0254-6124/2011/31(2)-176–06 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Rui Lei, Yu Peng, Zhao Hua. Prediction of relativistic electron flux at geosynchronous orbit based on magnetic field. *Chin. J. Space Sci.*, 2011, **31**(2): 176-181

基于同步轨道区磁场对相对论电子通量的预报*

芮 磊[1,2] 余 鹏[3] 赵 华[1]

1(中国科学院空间科学与应用研究中心 空间天气学国家重点实验室 北京 100190)

2(中国科学院研究生院 北京 100049)

3(解放军理工大学气象学院探测与信息工程系 南京 211101)

摘 要 地球同步轨道区相对论电子通量的变化与该区域的磁场分量 P (垂直轨道面指向北) 有很好的相关性, 后者的变化相对于前者有 1∼2 天的时间提前量, 这为相对论电子通量的预报提供了可能. 通过对二者相关性物理机制的研究, 结合 GOES11 (135° W) 卫星数据分析, 确定最佳时间提前量和最优相关系数, 并提出了一个定量的预报模型. 模型的输出参量为 24 h 之后的当地时子夜 (23:31 LT—00:30 LT)、清晨 (05:31 LT—06:30 LT)、正午 (11:31 LT—12:30 LT)、傍晚 (17:31 LT—18:30 LT) 4 个特征时间段相对论电子通量 1 h 平均值, 预报的相对论电子通量有 >0.6 MeV 和 >2 MeV 两个谱段, 预报精度 0.7 左右. 这种预报模式对地球同步轨道卫星的自主安全运行具有较好的应用价值.

关键词 地球同步轨道, 相对论电子通量, 磁场分量 P

中图法分类号 P 353

Prediction of Relativistic Electron Flux at Geosynchronous Orbit Based on Magnetic Field

RUI Lei[1,2] YU Peng[3] ZHAO Hua[1]

1(*State Key Laboratory of Space Weather, Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

2(*Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

3(*Department of Sounding and Information Engineering, Institute of Meteorology, Chinese People's Liberation Army University of Science and Technology, Nanjing* 211101)

Abstract There is a good correlation between the relativistic electron flux and the P-component (perpendicular to the orbit plane and points northward) of magnetic field at geosynchronous orbit, and more importantly, the later happened 1∼2 day earlier than the former. So the relativistic electron flux can be forecasted by the magnetic field measurement onboard. Firstly, the physical mechanisms possibly governing the correlation have been analyzed in this paper. Secondly, by analyzing the data of GOES11 (an geosynchronous orbit satellite which longitude is 135° W), the best advanced time and linear correlation will be found out. Finally, a quantitative prediction model is developed. The

* 国家自然科学基金项目资助 (40704032)

2009-09-08 收到原稿, 2010-06-30 收到修定稿

E-mail: ruilei.007@163.com

outputs are hourly-averaged flux on four typical time periods 24 hours later. These four typical time periods are: midnight (23:31 LT—00:30 LT), morning (05:31 LT—06:30 LT), noon (11:31 LT—12:30 LT), evening (17:31 LT—18:30 LT) of local time. The relativistic flux of model has two energy spectrums which are > 0.6 MeV and > 2 MeV. The model Prediction Efficiency (PE) is about 0.7. This prediction model is of great application to synchronous satellites.

Key words Geosynchronous orbit, Relativistic electron flux, P-component of magnetic field

1 引言

地球同步轨道区位于地球赤道上方高度约 3.6×10^4 km, 此处运行着大量的地球同步轨道卫星. 同步轨道在外辐射带内部, 这里分布着大量的相对论电子 (能量在 MeV 量级), 这些电子的速度极高, 能够穿透卫星表面的屏蔽层, 进入卫星内的电子设备, 引起卫星内部绝缘介质或元器件电荷堆积, 造成介质深层充电, 形成的电压可达数千伏. 脉冲放电时可以损坏卫星材料, 破坏电子元器件, 轻则会使卫星工作状态发生异常, 重则导致卫星报废 [1]. 外辐射带环境变化剧烈, 尤其是在磁暴期间, 短时间内, 相对论电子通量可以迅速上升 1~3 个量级, 称之为相对论电子增强事件 [2]. 相对论电子危害程度与其通量和谱的硬度成正比 [3]. 因此, 建立一个地球同步轨道区相对论电子通量的预报模型显得十分重要.

以往的相对论电子通量预报模型, 输入参量一般采用上游太阳风参数, 因为太阳风是地球磁层状态变化的源. 太阳风参数与同步轨道相对论电子通量有很好的相关性, 尤其是太阳风速度, 其变化比相对论电子通量的变化提前 1~2 天 [4]. Li 等 [5] 在 2001 年运用等离子体径向扩散理论, 建立了一个半经验的预报模型, 模型采用 ACE 卫星太阳风参数作为输入参量, 预报量为大于 2 MeV 电子通量日平均值, 对 1995—1999 年进行预报, 精度平均为 0.59, 预报与实测数据线性相关度为 0.80. 在同步轨道区, 低能段电子通量与高能段电子通量之间有很强的相关性, 最重要的是低能段电子通量的变化先于高能段电子通量的变化, 时间提前量达到几十个小时 [6]. 基于这种分析, Turner 等 [7] 在 2008 年建立了另一种预报相对论电子的模型, 模型输入参量为 50~75 keV 电子通量, 预报量为 1.1~1.5 MeV 电子通量日平均值, 对 1995—2006 年进行预报, 精度平均为 0.73. 基于神经网络理论的模型, 输入参量包含太阳风参数、Kp 指数等, 预报效果很好 [8].

通过以上分析可以得出, 大部分预报模式采用的输入参量基本上都包含太阳风参数 (文献 [7] 模式除外), 引用的是 ACE 卫星 (美国) 数据; 输出量均为相对论电子的日平均值. 同步轨道区相对论电子通量具有昼夜周期性波动变化的特性, 正午最高, 午夜最低, 日平均值不能反映这些特性. 因此, 本文通过分析同步轨道区相对论电子通量与该处磁场之间的关系, 建立模型, 预报出 24 h 之后的当地时子夜 (23:31 LT—00:30 LT)、早晨 (05:31 LT—06:30 LT)、正午 (11:31 LT—12:30 LT)、傍晚 (17:31 LT—18:30 LT) 4 个特征时间相对论电子通量 1 h 平均值. 本预报模式的一个重要特点是采用在轨卫星的实时磁场探测数据, 来预报能量大于 0.6 MeV 和大于 2.0 MeV 两个能段的电子通量. 这两个能段的电子通量对卫星危害最大, 也是同步轨道卫星一直都在监测的通量段 (例如, 美国 GOES 系列卫星, LANL 系列卫星), 而预报模式所采用的输入参数是卫星自身可以监测的同步轨道区磁场参数. 目前磁场探测器的研制发展很快, 传感器重量仅约 100 g, 功耗约 2 W. 卫星自身通过磁场探测数据, 自主预报未来 24 h 可能遭遇的高能电子通量增加事件, 自主采取一些可能的防护措施, 以保障卫星安全运行.

2 可行性分析

目前普遍认为, 相对论电子是由磁尾注入辐射带的中能电子加速而来的 [9], 中能电子 (50~200 keV) 与高能电子 (0.5~5 MeV) 通量是正相关的, 且后者先于前者变化. 在外辐射带, 中能电子通量远远大于相对论电子通量, 所以前者对环电流的贡献较大, 后者对环电流的贡献可以忽略不计. 环电流的改变会引起同步轨道区磁场的变化, 环电流与同步轨道区磁场分量 P 是负相关的, 因此, 同步轨道磁场分量 P 与

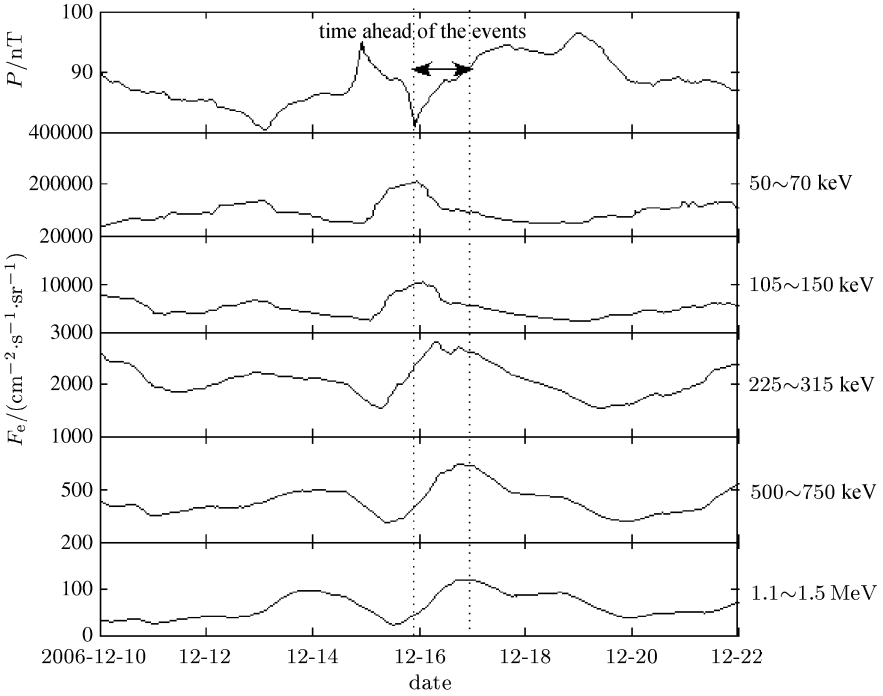

图 1 同步轨道区磁场与不同能段的电子通量的对比

Fig. 1 Comparison of magnetic field and electron fluxes for various energy channels at synchronous orbit

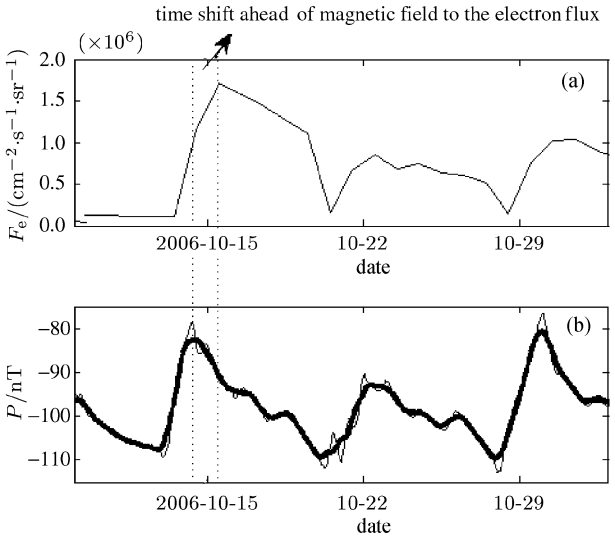

图 2 GOES11 磁场 P 分量与相对论电子通量 ($F_e \geqslant 0.6$ MeV) 的变化对比

Fig. 2 Comparison of GOES11 magnetic field P-component and relativistic electron flux ($F_e \geqslant 0.6$ MeV)

相对论电子通量也是负相关的, 且磁场相对于相对论电子通量有一个时间提前量. 如图 1 和图 2 所示, 同步轨道区相对论电子通量的检测和磁场检测数据从实验上证明了这一分析.

从图 1 可以看出, 电子通量的能谱从低能向高能扩散, 这说明相对论电子是由中能电子加速而来的; 磁场分量 P 与中能电子通量有很明显的负相关且是同步的, 其均先于相对论电子通量变化. 图 2 为 GOES11 卫星磁场分量 P 与相对论电子通量变化的对比, 图 2(a) 为电子通量 ($F_e > 0.6$ MeV) 正午 1 h 平均值变化曲线, 图 2(b) 采用磁场相反值表示日移动平均曲线 (为了消除昼夜变化引起的波动), 图 2(b) 中的实粗线为平滑后的结果, 为显示其的普遍性, 时间段随机挑选. 从图 2 可以更加明显地看出, 同步轨道区磁场分量 P 与该地的相对论电子通量负相关, 前者先于后者发生, 提前时间大约为 1~2 天. 这就为相对论电子通量的预报提供了可能.

3 预报模型的建立和结果

根据可行性分析结果可以认为, 外辐射带中通常情况下相对论电子由中能捕获电子加速而来. 辐射带中的中能电子主要由磁尾注入而进入磁层捕获区

成为辐射带中能电子. 辐射带中能电子的通量远远大于相对论电子的通量, 而中能电子的漂移运动会引起地球同步轨道区磁场分量 P 的减小. 因此可以用同步轨道磁场分量 P 作为输入量来预报 24 h 后 4 个特征时段的相对论电子通量. 下面以 GOES11 相对论电子通量当地时正午 1 h 平均值的预报模型为例, 来说明模型的建立过程. 所有数据均来源于 GOES11 卫星.

3.1　相关性分析

为确定磁场分量 P 与相对论电子相关性最佳时间差, 可以通过程序搜索出提前时间量 (见图 3).

为便于观察, 在图 3 中取相关系数的相反数, 将相关系数变为正值, 图 3 中的小圆圈标注的是相关性最好时间提前量. 从图 3(a) (b) 可以看出, 磁场分量 P 日移动平均值与两个能谱段 ($F_e > 0.6$ MeV 和 $F_e > 2$ MeV) 的电子通量提前量是零的时候, 相关系数并不大, 随着提前量的增加, 相关性越来越好, 在某个提前量达到最大, 之后变小. 未经处理的磁场分量 P 相对于电子通量的相关系数, 虽然有波动 (通常认为是 GOES 卫星绕地球公转引起的), 但还是有一个最佳的提前量. 图 3 所示的最优相关系数及最佳时间提前量列于表 1. 表 1 显示, 最佳提前量均超过 24 h, 因此可以把最佳提前量的磁场分量 P 及其日移动平均值作为模型的输入因子.

3.2　模型的建立

可以将预报量写为 n 个输入因子的函数形式, 有

$$F = \sum_{i=1}^{n} a_i x_i.$$

其中, a_i 为系数, x_i 为输入因子, 令 $x_n = 1$, 其中已经包含常数项. 通过以上可行性分析, 已经选出模型的输入因子, 通过最小二乘法可以解出系数 a.

表 1　磁场分量 P 与相对论电子通量 F_e 的最优相关系数和最佳提前量

Table 1　Optimal linear correlation and the best advanced time between the relativistic electron flux the and the P-component of magnetic field

磁场分量 P	最优相关系数	最佳提前量/(h)
日移动平均值与 $F_e \geqslant 0.6$ MeV	0.5905	25
日移动平均值与 $F_e \geqslant 2$ MeV	0.4595	33
与 $F_e \geqslant 0.6$ MeV	0.5713	29
与 $F_e \geqslant 2$ MeV	0.4299	29

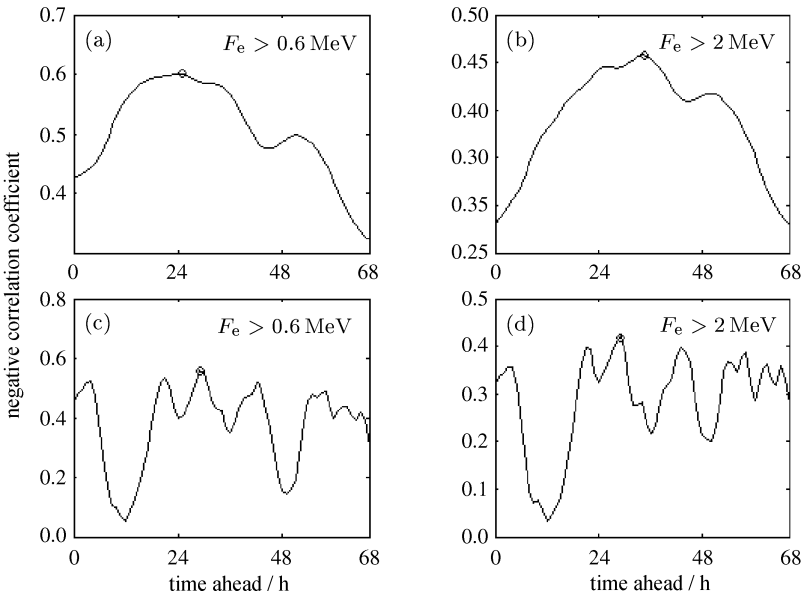

图 3　相对论电子通量 F_e 与磁场分量 P 的相关性分析. (a) (b) 电子通量与磁场日移动平均值相关性分析, (c) (d) 为电子通量与磁场相关性分析

Fig. 3　Correlation analysis of relativistic electron flux F_e and P-component of the magnetic field. (a) (b) correlation analysis between electron flux and removing average of magnetic field, (b) (c) correlation analysis between electron flux and magnetic field

为确保模型预报精度的稳定, 避免出现大的浮动, 模型拟合系数的时间取为 600 天, 且为预报当天的前 600 天, 每预报一天, 都要重新拟合出系数. 例如, 预报 2008 年 10 月 1 日当天 GOES11 当地时正午大于 2 MeV 的电子通量, 需用这天前的 600 天作为拟合系数的时间. 600 天是个相对比较长的时间, 可以保证预报精度的稳定性, 每天跟随拟合系数可以增加预报的精度.

3.3 预报结果

预报精度定义:

$$P_{\mathrm{e}} = 1 - \frac{\sum_{n=1}^{N}(F_n - f_n)^2}{\sum_{n=1}^{N}(f_n - \langle f\rangle)^2}.$$

其中,

$$\langle f\rangle = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} f_n,$$

f_n 为实测值, F_n 为预报值, N 为总的天数.

图 4 给出了预报时间范围在 2008 年 2 月 24 日至 2008 年 12 月 4 日, 共 285 天的预报结果, 预报精度为 0.7729. 从图 4 可以看出, 预报值和实测值基本吻合.

表 2 列出了当地时间子夜、清晨、正午、傍晚 4 个特征时间段本文的模型与自回归模型预报精度的对比.

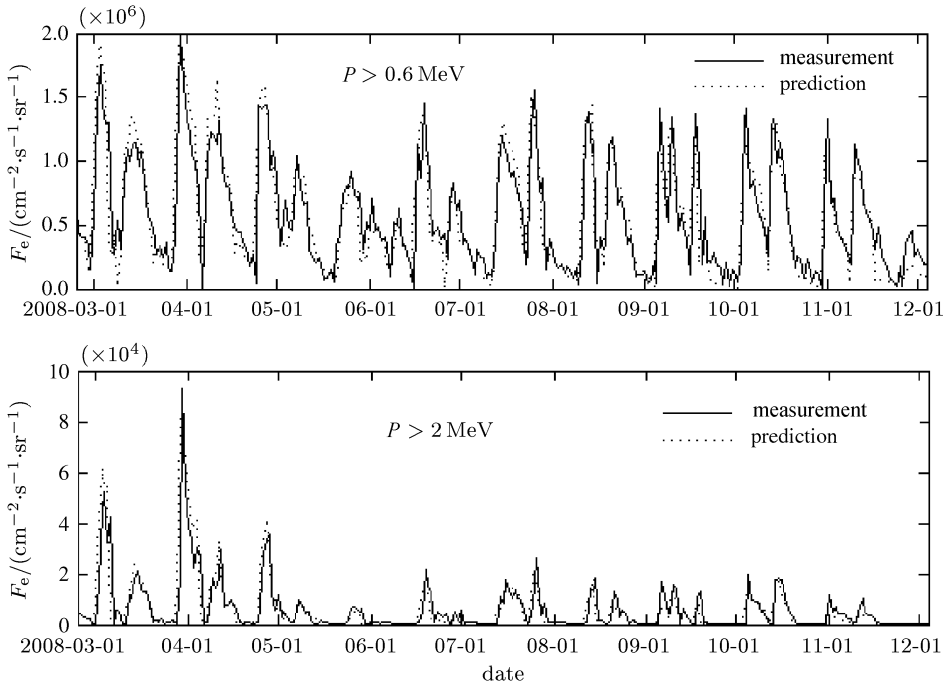

图 4 GOES11 相对论电子通量正午 1 h 平均值预报结果 (提前 24 h)

Fig. 4 Prediction of one-hour average relativistic electron flux at noon of GOES11 (advance 24 hours)

表 2 本文模型与自回归模型预报精度的比较

Table 2 Comparison of prediction efficiency of the model in this paper and the autoregressive model

特征时间	本文模型 (> 0.6 MeV)	自回归模型 (> 0.6 MeV)	本文模型 (> 2 MeV)	自回归模型 (> 2 MeV)
子夜	0.5376	0.4520	0.5931	0.4534
清晨	0.7446	0.5946	0.7567	0.6257
正午	0.7729	0.6120	0.7035	0.6025
傍晚	0.6858	0.5437	0.6914	0.6151

4　结论

基于同步轨道区磁场来预报该地相对论电子通量的模式简洁有效, 预报的精度大约为 0.7. 从表 2 中可以看出, 该模型比自回归模型效果好, 预报精度可以提高约 0.08~0.16. 模型的输出量是正午、子夜、清晨、傍晚这 4 个特征时间的 1 h 平均值, 可以反映出同步轨道卫星在一天运行中相对论电子通量的昼夜变化. 正午是一天中相对论电子通量最大的时候, 破坏力也最强, 因此这个特征时间的预报值最具价值. 模型的数据来源于 GOES11 卫星, 预报的结果也是对 GOES11 所在位置当地时的数据预报, 该模型同样可以应用于其他同步轨道卫星.

但是模型尚有一定不足, 因为同步轨道区磁场分量 P 与该地的相对论电子通量之间相关性并不是非常好, 最好的相关系数为 -0.6 左右. 所以这里将处理后 (日移动平均值) 的和未处理的磁场分量 P 都作为模型的输入量, 这样可以提高相关性.

该模型可以应用于携带磁强计和相对论电子通量探测器的同步轨道卫星. 根据模型, 可以预报出未来一天该卫星经历的相对论电子辐射环境, 为航天器的运行提供安全保障.

参考文献

[1] Wrenn G L. Conclusive evidence for internal dielectric charging anomalies on geosynchronous communications spacecraft [J]. *J. Spacecr. Rockets*, 1995, **32**(3):514-520

[2] Jiao Weixin. Science of Space Weather [M]. Beijing: Weather Publishing Company, 2003. 103. In Chinese (焦维新. 空间天气学 [M]. 北京: 气象出版社, 2003. 103)

[3] Reeves G D, McAdams K L, Friedel R H W, Cayton T E. The search for predictable features of relativistic electron events: Results from the GEM storm campaign [J]. *Amer. Geophys. Union Monogr.*, 2001, **125**:305-312

[4] Paulikas G, Blake J. Effects of the solar wind on magnetospheric dynamics: energetic electrons at the synchronous orbit [G]//Olson W ed. Quantitative Modeling of the Magnetospheric Processes. Washington D C: AGU Geophysical Monograph 79, 1979. 180-202

[5] Li X, Temerin M, Baker D N, Reeves G D, Larson D. quantitative prediction of radiation belt electrons at geostationary orbit based on solar wind measurements [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, **28**:1887-1890

[6] Cayton T E, Belian R D, Gary S P, *et al*. Energetic electroncomponents at geosynchronous orbit [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1989, **16**:147-151

[7] Turner, Drew, Li X. Quantitative forecast of relativistic electron flux at geosynchronous orbit based on low-energy electron flux [J]. *Space Weather*, **6**, S05005, doi: 10.1029/2007SW000354

[8] Xue Bingsen, Ye Zonghai. Forecast of the enhancement of relativistic electron at the GEO-synchronous orbit [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2004, **24**(4):285-288. In Chinese (薛炳森, 叶宗海. 地球同步轨道高能电子增强事件预报方法 [J]. 空间科学学报, 2004, **24**(4):285-288)

[9] Baker D N, Klimas A J, Vassiliadis D. Global convection, low-dimensional magnetospheric dynamic, and deterministic chaos [G]//Kan J R, Akasofu S I ed. Magnetospheric Substorms. Fairbanks: Fairbanks Geophysical Institute, 1994. 75-80