 87-90.
- Lashermes, B., Jaffard, S., Abry, P., 2005.. Wavelet leader based multifractal analysis. *ICASSP*, 878-897.
- Mandelbrot, B.B., 1985. Self-affine fractals and fractal dimension. *Physica Scripta*: 32, 257-260.
- Price, C.P., Newman, D.E., 2001. Using the R/S statistic to analyze AE data. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 63 (13), 1387-1397.
- Šauli, P., Cosson, X., Abry, P., 2005 Scaling in the Ionosphere-Magnetosphere System? The Second European Space Weather Week, Noordwijk , 14-18 November 2005.
- Uritsky, V.M., Klimas, A.J., Vassiliadis, D., 2001. Comparative study of dynamical critical scaling in the auroral electrojet index versus solar wind fluctuations. *Geophysical Research Letters*, 28 (19), 3809-3812.
- Watkins, N.W., 2002. Scaling in the space climatology of the auroral indices: is SOC the only possible description? *Nonlinear Processes in Geophysics*, 9 (5-6), 389-397.
- Wiscombe, W., Davis, A., Marshak, A., Calahan, R., 1994. Multifractal characterizations of nonstationarity and intermittency in geophysical fields: Observed, retrieved, or simulated. *Journal of Geophysical Research*, 8055-8072.