

低电离层舒曼谐振观测

曹丙霞^① 乔晓林^②

^①(哈尔滨工业大学电子与信息工程学院 哈尔滨 150001)

^②(哈尔滨工业大学(威海)信息工程研究所 威海 264209)

摘要: 舒曼谐振与大气温度变化及地震电磁前兆密切相关, 该文针对地面直接观测受环境制约严重的问题, 提出了一种新的舒曼谐振监测方法, 即人工向电离层发射高频(HF)电磁波, 与舒曼谐振产生电离层交叉调制, 通过解调 HF 波获得舒曼谐振。基于大气晴天电场作用下 HF 电磁波与舒曼谐振在低电离层的非线性调制模型, 论证了该方法的可行性; 利用我国首个舒曼谐振观测台站, 接收短波授时信号 BPM, 并在其解调谱图上得到了分别位于 7 Hz, 14 Hz, 20 Hz, 26 Hz 的舒曼谐振前 4 阶谐振峰。理论及实验表明在 HF 的解调谱上获取低电离层舒曼谐振, 是一种可行的舒曼谐振观测方式。

关键词: 舒曼谐振; 地-电离层波导; 极低频; 电离层非线性

中图分类号: TN98

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)08-2002-04

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.01535

Observations on Schumann Resonance in Low Ionosphere

Cao Bing-Xia^① Qiao Xiao-Lin^②

^①(School of Electronics and Information Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

^②(School of Information Engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, China)

Abstract: Schumann Resonance (SR) is closely related with atmospheric temperature changes and electromagnetic precursors of earthquakes. In this paper, a new method to monitor SR is proposed as the heavy environment constraints in the ground-based observing. That is to transmit High Frequency (HF) electromagnetic waves into the ionosphere, where the HF signals will be cross-modulated with SR. So it can be obtained by de-modulating the HF waves. The feasibility of the experiment is verified based on the nonlinear modulation model of HF waves and SR in the lower ionosphere, in which the fair weather electric field is taken into account. The first 4 peaks of Schumann resonance respectively at 7 Hz, 14 Hz, 20 Hz, 26 Hz are obtained in demodulation spectra of short wave timing signal BPM at the first Schumann Resonance observatory of China. The theoretical and experimental results show that it is feasible to get SR signals in the lower ionosphere from the HF demodulation spectra.

Key words: Schumann Resonance (SR); Earth-ionosphere wave guide; Extra-low frequency; Ionosphere nonlinearity

1 引言

地球和电离层构成一个谐振腔体, 其谐振频率由地球的尺寸决定^[1]。在全球雷暴和闪电活动的激励下, 产生了可绕地球传播的舒曼谐振(Schumann Resonance, SR)。1962年 Balser 和 Wagner 等在观测自然背景噪声时, 发现了位于 7.8 Hz, 14.2 Hz, 19.6 Hz, 25.9 Hz 和 32 Hz 的 SR 波谱峰。此后, 国际上开展了大量的舒曼谐振观测研究^[2, 3], 发现其参数变化与大气温度的改变^[4]和地震活动^[4-10]都有关。目前的观测主要依赖地面的感应式磁力仪等装

置进行, 这种方法的主要缺点是受观测环境制约严重, 必须选择人为噪声小的偏僻地方建站, 这大大局限了观测台站的布置。本文的 SR 观测方法基于电离层交叉调制原理, 对环境的背景噪声要求相对要低很多。

1972年 Alpert^[11]提出雷暴活动产生的自然电磁波的强度足以在 D 层电离层产生非线性效应。而舒曼谐振腔体的上边界正是电离层 D 层的底部, 即电离层白天高度 50 km -60 km 晚上 80 km -90 km 位置。如果该非线性确实存在, SR 波将使电子温度升高, 改变碰撞频率和吸收系数等参数, 经过该区域的 HF 电磁波的因传播条件被改变而受到调制。接收电离层反射的 HF 信号, 应该在其解调后频谱上得到 SR 波的谱峰。Yampolski 等人^[12]利用乌克兰

2009-12-10 收到, 2010-04-16 改回

国家科技支撑计划项目(2008BAC35B00)资助课题

通信作者: 曹丙霞 jchdd1980@163.com

的无线电天文观测中心的 UTR-2 射电望远镜天线接收俄罗斯的时间-频率服务台信号 RWS(Round-the World Signals), 观测到了调制在 RWS 上的 SR 波谱, 验证了上述理论的正确性。

Yampolski 等人的实验是在高纬度地区进行的, 地-电离层波导空腔结构复杂, 具有明显的昼夜过渡效应和纬度效应, 其高度具有明显的甚至急剧的空间变化; 在地磁场影响下, 其电特性呈现各向异性^[13]。这些都会影响到空腔中传播的 SR 信号, 因此, 在不同纬度区长期观测该现象, 有助于研究 ELF 电磁波在地-电离层波导中的传播特性, 揭示地球物理作用机制, 促进人类对地球空间的进一步认识。我国大部分地区处于中低纬度区, 因此, 对中低纬度地区的电离层非线性现象进行研究, 具有重要的意义。

为了深入研究 SR 与大气温度和地震活动的关系, 哈工大在我国中纬度东部沿海地区建立了我国第一个专用的 SR 波观测站。该站的 HF 信号接收解调系统, 天线远比 UTR-2 简单得多, 本文利用其观测数据, 最终得到了我国的 BPM 授时信号被 SR 调制的结果。

2 HF 电磁波与 SR 波的非线性作用模型

按照电离层热非线性作用理论, 低电离层非线性作用的出现, 是由于电子受到加热, 温度升高引起的。电子温度 T_e 与中子、分子温度 T 之差即为电子温度的升高值 ΔT , 根据 Gruevich^[14]的研究, 初等理论条件下(δ 、 v_e 与 T_e 无关), 加热效率取决于加热场的能量, 即

$$\Delta T \approx T(E_h^2 / E_p^2) \quad (1)$$

这里, E_h 为加热场, E_p 为等离子体场^[14], 定义为 $E_p = [3kT(m/e^2)\delta(\omega^2 + v^2)]^{1/2}$ 。

式中, k 为波尔兹曼常数, m, e 分别为电子的质量和电荷, $\delta \approx 2m/M$ 是电子和重粒子(质量为 M)碰撞引起的能量传递系数, ω 是加热场的频率, v 为有效电子碰撞频率。显然, E_p 由 $T(z)$ 、 $\delta(z)$ 、 $v(z)$ 随高度 z 的分布决定。

为了估算 SR 与 HF 电磁波的非线性作用深度, 我们首先利用 Gurevich^[14]所提供的参数得到 $E_p \approx 0.3\text{V/m}$ 。电离层 D 层作用的高度上, 还存在晴天大气电场 E_0 。正常情况下, 地面附近晴天大气电场约有 120V/m , 在 D 层高度, $E_0 \approx 0.3\text{V/m}$ 。而地表附件 $E_s \approx 3 \times 10^{-4}\text{V/m}$, 因此 $E_s \ll E_0$ 。考虑到 E_0 的存在, 加热场 $E_h = E_0 + E_s$, 得到 $E_h^2 = (E_0 + E_s)^2 \approx E_0^2 + 2E_0E_s$, E_0^2 是直流项, 代表了平均的电子加热程度; 而 $2E_0E_s$ 则代表了由 SR 波加热引起

的非线性效应; 因此可得

$$\Delta T_s \approx T(2E_0E_s/E_p^2) \quad (2)$$

该式中 ΔT_s 与 E_s 是线性比例关系, 因此, 由此得到的 $T_e(\omega)$ 的谱将重复 $E_s(\omega)$ 的谱。

在 SR 与 HF 电磁波非线性作用的电离层底部位置, 碰撞频率 v 主要是空气分子和电子的碰撞作用引起的, 用 v_{em} 表示。而 $v_{em} = 1.0 \times 10^{-19} N_m T_e^{1/2}$ ^[14](空气分子, $N_m = N_{N_2} + N_{O_2}$), 因此有 $v \approx v_0 (T_e/T)^{1/2}$, $v[T_e(t)] = v[T + \Delta T_s(t)]$, 已知 $\Delta T \ll T$, 则有

$$\begin{aligned} v[T_e(t)] &= v\left[T + \Delta T_s(t)\right] \approx v_0 \left(\frac{T + \Delta T_s}{T}\right)^{1/2} \\ &\approx v_0 \left(1 + 2\frac{E_0E_s(t)}{E_p^2}\right)^{1/2} \approx v_0 \left(1 + \frac{E_0E_s(t)}{E_p^2}\right) \end{aligned} \quad (3)$$

假设高频电磁波在电离层的传播路径上满足 $E_H = E_{H0}e^{j(kr - \omega t)}$, 这里波数 $k = k_0 + jk_1$ 。在电离层 D 层, 电子密度 $N_e \approx 10^8\text{m}^{-3}$, 得到电子等离子体频率 $\omega_p = (N_e e^2 / (\epsilon_0 m))^{1/2} \approx 6 \times 10^5\text{s}^{-1}$, 从而有 $\omega_0 \sim v \gg \omega_p$, 有 $k_0 \approx \omega_0/c$, $k_1 \approx v \cdot \omega_p^2 / [2c(\omega_0^2 + v^2)]$

$$\begin{aligned} k_1 &= k_{10} + k_{11}(t) = \frac{v \cdot \omega_p^2}{2c(\omega_0^2 + v^2)} \approx \frac{v_0 \cdot \omega_p^2}{2c(\omega_0^2 + v^2)} \\ &\cdot \left(1 + \frac{E_0E_s(t)}{E_p^2}\right) = k_{10} + k_{11} \frac{E_0E_s(t)}{E_p^2} \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $k_{10} = \frac{v_0 \cdot \omega_p^2}{2c(\omega_0^2 + v^2)}$, $k_{11}(t) = k_{10} \frac{E_0E_s(t)}{E_p^2}$ 。

HF 电磁波在 SR 波的扰动区域中随时间 t 变化的衰减仅取决于 $e^{-k_{11}(t)L}$ (L 是高频波在电离层中传播的等效路径长度), 由于 $-k_{11}(t)L \ll 1$, 高频波的波函数表达为

$$E_H = E_{H0} \cdot e^{j(k_0 r - \omega_0 t)} e^{-k_{10} L} \left(1 - k_{10} L \frac{E_0E_s(t)}{E_p^2}\right) \quad (5)$$

SR 波对高频波的调制度为 $\mu = k_{10} L \frac{E_0E_s(t)}{E_p^2}$, 带入 k_{10} 得到

$$\mu = \frac{v_0 \cdot \omega_p^2}{2c(\omega_0^2 + v^2)} L \frac{E_0E_s(t)}{E_p^2} \quad (6)$$

由式(6)可知, SR 信号 $E_s(t)$ 对 HF 电磁波的幅度进行了调制, 调制度与 $E_s(t)$ 成正比, 因此, 对接收的 HF 电磁波信号进行频谱分析, 可得到 $E_s(\omega)$ 的谱。

3 测量分析

本系统接收来自陕西蒲城国家授时中心发播的 BPM 授时信号, 载波频率 10MHz , 接收机的频率

稳定度为 2×10^{-8} / 日。BPM 每隔 25 min 发播 5 min 的连续波(CW)信号, 谱分析就是利用这些 CW 信号进行的。系统的接收采用交叉偶极子天线, 架设在某小山坡顶部。天线两个拉杆的距离约 30 m, 包括高度 15 m 的 5 MHz 和高度 8 m 的 10 MHz 交叉偶极子水平极化天线; 同时系统还包括了一根长 15 m 的垂直极化鞭形天线。

一般说来, 对于 2000 km 以内的短波通信线路, 1F 模式对接收点的场强起主要贡献作用^[15]。1F 传播模式下, 取电离层虚高取 150 km。BPM 发射中心蒲城距离接收站约 1160 km, SR 在电离层的厚度为 10 km。按照三角形计算估算得 $L \approx 74$ km, 取 $\omega_0 \approx 10 \times 2 \times \pi \times 10^6 \text{ s}^{-1}$, 代入公式 (6) 得 $\mu = 4.2 \times 10^{-4}$; 考虑到其他传播模式的作用, 调制深度 μ 应该略大于该值。这与 Yampolski 等^[12]的结论在数量级上是一致的。

4 信号谱分析

接收 BPM 信号后, 在靠近载波 $f_0 = 10$ MHz 的 50 Hz 带宽范围内, 进行了 BPM 幅度谱 $A(\omega)$ 的分析:

$$A(\omega) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |F(\omega, t_i)|^2} \quad (7)$$

其中 $F(\omega, t_i) = \frac{2}{T} \int_{t_i}^{t_i+T} U(t) \cdot e^{j\omega t} dt$ 是信号 $U(t)$ 的谱,

$A(\omega)$ 是 N 个频谱的平均。这里, $t_i = t_0 + (i-1)T$, $i = 1, 2, \dots, N$, t_0 是数据观测的起始时间, T 是进行变换的时间长度。数据分析的过程中, 分别变换 T 和 N 的值从 1 s 到 20 s 和 300 到 15, 以求取最佳的处理结果。

图 1 中 SR 第 1 阶本征频率(7 Hz 左右)、第 2 阶本征频率(14 Hz 左右)、第 3 阶本征频率(20 Hz 左右)以及第 4 阶本征频率(26 Hz 左右)对应的谱峰在 BPM 信号解调后的谱图中都比较明显, 但各谱峰对应频率和大小的具体值都被信号上的毛刺模糊

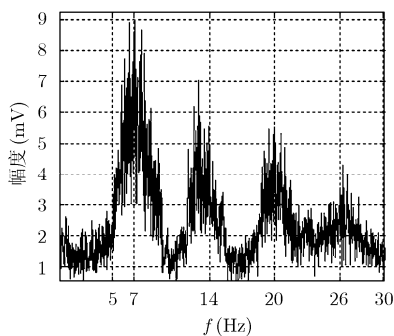


图 1 BPM 解调后得到的 SR 谱图

了。因此, 对上述的频域数据进行均值平滑处理如下:

$$A'(1) = A(1)$$

$$A'(i) = 0.5 * (A(i) + A(i-1)), \quad i = 2, 3, \dots, n$$

其中 $n = B \cdot N / f_s$, B 是我们感兴趣的带宽, 例如我们只关心 40 Hz 以内的信号, 则取 $B=40$, N 是 A 的长度, f_s 是采样频率。经过多次平滑处理后的结果如图 2 所示。

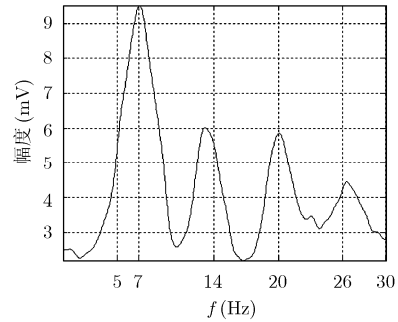


图 2 平滑处理后的 SR 谱图

数据作平滑处理后, 得到的 SR 各阶谱峰的频率和幅度特性都较前面的图更清楚。根据 HF 电磁波与 SR 波的非线性作用模型, SR 对电子加热是由其电场分量 E_{SR} 引起的; 而根据式(6), 解调后的各谱峰对应了 SR 在低电离层位置的电场 E_{SR} 的各阶谱的特性。地面测量可以直接得到地面附近的 SR 波电场和磁场分量, 结合两者作定量分析, 或许是进一步研究 ELF 的地-电离层波导传播特性的有效方法之一。而要得到 E_{SR} 的绝对值, 还需要对系统进一步标定, 得到输入天线的载波电场实际值和载波与 SR 电场的比值即 μ , 从而可以对 SR 在低电离层的电场测量进行量化分析。

5 结束语

本文基于大气电场作用下 SR 信号与 HF 电磁波的非线性作用模型, 理论上估算了该研究的可行性; 并利用我国首个专用的舒曼谐振观测台站, 在短波授时信号 BPM 解调后的频谱中得到了位于 7 Hz, 14 Hz, 20 Hz, 26 Hz 的谱峰, 进一步验证了理论模型的正确性。本文虽然得到了各谱峰的频率和相对幅度特性。但要进行系统标定, 得到输入天线的载波电场实际值和载波与 SR 电场的比值, 即调制度 μ 。

本文接收系统的短波天线相比 UTR-2 射电望远镜天线, 结构简单, 方便监测台站的建设; 实验结果证明, 解调与 SR 非线性作用后的 HF 信号, 也是一种可行的 SR 监测方式, 这对我国未来在 SR 监

测及电离层探测等领域的研究也是一种新的启发。

VLF 电磁波在地-电离层波导中传播, 因此, 可以推断 VLF 与 ELF 谐振信号的非线性作用同样存在。已知 $\omega_0 \sim v \gg \omega_p$, 而 $\omega_{\text{VLF}} \ll \omega_{\text{HF}}$ 并且 $\mu \propto 1/(\omega_0^2 + v_0^2)$, SR 信号强度非常稳定: 理论上讲, SR 与 VLF 电磁波的非线性作用更强。因此, 未来可研究 VLF 与自然界 ELF 谐振信号的非线性作用。

参 考 文 献

- [1] Schumann W O. Über die ausbreitung sehr langer elektrischer wellen um die signale des blitzes. *Nuovo Cimento* 1952, 9(12): 1116-1138.
 - [2] Morente J A, Port J A, and Salinas A, *et al.* Evidence of electrical activity on titan drawn from the schumann resonances sent by huygens probe. *International Journal of Solar System Studies*, 2008, 195(2): 802-811.
 - [3] Nieckarz Z, Kulak A, and Zieba S, *et al.* Comparison of global storm activity rate calculated from schumann resonance background components to electric field intensity E_{0z} . *Atmospheric Research*, 2009, 91(2-4): 184-187.
 - [4] Hayakawa M, Nickolaenko A P, and Sekiguchi M, *et al.* Anomalous elf phenomena in the schumann resonance band as observed at moshiri (japan) in possible association with an earthquake in taiwan. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2008, 8(6): 1309-1316.
 - [5] Ohta K, Izutsu J, and Hayakawa M. Anomalous excitation of schumann resonances and additional anomalous resonances before the 2004 mid-niigata prefecture earthquake and the 2007 noto hantou earthquake. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2009, 34(6-7): 441-448.
 - [6] Ohta K, Watanabe N, and Hayakawa M, *et al.* Electromagnetic fields and schumann resonance on taiwai earthquakes. in *Electromagnetic Compatibility 2004*, 17th International Wroclaw Symposium and Exhibition. Poland, 2004.
 - [7] Ohta K, Watanabe N, and Hayakawa M. Survey of anomalous schumann resonance phenomena observed in japan, in possible association with earthquakes in taiwan. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2006, 31(4-9): 397-402.
 - [8] Hayakawa M, Ohta K, and Nickolaenko A P, *et al.* Anomalous effect in schumann resonance phenomena observed in japan, possibly associated with the chi-chi earthquake in taiwan. *Annales Geophysicae*, 2005, 23(4): 1335-1346.
 - [9] Nickolaenko A P, Hayakawa M, and Sekiguchi M, *et al.* Model modifications in schumann resonance intensity caused by a localized ionosphere disturbance over the earthquake epicenter. *Annales Geophysicae*, 2006, 24(2): 567-575.
 - [10] 曹丙霞, 乔晓林. 基于地球-电离层空腔共振的地震电磁监测方法研究. *国际地震动态*, 2009, (7): 22-26.
 - [11] Alpert Y L. Propagation of electromagnetic waves and the ionosphere. *Nauka*, 1972, 1(1): 563.
 - [12] Yampolski Y M, Bliokh P V, and Beley V S, *et al.* Non-linear interaction between schumann resonances and hf signals. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 1997, 59(3): 335-342.
 - [13] Nickolaenko A P and Hayakawa M. *Resonances in the Earth-Ionosphere Cavity*. Netherlands: Kluwer Academic Publishers. 2002: 156-169.
 - [14] Gurevich A V. *Nonlinear Phenomena in the Ionosphere*. New York: Springer. 1978: 113-114.
 - [15] 肖景明, 王元坤. *电波传播工程计算*. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1989: 47-48.
- 曹丙霞: 女, 1980 年生, 博士生, 从事电离层非线性及地震电磁异常等研究。
- 乔晓林: 男, 1948 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向主要包括极化雷达信号处理、电子对抗和反对抗技术等, 电离层非线性及地震电磁监测等。