

舒曼谐振的数据处理方法及其应用研究

周洪娟, 于海雁, 乔晓林

(哈尔滨工业大学(威海)信息工程学院, 山东 威海 264209)

摘要: 舒曼谐振(Schumann resonance, SR)信号淹没于非常强的环境噪声数据中,影响了常规处理方法的性能。为了从观测数据中可靠地提取微弱的 SR 信号,先对实际的 SR 观测数据进行奇异值分解(singular value decomposition, SVD)滤波,再利用常规算法提取参数,分析了观测站处的闪电源分布、参数日变化规律以及一起太阳耀斑事件对应的参数变化。结果证明,经过 SVD 滤波后得到的估计结果能更好地反映 SR 参数的变化规律,极大地提高了常规方法的可靠性。

关键词: 舒曼谐振; 多峰拟合; 奇异值分解; 谐振频率; 太阳耀斑

中图分类号: TN 911 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-506X.2012.01.38

Study on the data processing methods for Schumann resonance and its application

ZHOU Hong-juan, YU Hai-yan, QIAO Xiao-lin

(School of Information Engineering, Weihai Campus, Harbin Institute of Technology, Weihai 264209, China)

Abstract: The Schumann resonance (SR) signal is often buried in the dramatic noise from the surrounding environment, so the performances of the routine methods are affected. In order to extract the weak SR signal reliably, the SR raw data are filtered by a singular value decomposing (SVD) method and the correlative parameters are obtained by regular methods. The actual SR data are filtered by SVD method and are processed by multi-peaks fitting method. The distribution of lightning source around the observatory, the diurnal variation regular of parameters and the frequency variation during a severe solar flare event are analyzed. The analysis results prove that the parameters estimated by the proposed method can manifest the natural law better and greatly improve the performance of the routine methods.

Keywords: Schumann resonance (SR); multi-peaks fitting; singular value decomposing (SVD); resonance frequency; solar flare

0 引言

舒曼谐振(Schumann resonance, SR)是地球-电离层腔内的一种固有谐振,最低阶谐振波长相当于地球周长,比较强的前 4 阶谐振频率分别在 8 Hz、14 Hz、20 Hz、26 Hz 左右,它主要由全球闪电放电电流激发。另外,一些比较强的放电现象以及电离层的异常扰动等也会引起舒曼谐振的参数变化,比如核爆炸、太阳耀斑活动以及比较大的地壳运动等都会在 SR 上有所体现^[1-4]。SR 可以作为监测全球温度变化的温度计,同时也可以作为监测电离层以及地震运动的一种有效手段^[5]。

目前,SR 信号的观测主要是基于地面直接测量,也有利用地面接收电离层底端反射的高频波,通过解调高频波来间接地得到 SR 信号^[6]。地面直接测量的原始信号受周围环境噪声以及干扰的影响很大,由于全球工业发展,很难找到完

全没有人类活动的地方用于测量 SR,这就使得对原本就很微弱的信号的提取变得更加困难。目前,国内对 SR 的长期观测研究不多,国外对 SR 处理方法主要有简单的周期谱图法、时域上基于谐波的 Prony 算法以及频域上采用多个 Lorentz 函数拟合的方法等^[7-8]。由于原始数据中的异常干扰现象比较多,影响了这些方法的稳定性,本文首先分析这些算法的优劣,并在这些方法的基础上,提出基于奇异值分解(singular value decomposition, SVD)的 SR 处理方法。

1 SR 简介及其观测数据说明

SR 主要由云地闪电激发,频段在 40 Hz 以下,在地-电离层腔中这个频段可以传播的模式只可能为 TM₀ 模式,并且云地闪电通道长度远小于 SR 波长,因此闪电可以近似等效为垂直电偶极子。若假设整个地-电离层腔是球对称均匀分布的,则从理论上分析,SR 电场分量是垂直于地面

的,磁场分量是平行于地面的^[9],实际观测也验证了这个结论。因此在 SR 观测站设置了南北向磁传感器和东西向磁传感器来测量水平磁场分量。

由于 SR 磁感应强度一般在 1 pT 以下,非常微弱,因此观测仪器的放大电路需要有足够的放大倍数、足够高的接收灵敏度才能采集到 SR 信号。同时,由于周围环境噪声和工业干扰的存在,接收到的数据信噪比极低,需要采用可靠的数据处理方法,才能提取到 SR 信号。

对云南永胜观测站接收到的采样数据进行的频谱分析如图 1 所示。图 1(a)为分析时间分别为 10 s 和 1 h 的平均谱图,延长处理时间后可清晰地分辨出前 4 阶 SR 信号,谐振频率分别在 8 Hz、14 Hz、20 Hz 和 26 Hz 左右;图 1(b)为分析时间分别为 10 min、1 h 和 2 h 的周期谱图,可见积累时间的增加对信噪比的改善也不超过 1 dB,并且若积累时间太长也不利于 SR 参数的持续观测。因此,本文分析窗口时长定为 10 min,频率分辨率为 0.1 Hz。但是周期谱图法主要对加性噪声有一定的抑制效果,对一些突发干扰信号无能为力,并且处理后各阶的峰值与谷值差最多有 4 dB,高阶会更低,这对各阶 Q 值的统计不利,因此需要寻求更稳定的数据处理方法。

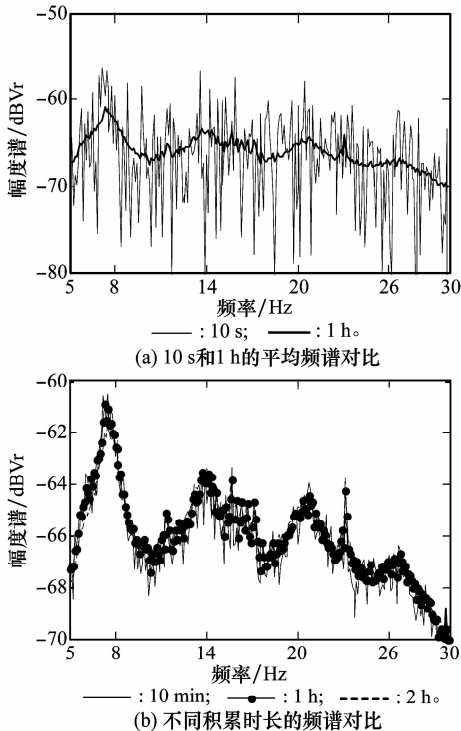


图 1 SR 观测数据分析

2 算法分析

SR 参数主要包括各阶中心频率、幅度以及 Q 值。目前对这些参数的提取方法分为两大类:时域 Prony 算法提取和频域多峰拟合提取。

Prony 算法是将等间距采样数据用一系列指数衰减的正弦函数的线性组合来描述^[10]。这是一个非线性最小二乘问题,比较经典的方法是将非线性问题转换成线性问题

进行求解^[11]。这种方法的优点是可以不用进行快速傅里叶变换,缩短处理时间,但受噪声的影响非常大,对于干扰信号无能为力,估计结果不稳定。

对 SR 频谱图中的多个谱峰进行多峰拟合,通常采用的拟合函数为 Lorentz 函数^[7],这仍然是一个非线性最小二乘问题。算法需要提供估计值的初始值,通常根据经验值来确定,然后采取迭代算法得到比较好的拟合曲线。这种拟合算法应用的前提是 SR 的谐振轮廓比较清晰,本文在 10 min 平均谱图的基础上进行拟合,估计结果比较稳定可靠,缺点是对异常的强干扰无能为力。

以上算法均对数据中的噪声非常敏感。由于 SVD 滤波可以有效地去除数据中能量比较低的噪声成分,本文采取这种方法对信噪比低的 SR 观测数据进行噪声去除。首先,利用原始采样数据构造 Hankel 矩阵^[12],选取合适的奇异值个数恢复信号;然后,在频域中验证去噪的效果。噪声抑制的好坏关键在于选取合适的奇异值个数,这与具体的奇异值分布有关。对信噪比较低的 SR 观测数据,需要根据分析的阶数合理地选择奇异值个数。另外,SVD 方法是一种有效的去噪方法,用来对 SR 数据进行预处理,然后再采用多峰拟合算法来估计 SR 参数。

3 SR 分析结果

以下分析采用的数据来自云南永胜观测站。以 SR 南北向磁场数据为例,任意取 10 s 的奇异值分布如图 2(a)所示,可见奇异值间差别很小。为了尽量保留原始信息,选取前 30 个奇异值,得到的 10 min 平均谱图如图 2(b)所示。可以看出,SVD 滤波预处理的引入极大地提高了各阶谐振的信噪比。对于干扰信号的去除可以采用中值滤波和平滑滤波的方法。

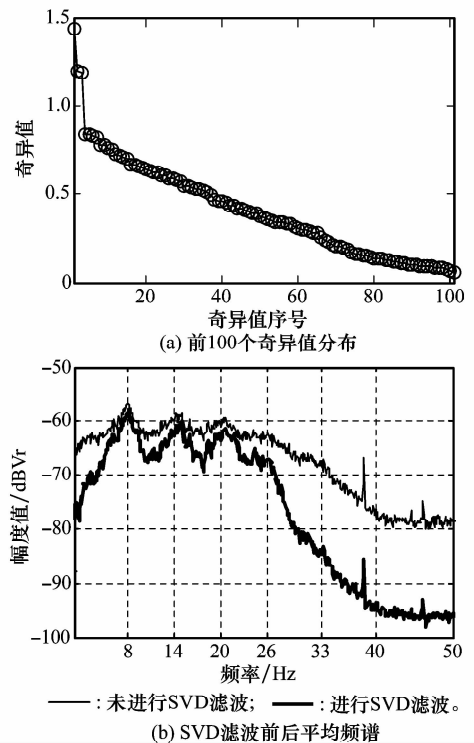


图 2 SR 观测数据 SVD 滤波分析图

3.1 观测站处的闪电源分析

SR 信号主要是由全球闪电激励产生的,正确分析观测站处的闪电源分布,对观测结果的分析具有重要意义。图 3 为 6 月份某天的 SR 时频图,可以看出 SR 各阶的强弱变化,图 3(c)和图 3(d)的峰谷差别要明显强于图 3(a)和图 3(b)。

另外,从图 3 也可以看出,各阶谐振在北京时间 15:00~19:00 期间幅度明显增强,尤其是东西向磁场,一天中该时间段的峰值效果最明显,这种现象在常年的观测中一直存在。根据美国国家航空航天局(national aeronautics and space administration, NASA)装载于卫星上的近红外闪电探测系统对往年闪电活动的探测结果表明:全球闪电活动主要分布在非洲中部的刚果盆地周围、东南亚的岛屿地区以及南美洲的亚马逊雨林地区,并且各个地区的闪电活动在一天内的发生时间有所区别,其中东南亚闪电源主要发生在 UT8:00 左右,对应北京时间 16:00 左右,正好对应图 3 的分析结果。由于永胜基本上位于东南亚岛屿地区的正北方,从电磁波传播的角度分析,东西向磁场受东南亚闪电源的影响更大一些。分析结果表明:永胜地区的 SR 受东南亚闪电源的影响更大一些。

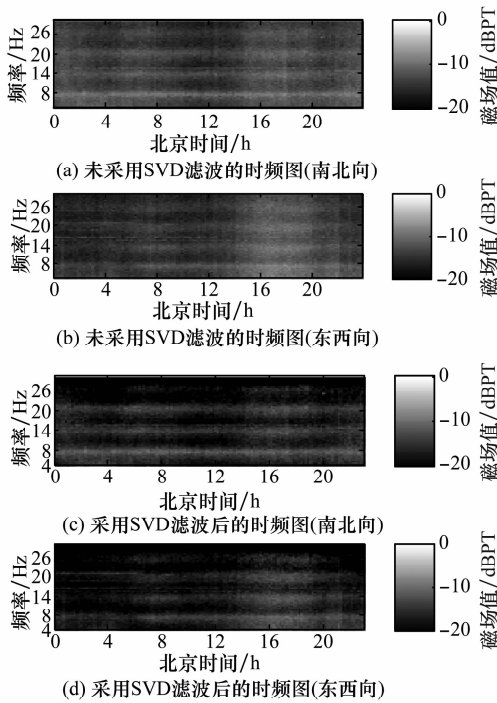


图 3 SR 时频图

3.2 SR 参数分析

SR 参数的变化规律以及正常取值范围对一些基于 SR 现象的分析应用,如地震预测、太阳耀斑分析等具有重要意义。

图 4 为 SR 采用 SVD 滤波前后的参数对比图,分别为南北向和东西向磁场的第二阶谐振的幅度、频率和带宽(幅度降低到最大幅度一半对应的带宽)的日变化曲线。可以看出,由于噪声的影响,采用 SVD 处理后的估计值明显小于处理前的幅度,所以采用 SVD 滤波后的结果更加可信。从参数的日变化曲线上,可以判断:① 在地-电离层腔中的

SR 传播具有各向异性,这主要受电离层的影响,因此南北向和东西向的参数变化规律要分别进行分析;② 两个方向的幅度变化在本地 16:00 左右出现峰值,与闪电源的分析结果对应,另外南北向在 0:00 左右也存在一个小的峰值,从闪电源的发生时间上初步分析,这段时间主要作用的闪电源来自非洲中部地区;③ 谐振频率取值采用 SVD 滤波前后相差 0.15~0.4 Hz 左右,而一般的太阳耀斑现象等引起的频率变化通常在 0.2 Hz 左右,因此采用 SVD 滤波处理极大地提高了检测到异常现象的可能性;另外,东西向频率在本地日出日落时刻出现极小值^[13],这与电离层的参数昼夜变化具有极大的关联性;④ 谐振带宽采用 SVD 滤波前后相差 1~2 Hz 左右,SVD 滤波后估计的带宽值偏小,代表滤除了部分噪声的影响,提取的 SR 可信度比较高;另外,东西向谐振带宽存在一定的昼夜变化,这种现象也主要取决于电离层的昼夜交替变化。

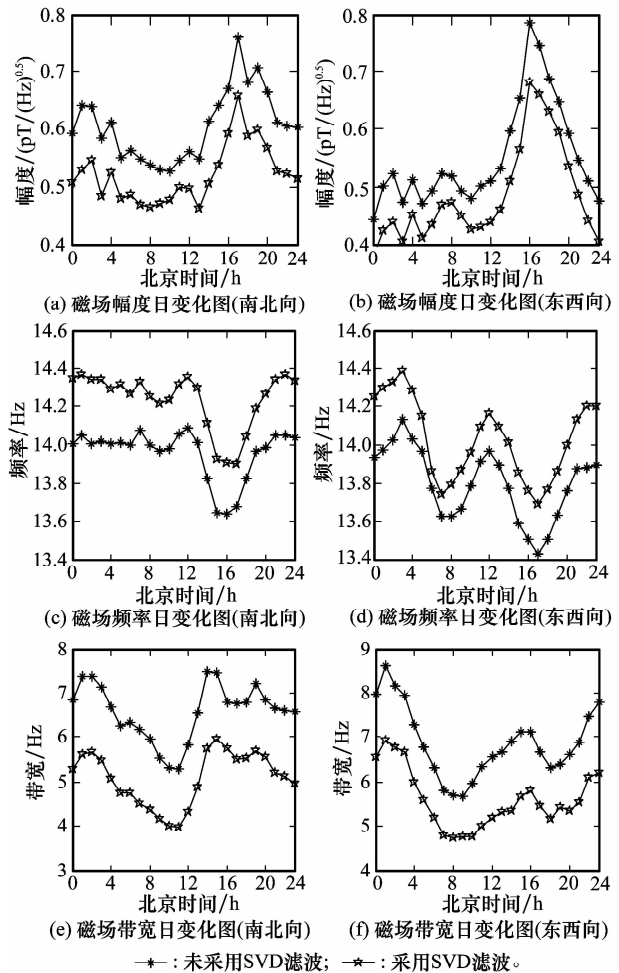


图 4 SR 采用 SVD 滤波前后的参数对比

3.3 太阳耀斑引起的 SR 频率变化

太阳的剧烈活动会引起电离层甚至低层大气空间的电离状态发生改变,这将直接影响到在地-电离层腔内传播的 SR 电磁波。目前有不少针对 SR 参数变化与太阳耀斑等现象的研究。太阳耀斑发生时,会伴随着 X 射线强度增强,紧接着出现高能粒子通量增大的现象,研究表明:一般在 X 射

线增强时,SR 各阶频率会有不同程度的增强;反之,在质子通量增强时,SR 频率会降低^[4]。目前,太阳进入第 24 个太阳活动周期,在 2011 年 02 月 05 日,出现了本周期迄今为止最强的太阳耀斑。图 5 为耀斑爆发当天威海观测站观测到的东西向 SR 一阶频率的变化曲线。可见采用 SVD 滤波前后的差值不大,变化趋势基本相同,表明对 SR 频率估计的可靠性。图 6 为太阳耀斑引起的 X 射线强度增强和质子通量增大与 SR 一阶频率变化对比图,可以看出,在 X 射线增强时频率增强,在质子通量增强时频率降低,与报道的结论基本吻合。

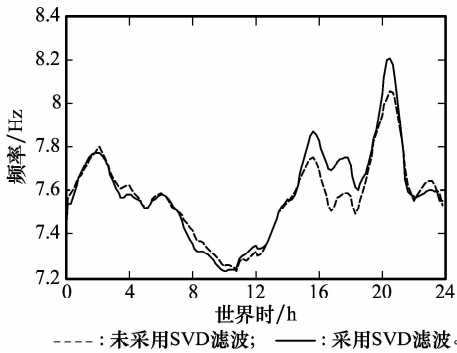


图 5 SR 一阶频率变化曲线

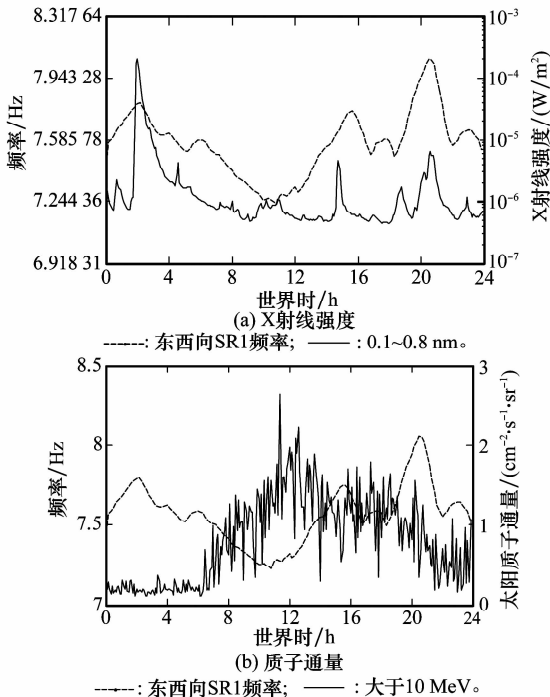


图 6 太阳耀斑与 SR 一阶频率变化对比

4 结束语

本文主要对信噪比极低的 SR 磁场观测数据的数据处理方法进行研究,分析了 Prony 算法以及谱峰拟合算法的优缺点。为了提高 SR 参数估计的可靠性,降低噪声的影响,本文首先对数据进行预处理,利用 SVD 滤波方法对采样数据进行滤波;由于噪声几乎将 SR 信号淹没,为了进

一步恢复信号,需要进行一段时间的积累,在频域进行平滑拟合,然后估计参数。在此基础上,对永胜观测站处的闪电源分布、参数变化规律以及一起耀斑事件对参数的变化进行了简单分析。分析表明:将 SVD 滤波方法应用于 SR 数据处理,效果明显,提高了参数提取的可靠性,有利于将来进一步分析 SR 的参数变化规律以及一些异常现象的提取。

参考文献:

- [1] Hayakawa M K, Ohta V M, Sorokin A K, et al. Interpretation in terms of Gyrotropic waves of Schumann-resonance-like emissions observed at Nakatsugawa in possible association with nearby Japanese earthquakes [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2010, 72 (17): 1292 - 1298.
- [2] Williams E R, Satori G. Solar radiation-induced changes in ionospheric height and the Schumann resonance waveguide on different timescales[J]. *Radio Science*, 2007, 42(2): RS2S11. doi: 10.1029/2006rs003494.
- [3] Niecharz Z, Kulak A, Zieba S, et al. Comparison of global storm activity rate calculated from Schumann resonance background components to electric field intensity Eoz[J]. *Atmospheric Research*, 2009, 91(2-4): 184 - 187.
- [4] De S S, De B K, Bandyopadhyay B, et al. Studies on the shift in the frequency of the first Schumann resonance mode during a solar proton event[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2010, 72(11-12): 829 - 836.
- [5] Simoes F, Grard R, Hamelin M, et al. The Schumann resonance: a tool for exploring the atmospheric environment and the subsurface of the planets and their satellites[J]. *Icarus*, 2008, 194(1): 30 - 41.
- [6] 曹丙霞, 乔晓林. 低电离层舒曼谐振观测[J]. 电子与信息学报, 2010, 32 (8): 2002 - 2005. (Cao B X, Qiao X L. Observations on Schumann resonance in low ionosphere[J]. *Journal of Electronic & Information Technology*, 2010, 32(8): 2002 - 2005.)
- [7] Tulunay Y, Altuntas E, Tulunay E, et al. A case study on the ELF characterization of the earth-ionosphere cavity: forecasting the Schumann resonance intensities[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2008, 70(2-4): 669 - 674.
- [8] Fullekrug M. Schumann resonances in magnetic field components[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 1995, 57(5): 479 - 484.
- [9] Nickolaenko A P, Hayakawa M. *Resonances in the earth-ionosphere cavity*[M]. Boston: Kluwer Academic Publications, 2002: 100 - 106.
- [10] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 119 - 126. (Zhang X D. *Modern signal processing*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 119 - 126.)
- [11] Fullekrug M. On the minimization of correlated residuals[J]. *Geophysical Journal International*, 1996, 126(1): 63 - 68.
- [12] 胡光书. 数字信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 441 - 445. (Hu G S. *Digital signal processing*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 441 - 445.)
- [13] Chand R, Israil M, Rai J. Schumann resonance frequency variations observed in magnetotelluric data recorded from Garhwal Himalayan region India[J]. *Annales Geophysicae*, 2009, 27(9): 3497 - 3507.