

References

- [1] DOUCET, A. et al.: Sequential Monte Carlo methods in practice. Springer Verlag, 2001.
- [2] HOFMAN, R., PECHA, P.: Data assimilation of model predictions of long-time evolution of Cs-137 deposition on terrain. In 2008 IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium, Boston, MA, USA, 2008.
- [3] HOFMAN, R., ŠMÍDL, V., PECHA, P.: Data assimilation in early phase of radiation accident using particle filter, In Proceedings of 5th WMO Symposium on Data Assimilation, Melbourne, Australia, 2009.
- [4] OVERCAMP, T. J., FJELD, R. A.: A simple approximation for estimating centerline gamma absorbed dose rates due to a continuous gaussian plume, 1987.
- [5] ROJAS-PALMA, C.: Data assimilation for off site nuclear emergency management. Technical report, SCK-CEN, DAONEM final report, RODOS(RA5)-RE(04)-01, 2005.

Bayesian modeling and prediction of solar particles flux

Kamil DEDECIUS – Jana KALOVÁ, Institut teorie informace a automatizace, Akademie věd České republiky, Praha; Vysoká škola technická a ekonomická, České Budějovice

Deskriptory *INIS*: MATHEMATICAL MODELS; SOLAR ACTIVITY; SOLAR FLARES; SOLAR FLUX; SOLAR PARTICLES

The paper deals with the prediction of the flux of subatomic particles ejected from the upper atmosphere of the Sun. The Bayesian approach to this issue is presented and a method capable of taking available expert knowledge into account is introduced.

1. INTRODUCTION

Besides the spacecraft systems, manned space-flights and launchers, the exposition to space weather has effects on high-altitude air flights, where the penetrating particles must be taken into account as well. The solar particles may pose problems both on human beings and the electronic devices installed in modern airplanes, where the potential malfunctions might be very dangerous. These effects comprise the SEE (Single Event Effects), arising from ionising interactions of the solar particles and leading to both soft errors involving single or multiple bits and hard errors like burn-outs [4].

During the last two decades or so, the researches of the effects of ionisation on aircrew and frequent flyers were undertaken. The increasing awareness of the health risks lead in Europe to Directive 96/29/EURATOM, which specifies the demands posed on the aircraft operators in connection with the exposure to the ionising energy.

In face to this facts, the mathematical modeling of the particles flux becomes still more significant, because it would allow to issue early warnings on its grow and the increase in the health and SEE risks. There already exist several methods, e.g. [5][6][7]. However there still exists a challenge in the prediction of the Solar Energetic Particle (SEP) events, when the flux intensity is significantly higher. We can take advantage of the known physical facts, e.g. that higher intensity solar X-ray flares are more likely accompanied by Coronal Mass Ejection (CME) [3]. Andrews statistical study [1] shows that all the X-class flares (peak burst intensity $I \geq 10^{-4} \text{ Wm}^{-2}$) in

his samples were associated with CME, however it this is not a rule for lower intensities. The hardening of the spectrum is observable approximately one day before the Earth is hit by the intensified solar wind, which allows us to tune the mathematical model to catch the changes in the flux development.

2. BAYESIAN MODEL

For our purpose, the basic underlying model describing the evolution of the particles flux measured by Particle Flux Units (*pfu*, [particles/cm²-s-sr]) is given by the autoregression model

$$pfu_t = \sum_{i=1}^n a_i pfu_{t-i} + k + e_t \quad (1)$$

where the new flux value is expressed as a combination of the values in the previous time instant $t-i$ weighted by model parameters a_i and an absolute term k . The model order n has to be determined to sufficiently catch the evolution of the flux, $n = 2$ seems to be adequate. The autoregressive property of the flux seems to be obvious, because under general conditions and with the exception of SEP events each new value follows from the last data. The fluctuations around the mean value can be interpreted as the noise effect e_t caused e.g. by the sensor contamination and the non-homogeneity of the environment. The noise is often supposed to be white and normally distributed with zero mean and variance σ^2 , $e_t \sim N(0, \sigma^2)$.

The Bayesian methodology employs probability distributions of the model parameters evaluated by mea-

surements, in this case the particles flux. Let's introduce the regression vector in the form $\psi_t = (pfu_{t-1}, \dots, pfu_{t-n}, 1)'$ and the vector of parameters $a = (a_1, \dots, a_n, k)'$. From frequentists statistics it follows that $pfu_t = \psi_t' a + e_t$, but the Bayesian paradigm prefers the form of the conditional probability density function (pdf) inherent to the distribution of the flux $f(pfu_t | d(t-1), a)$. The term $d(t-1)$ denotes the data available in time t (i.e. the history). The pdf says that the actual measurement pfu_t has some distribution, which is influenced by the past measurements $d(t-1)$ and the parameter vector a . For the prediction purposes, the last one needs to be integrated out:

$$f(pfu_{t+1} | d(t)) = \int f(pfu_{t+1} | d(t), a) f(a | d(t)) da \quad (2)$$

This is pretty straightforward if we know the distribution of the model parameters $f(a|d(t))$. The difference to the frequentists viewpoint is obvious – while the Bayesian approach fixes the data and makes the parameter to obey certain distribution, the frequentists fix the parameters, which strongly depend on the count of measurements and can fail if it is not large enough. And that can be the drawback e.g. in the excessive CME.

3. FLUX MODEL PARAMETERS

The evaluation of the above equation presumes the knowledge of the conditional parameter pdf $f(a|d(t))$. Unfortunately the flux is not a stationary process and its statistical distribution varies. Hence, the model must release the parameters and let them vary as well, in particular if the solar activity is higher and if the solar flares are very intensive and likely to be accompanied with CME.

The general estimation of model parameters holds the form

$$f(a | d(t)) \propto f(pfu_t | d(t-1), a) f(a | d(t-1)) \quad (3)$$

where denotes proportionality, i.e. equality up to the constant factor (normalization integral). This equation can be viewed as the data-update of the parameter pdf by the last flux measurements. The meaning is: we already know, that the flux model parameters obey certain distribution. In the beginning we are not sure about its properties, but as we collect more data, our knowledge and potentiality to estimate them increases. A significant complication is that this step doesn't reflect the eventual real parameters time variability. Our approach to this issue is to formulate multiple hypotheses H_i , $i = 1, 2, \dots$ about the real but unknown $f(a|d(t))$. One states that no flux model parameters vary and employs directly the data-updated pdf from (3). Other hypotheses introduce the expert knowledge – they either carry the modified distributions which will faster respond to change in the flux (e.g. flattened in the case of the Gaussian distribution) or a knowledge of the distribution typical for particular events, e.g. X-ray spectrum hardening. It is not possible to explicitly say which hypothesis is true at the moment (otherwise we would use it directly), but we can

determine their probabilities w_i – mostly by an expert or by mathematical optimization – and form a mixture of these functions as their convex combination

$$m(a | d(t)) = \sum_i w_i f_i(a | d(t)) \quad (4)$$

where $f_i(a|d(t))$ denotes the pdf introduced by H_i . To avoid the computing with mixture, we search for a single density $g(a|d(t))$ with minimal Kullback-Leibler divergence from it, i.e. $KL(g || m) \rightarrow \min$. This approach is described as partial forgetting in [2]. The result serves as the best description of the flux model parameters. It can be used in Eq. (2) and is therefore convenient for modeling and prediction purposes.

4. CONCLUSIONS

The the solar particles flux can have significant impact on modern electronic devices and human beings in the orbit, in airplanes and even on the ground. To avoid or minimize the exposure to the particles contained in it, the need for a good prediction technique is self-evident. In the paper, we discussed the Bayesian approach to this issue, allowing to use a simple autoregression model enhanced by a partial forgetting technique. Such a technique should be able to track the model parameters and improve the prediction quality even if the solar activity varies in a short term.

Bayesovské modelování a predikce toku slunečních částic

Vliv subatomárních částic vyvržených z horní vrstvy sluneční atmosféry na elektronická zařízení a člověka je předmětem mnoha studií. Pomineme-li zařízení v kosmu a pilotované kosmické lety, je potřeba brát v potaz jejich vliv i na leteckou činnost realizovanou ve vysokých výškách, kde expozice vlivu těchto částic může představovat značné riziko jak pro posádku, tak pro elektronická zařízení na palubách letadel. Pro ně může mít i fatální důsledky, zejména v případě ovlivnění činností pozičních a navigačních systémů, komunikačních systémů, autopilota atd.

Vzhledem k těmto faktům roste význam matematického modelování toku částic od Slunce. Pomocí vhodných modelů lze totiž provádět předpovědi budoucích stavů a v případě jejich nebezpečnosti vydávat včasné varování.

Článek představuje autoregresní model vybudovaný na Bayesovské metodologii. Vzhledem k nehomogenitě slunečního větru, představovaného zmíněnými částicemi, využívá model rovněž expertní informace, založené na podobných důsledcích různých jevů, které tuto nehomogenitu způsobují. Příkladem může být změna rentgenového spektra slunce, která je za určitých okolností doprovázena sluneční erupcí vedoucí k značnému nárůstu množství vyvržených částic.

Acknowledgement

This work was partly supported by the Research Center DAR – MSMT 1M0572

References

- [1] ANDREWS, M. D.: A search for CMEs associated with big flares. *Solar Physics*, vol. 218, no. 1, pp. 261-279. Springer, 2003. ISSN 0038-0938.

- [2] DEDECIUS, K. et al.: Parameter estimation with partial forgetting method. Proceedings of the 15th IFAC Symposium on Identification and System Parameter Estimation – SYSID 2009, Saint-Malo, France. 2009.
- [3] HARRISON, R. A.: The nature of solar flares associated with coronal mass ejection. Astronomy and Astrophysics-Berlin, vol. 304, no. 2, pp. 585-594. Berlin; New York: Springer-Verlag, 1995. ISSN: 0004-6361.
- [4] KOSKINEN, H. et al.: Space weather effects catalogue. ESA Space Weather Study (ESWS), Issue 2.2. 2001.
- [5] LI, X. et al.: Quantitative prediction of radiation belt electrons at geostationary orbit based on solar wind measurements, Geophys. Res. Lett., 28, 1887-1890, 2001. ISSN 0094-8276.
- [6] NEAL, J. S., TOWNSEND, L. W.: Multiple solar particle event dose time profile predictions using Bayesian inference. Radiation protection dosimetry, vol. 116, no. 1-4, pp. 38. 2005. ISSN 0144-8420.
- [7] NEAL, J. S., TOWNSEND, L. W.: Prediction of solar particle event proton doses using early dose rate measurements. Acta Astronautica, vol. 56, no. 9-12, pp. 961-968. Elsevier, 2005. ISSN 0094-5765.

Přístupy k hodnocení radiační zátěže populace spojené s lékařským ozářením při CT vyšetřeních

Helena ŽÁČKOVÁ – Ladislav TOMÁŠEK – Martin ZAORAL – Ivana HORÁKOVÁ, Státní ústav radiační ochrany, Praha; Fakultní nemocnice, Olomouc

Deskriptory *INIS*: COMPARATIVE EVALUATIONS; COMPUTERIZED TOMOGRAPHY; PATIENTS; RADIATION DOSES

V současné době významně narůstá radiační zátěž, která je spojena s vyšetřovacími metodami výpočetní tomografie a je proto potřeba ji pravidelně hodnotit.

S pomocí dat o počtu a typech vyšetření ve Fakultní nemocnici Olomouc za rok 2008 byla stanovena hodnota váženého průměru efektivní dávky pro CT vyšetření (5,74 mSv). S jejím použitím a s pomocí údajů o celkovém počtu CT vyšetření v ČR za rok 2008 byl proveden odhad kolektivní efektivní dávky. Stanovená hodnota 4095 manSv má vztah k radiační zátěži populace z CT vyšetření v ČR v tomto roce.

Byla stanovena věková distribuce pacientů vyšetřovaných na základě CT v ČR, která byla srovnána s publikovanými údaji z USA. V práci byla ověřena možnost a efektivita využití nemocničních informačních systémů pro hodnocení radiační zátěže populace.

1. ÚVOD

Metody výpočetní tomografie (CT) znamenají vedle nezpochybnitelného přínosu pro pacienty i významný nárůst radiační zátěže obyvatelstva. V roce 2009 upozornila NCRP [1] veřejnost, že se hodnoty kolektivních efektivních dávek z lékařského ozáření v populaci USA od roku 1980 do roku 2006 zvýšily více než sedmkrát, přičemž významný podíl na této skutečnosti mají dávky z CT vyšetření.

Cílem této práce bylo posoudit, jakým způsobem je možné z dostupných údajů v ČR stanovit radiační zátěž populace z CT vyšetření.

2. SOUČASNÝ STAV V ČR

Zvyšování počtu CT vyšetření souvisí s nárůstem počtu CT zařízení ČR. V roce 1996 bylo v ČR evidováno 62 CT [2] zařízení a v roce 2008 již 154.

Pro stanovení radiační zátěže populace je potřeba mít k dispozici spolehlivé údaje o dávkách pacientů a současně mít k dispozici údaje o pacientech a provedených vyšetřeních:

- Stanovení dávek pacientů při CT vyšetřeních bylo hodnoceno v rámci dvou studií [3,4], které prokázaly, že situace v ČR je srovnatelná s evropskou úrovní.
- Pro zpracování dat ve zdravotnictví se v ČR využívají tzv. nemocniční informační systémy (NIS) určené ke zpracování patientské dokumentace, k řízení činností zdravotnického zařízení a pro předávání požadovaných údajů do centrálních registrů. Dva nejdůležitější centrální registry, jejichž data využívá i SÚJB, je registr VZP [5], který v roce 2008 pokrýval 62 % pojištěnců v ČR, a registr ÚZIS [6], který soustřeďuje základní statistická data o zdravotnictví. Některé NIS umožňují i zpracování dávek ozáření při vyšetřeních zobrazovací technikou (včetně CT).

3. METODA

Spolehlivé údaje o radiační zátěži populace a rizika zvýšení počtu nádorů ve skupině pacientů ozářených při CT vyšetřeních by poskytla pouze cílená epidemiologická studie. Tu však není možné v současné době realizovat.

ICRP doporučuje stanovovat počet indukovaných rakovin v ozářených tkáních a orgánech na základě znalosti orgánových dávek pro daná vyšetření a s použitím hodnot nominálních rizik jednotlivých orgánů [7].