0254-6124/2013/33(3)-286–07 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Liu Yanan, Liu Xuecai, Wang Jian, Lin Fajun. Adaptive prediction of maximum usable frequency in high-frequency communication. *Chin. J. Space Sci.*, 2013, **33**(3): 286-292

高频通信最大可用频率的自适应预报 *

刘亚南[1] 刘学才[2] 王 健[1] 蔺发军[1]

1(中国电波传播研究所 青岛 266107)

2(中国人民解放军 61846 部队 涿州 250013)

摘 要 引入 Volterra 级数自适应混沌预报方法, 实现了高频通信最大可用频率的自适应预报. 基于青岛至新乡 2007 年 3 月和 2012 年 3 月最大可用频率观测数据, 通过不同太阳活动期单步预报、不同步长短期预报和不同训练样本长度预报结果的统计, 分析验证了方法的精确性、适应性和有效性. 分析结果表明, 采用 Volterra 级数自适应混沌预报方法进行超短期预测可以取得较好的预报结果, 适用于不同太阳活动期; 预测步长不大于 1/12 周期时, 预报均方根误差均小于 0.79 MHz, 与基于最大 Lyapunov 指数预报方法的结果对比表明, 该方法在观测数据少和信道时变特性强等情形下仍具有较高精度且应用简便. 其为高频频率预报技术的深入研究提供了基础.

关键词 高频通信, 最大可用频率, 自适应预测

中图分类号 P 352

Adaptive Prediction of Maximum Usable Frequency in High-frequency Communication

LIU Yanan[1] LIU Xuecai[2] WANG Jian[1] LIN Fajun[1]

1(*China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao* 266107)

2(*Unit 61846 of PLA, Zhuozhou* 250013)

Abstract In order to realize the adaptive prediction of maximum usable frequency in high-frequency communication, Volterra adaptive method is introduced. Based on the oblique sounding data of chain from Qingdao to Xinxiang in March 2007 and 2012, single-step prediction in different solar activity years and short-term prediction of different steps and training samples length are conducted to validate accurateness, adaptability and validity of this method. Results indicate that the super short-term prediction adopting Volterra adaptive method has good agreement with oblique sounding data and this method is suitable for different solar activity periods. When the prediction step is not more than 1/12 period, RMSE is less than 0.79 MHz. Comparison with prediction results of Lyapunov exponent method shows that Volterra adaptive method can gain upper precision in the situation of less data, time-varying channel *etc.*, and the practical application is more convenient. The method

* 广东联合基金项目资助 (U1035002)

2012-12-17 收到原稿, 2013-03-21 收到修定稿

E-mail: lc19851225@126.com

provides a basis for in-depth study of high frequency prediction technology.

Key words High-frequency communication, Maximum usable frequency, Adaptive method

0 引言

高频通信可用频率预报是指为确保短波通信电路能够可靠通信, 对通信电路的可用频率进行预报, 用于通信选频. 对于短波频率的长期预报, 国际电信联盟 (ITU) 提供了有效的方法 [1], 而对于短期预报和准实时预报, 目前主要有自相关法 [2]、内插外推及准实时预测图方法 [3]、返回散射技术 [4]、卡尔曼滤波方法 [5]、七天加权平均和内插法 [6] 以及三点寻找极值方法 [7] 等. Wang 等基于斜向探测数据, 利用混沌理论对链路本身可用频率的短期预报方法进行了探索 [8]. 基于最大 Lyapunov 指数的预测方法将混沌理论与可用频率预报相结合, 实现了链路本身最大可用频率的短期预报 [8], 但该方法自适应能力较差, 对于观测数据不完整以及信道时变特性强的情况, 预测精度较低.

本文基于高频通信最大可用频率的混沌特性, 以实测斜向探测数据为基础, 引入 Volterra 级数自适应混沌预报方法, 实现了对高频通信最大可用频率的准实时或短期预报, 并进一步分析了预报精度与预报步长的关系.

1 自适应预报方法

混沌时间序列的自适应预报方法是根据当前获得的数据和预测误差不断修正模型参数来进行预报的一种方法, 其是近年内发展起来的一种预报方法 [9−12]. 常用的有 Volterra 级数自适应预报法、基于 Sigmoid 函数的 Volterra 自适应滤波器法和重构系统方程自适应预报法等 [11−12].

1.1 相空间重构

相空间重构是混沌时间序列预报的基础 [14]. Packard 等 [15] 和 Takens[16] 提出利用延迟坐标法对混沌时间序列 $\{x(n), n = 1, 2, \cdots, N\}$ 进行相空间重构 [17−20], 即选择嵌入维数 m, 由 $x(n)$ 得到一组新的矢量序列, 即

$$\boldsymbol{X}(n) = \{x(n), x(n+\tau), \cdots, x[n+(m-1)\tau]\}^{\mathrm{T}}. \tag{1}$$

式中, $n = 1, 2, \cdots, M$, 这里 $M = N - (m-1)\tau$, τ 为延迟时间, 这个由观测值及其延时值构成的 m 维状态空间即为重构的相空间. 相空间嵌入维数存在下界, 即 $m \geqslant 2D + 1$, D 为混沌系统的奇异吸引子维数.

相空间重构的关键是选择合适的嵌入维数 m 和延迟时间 τ[21−26]. 常用计算嵌入维数的方法有饱和关联维数 (G-P) 法 [26]、伪最近邻域法、真实矢量场法和 Cao 法 [24] 等, 计算延迟时间的方法有自相关法、平均位移法、复自相关法和互信息法等. 1999 年 Kim 等 [25] 提出 C-C 法, 可以同时估算嵌入维数和延时时间. C-C 法提高了重构相空间的质量, 同时具有容易操作、计算量小、对小数据组可靠和较强的抗噪能力等优点. 本文采用 C-C 法计算嵌入维数和延迟时间.

1.2 Volterra 级数自适应预报法

Volterra 级数自适应预报法能对混沌时间序列进行精确预报, 具有训练数据小、易于软硬件实现、能自适应跟踪混沌的运动轨迹以及预报精度较高等优点 [12−14]. 其原理如下.

设非线性离散动力系统的输入为

$$\boldsymbol{X}(n) = [x(n), x(n-1), \cdots, x(n-N+1)],$$

输出为

$$y(n) = x'(n+1),$$

则该非线性系统函数的 Volterra 级数展开式为

$$\begin{aligned} x'(n+1) = F[x(n)] = {} & h_0 + \sum_{m=0}^{+\infty} h_1(m)x(n-m) + \\ & \sum_{m_1=0}^{+\infty}\sum_{m_2=0}^{+\infty} h_2(m_1, m_2)x(n-m_1)x(n-m_2) + \cdots + \\ & \sum_{m_1=0}^{+\infty}\sum_{m_2=0}^{+\infty}\cdots\sum_{m_p=0}^{+\infty} h_p(m_1, m_2, \cdots, m_p)\cdot \\ & x(n-m_1)x(n-m_2)\cdots x(n-m_p) + \cdots . \end{aligned} \tag{2}$$

式中, $h_p(m_1, m_2, \cdots, m_p)$ 为 p 阶 Volterra 核.

在实际应用中, 考虑到工程可实现性, 采用二阶

截断求和形式, 则用于混沌时间序列预报的滤波器为

$$x'(n+1)= h_0+\sum_{m=0}^{N_1-1}h_1(m)x(n-m)+ \sum_{m_1=0}^{N_2-1}\sum_{m_2=0}^{N_2-1}h_2(m_1,m_2)x(n-m_1)x(n-m_2). \tag{3}$$

式中, N_1 和 N_2 为滤波器的长度, 为有限长. 式 (3) 自适应滤波器可描述为图 1 所示的结构.

根据 Takens 嵌入定理, 取

$$N_1=N_2=m\geqslant 2D+1.$$

则式 (3) 可变换为

$$x'(n+1)=h_0+\sum_{m=0}^{m-1}h_1(i)x(n-i)+ \sum_{i=0}^{m-1}\sum_{j=i}^{m-1}h_2(i,j)x(n-i)x(n-j). \tag{4}$$

定义线性自适应 FIR 滤波器的输入矢量 $\boldsymbol{U}(n)$ 和系数矢量 $\boldsymbol{H}(n)$ 分别为

$$\boldsymbol{U}(n)=[1,x(n),x(n-1),\cdots,x(n-m+1),x^2(n), x(n)x(n-1),\cdots,x^2(n-m+1)]^{\mathrm{T}}; \tag{5}$$

$$\boldsymbol{H}(n)=[h_0,h_1(0),h_1(1),\cdots,h_1(m-1),h_2(0,0), h_2(0,1),\cdots,h_2(m-1,m-1)]^{\mathrm{T}}. \tag{6}$$

则式 (4) 可表示为

$$x'(n+1)=\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}(n)\boldsymbol{U}(n). \tag{7}$$

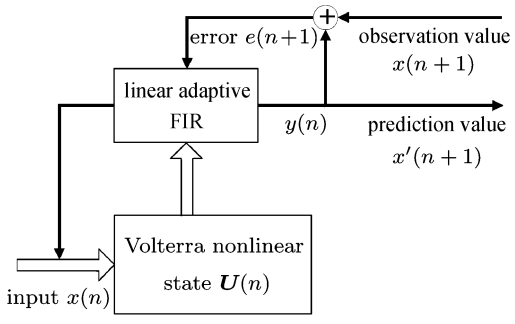

图 1 Volterra 自适应滤波器结构

Fig. 1 Sketch of Volterra adaptive filter

对于式 (7) 描述的二阶 Volterra 自适应滤波器, 采用时间正交 (TDO) 自适应算法来确定其中的系数. TDO 自适应算法可表示为

$$x'(n)=\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}(n-1)\boldsymbol{U}(n-1), \tag{8}$$

$$\boldsymbol{H}(n)=\boldsymbol{H}(n-1)+c\times\frac{e(n-1)}{\boldsymbol{U}^{\mathrm{T}}(n)\boldsymbol{U}(n)}\boldsymbol{U}(n-1), \tag{9}$$

$$e(n)=x(n)-x'(n). \tag{10}$$

式中, c 为控制收敛性能参数.

2 预测实例及分析

2.1 探测数据采集

2007 年 3 月和 2012 年 3 月采集了青岛至新乡斜向探测链路的实时探测数据, 探测链路距离约为 600 km, 每 0.5 h 记录一个点, 每天记录 48 个点, 全月共记录 1488 个点. 2007 年 3 月的太阳黑子 12 月平均流动值约为 11, 为太阳活动低年; 2012 年 3 月的太阳黑子 12 月平均流动值约为 67, 为太阳活动中期.

采用滤波器去除高频分量的方法 [27] 进行噪声平滑预处理, 降低噪声的影响.

2.2 MUF 自适应预报

2.2.1 不同太阳活动期的单步预报

基于 2007 年 3 月和 2012 年 3 月斜向探测数据, 采用 Volterra 级数自适应预报法, 分别对高频通信最大可用频率进行单步预报.

应用 C-C 法计算去噪后 MUF 序列对应的嵌入维数和延迟时间, 可得 MUF 序列嵌入维数 $m=3$, 延迟时间 $\tau=8$.

利用 3 月 1—10 日 10 周期的 MUF 探测数据作为训练样本, 3 月 11—31 日的 MUF 实测数据作为测试样本, 采用二阶 Volterra 级数自适应模型, 自适应收敛性能参数 c 取 1.2, 用训练好的 Volterra 级数自适应预报模型进行高频通信最大可用频率单步预报, 结果如图 2 所示.

图 2(a) 和 (c) 分别为 2007 年 3 月和 2012 年 3 月实测值与预报值的比较, 图 2(b) 和 (d) 为对应预报值与实测值之间的相对偏差, 其表达式为

$$E_{\mathrm{n}}(i)=\frac{P_i-O_i}{O_i}. \tag{11}$$

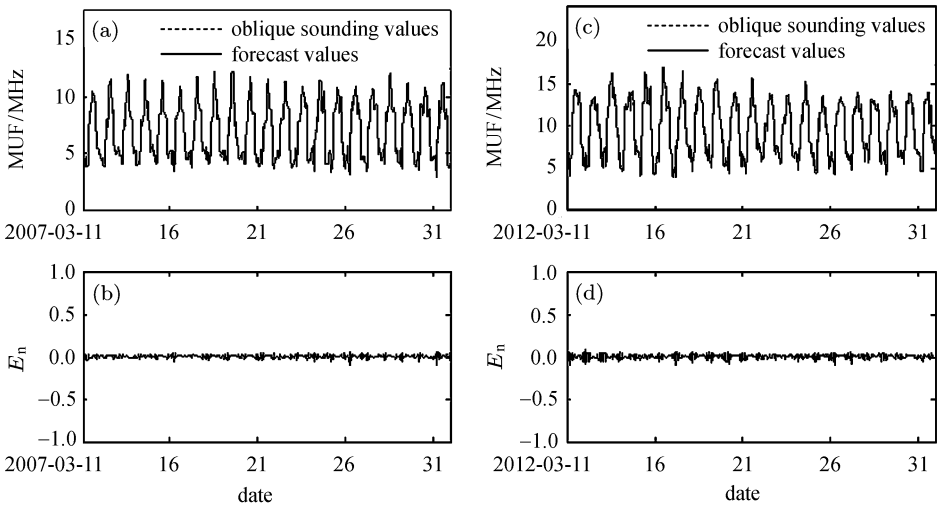

图 2 单步预报实测值与预报值比较 (2007 年 3 月和 2012 年 3 月)

Fig. 2 Comparison of single-step forecast values and oblique sounding values (in March 2007 and March 2012)

式中, Q_i $(i=1,2,\cdots,N)$ 和 P_i $(i=1,2,\cdots,N)$ 分别为实测值和预报值.

定义均方根误差为

$$E_{\mathrm{RMSE}}=\sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(P_i-O_i)^2}, \tag{12}$$

相对均方误差为

$$E_{\mathrm{RE}}=\frac{\sum_{i=1}^{N}(P_i-O_i)^2}{\sum_{i=1}^{N}O_i^2}, \tag{13}$$

平均相对误差为

$$E_{\mathrm{NAE}}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{|P_i-O_i|}{O_i}\times 100\%. \tag{14}$$

用上述三个指标来分析预报结果随预报期、预报步长以及训练样本长度等的变化情况 [28−29]. 根据仿真结果可以得到不同太阳活动期单步预报的均方根误差、相对均方误差及平均相对误差, 具体对比列于表 1.

从图 2 中相对偏差曲线和表 1 误差分析可以看出, 该方法用 10 周期的历史数据对不同太阳活动期进行单步预报, 均能得到很高的预报精度, 预报结果稳定, 实现简便快捷. 相比而言, 该方法在太阳活动低年预报精度更高.

2.2.2 不同步长的预报

利用 2007 年 3 月 1−10 日 10 个周期的 MUF 探测数据作为训练样本, 3 月 11−31 日的 MUF 实测数据作为测试样本, 应用 Volterra 级数自适应预报法分别对高频通信最大可用频率进行单步预报、2 步预报、4 步预报以及 8 步预报, 预报相对偏差曲线如图 3 所示.

分析高频通信最大可用频率预报精度随预报步长的变化情况, 结果列于表 2.

表 1 不同太阳活动期单步预报模型误差分析

Table 1 Error analysis of single-step forecast results in different solar activity epochs

太阳活动期	E_{RMSE}/MHz	E_{RE}/(%)	E_{NAE}/(%)
低年	0.0920	1.54×10^{-2}	1.17
中期	0.1825	3.29×10^{-2}	1.75

表 2 不同步长预报误差分析

Table 2 Error analysis of forecast with different steps

预报步长	E_{RMSE}/MHz	E_{RE}/(%)	E_{NAE}/(%)
单步	0.0920	1.54×10^{-2}	1.17
2 步	0.3262	0.19	3.76
4 步	0.7843	1.12	8.69
8 步	1.4766	3.97	15.14

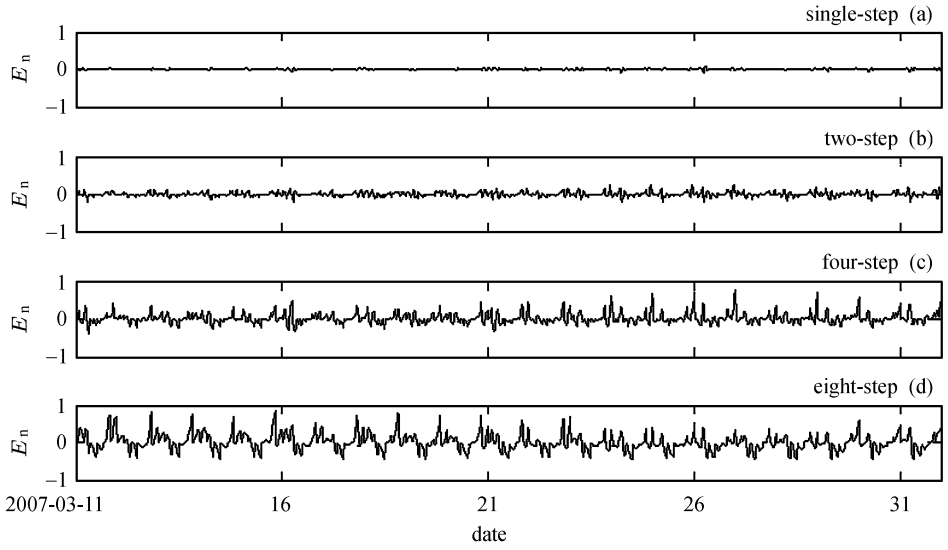

图 3 单步预报、2 步预报、4 步预报及 8 步预报的相对偏差比较

Fig. 3 Error comparison of single-step, two-step, four-step and eight-step forecast

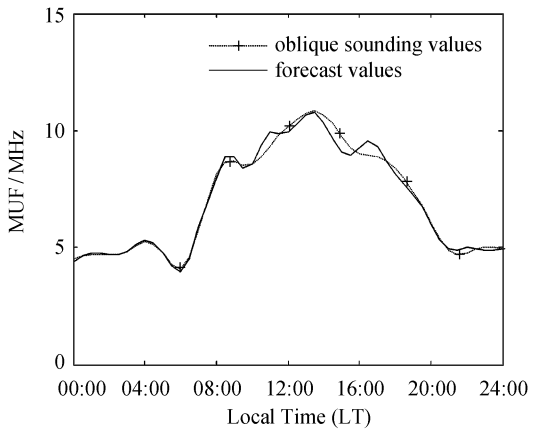

图 4 依据 2007 年 3 月 1 日 5/12 周期探测数据进行单步预报的实测值与预报值比较

Fig. 4 Comparison of single-step forecast with oblique sounding values based on sounding data of 5/12 periods on March 1, 2007

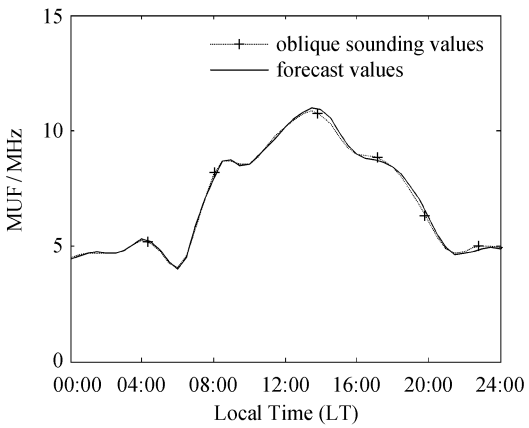

图 5 依据 2007 年 3 月 1 日 1/2 周期探测数据进行单步预报的实测值与预报值比较

Fig. 5 Comparison of single-step forecast and oblique sounding values based on sounding data of 1/2 period on March 1, 2007

从图 3 和表 2 可以看出, 该方法利用 10 周期的历史数据进行短期预报, 可达到很高的预报精度, 特别是对于准实时预报, 精度很高, 预报结果稳定, 实现简便快捷. 但是随着预报步长的增加, 预报精度降低较快, 当预报步长为 1/6 周期时, 预报均方根误差已经相对较大, 因此, 该种方法适用于准实时和短期预报, 预报步长不大于 1/6 周期.

2.2.3 不同长度训练样本的预报

利用 2007 年 3 月 1 日的 5/12 周期、1/2 周期的 MUF 探测数据作为训练样本, 3 月 2 日的 MUF 实测数据作为测试样本, 应用 Volterra 级数自适应预报法对高频通信最大可用频率进行单步准实时预报, 结果如图 4~5 所示. 预报精度随训练样本长度的变化情况列于表 3.

表 3 不同长度训练样本预报误差分析

Table 3 Error analysis of forecast with different length of training samples

训练样本长度	E_{RMSE}/MHz	E_{RE}/%	E_{NAE}/%
19/48 周期	2.9582	0.1576	23.09
5/12 周期	0.4200	0.0032	3.55
1/2 周期	0.1749	5.5238×10^{-2}	1.77
10 周期	0.0920	1.5410×10^{-2}	1.17

从图 4、图 5 和表 3 中可以清晰看出, 该方法只用 5/12 周期的训练样本即可有效反映高频通信最大可用频率序列未来变化的趋势, 并可达到很高的预报精度, 均方根误差仅为 0.42 MHz, 小于基于 Lyapunov 指数预报方法采用 25 个周期训练样本得到的预报均方根误差 0.96 MHz[8]. 说明该方法适用于已知数据量少的 MUF 预报. 而少于 5/12 周期训练样本进行预报得到的预报结果不太理想, 因此, 该方法的使用要求至少有 5/12 周期的观测值, 才能达到高精度的最大可用频率预报.

分析研究图 4 和图 5 中预报值与实测值的对比曲线, 可以发现该方法在每天 04:00 LT−07:00 LT 和 12:00 LT−14:00 LT 信道时变特性比较强时, 仍能高精度地预报高频通信最大可用频率.

3 结论

基于 Volterra 级数自适应混沌预报方法进行高频通信最大可用频率的自适应预报, 适用于不同太阳活动期, 小于 1/6 周期的短期预报取得了很好的预报结果, 不大于 1/12 周期的预报均方根误差的最大值仅为 0.7843 MHz, 平均相对误差小于 9%; 同时只需 5/12 周期的实测数据就能取得与实测值吻合极好的预报值, 均方根误差仅为 0.42 MHz, 平均相对误差小于 4%.

预报结果表明, Volterra 级数自适应预报法在观测数据量小及信道时变特性强等情形下仍具有较高精度, 能够反映出最大可用频率序列未来变化趋势, 预测结果稳定, 实现简单、快捷. 该方法为高频通信最大可用频率预报提供了一种有效途径, 对确保高频通信电路可靠通信、通信选频及频谱管理、单站定位等扩展领域 [30−31] 的应用具有工程参考价值.

参考文献

[1] International Telecommunications Union. HF propagation prediction method [P], Recommendation ITU-R 533-8. 2005

[2] Huang Deyao. Quasi-real-time forecast method of the shortwave circuit MUF [J]. *J. China Inst. Comm.*, 1991, **12**(6):103-105. In Chinese (黄德耀. 短波电路最高可用频率准实时预报方法 [J]. 通信学报, 1991, **12**(6):103-105)

[3] Gao Qing. A quasi-real-time prediction technique for HF communication [J]. *J. China Inst. Comm.*, 1987, **8**(3):79-82. In Chinese (高清. 短波电路中的准实时预报技术 [J]. 通信学报, 1987, **8**(3):79-82)

[4] Si Jiacai. P-D transfer with tilted ionosphere and prediction of MUF [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 1995, **15**(1):53-58. In Chinese (司家才. 计及电离层倾斜的 P-D 变换及其短波通信 MUF 的预报方法 [J]. 空间科学学报, 1995, **15**(1):53-58)

[5] Xu Bin, Wu Yonghong, Liu Yimin. Maximum usable frequency adaptive prediction [J]. *Chin. J. Radio Sci.*, 2011, **26**(4):699-703. In Chinese (徐彬, 吴永宏, 刘毅敏. 最高可用频率自适应预报 [J]. 空间科学学报, 2011, **26**(4):699-703)

[6] Li Guangjun, Liu Huiwen. Short-term frequency forecast for shortwave communication [J]. *Milit. Comm. Tech.*, 1988, **28**(4):68-71. In Chinese (李广军, 刘会文. 短波通信中的短期频率预报方法 [J]. 军事通信技术, 1988, **28**(4):68-71)

[7] Zhao Zhian. A prediction method of MUF and models for radio short wave [J]. *J. China Inst. Comm.*, 1987, **8**(3):54-60. In Chinese (赵志安. 短波通信 MUF 和传播模式的预报方法 [J]. 通信学报, 1987, **8**(3):54-60)

[8] Wang Jian, Fu Wei. Prediction of maximum usable frequency in shortwave communication base on chaos theory [J]. *Chin. J. Radio Sci.*, 2007, **22**(Supp.):442-445. In Chinese (王健, 付炜. 基于混沌理论的短波通信最高可用频率预测 [J]. 电波科学学报, 2007, **22**(增刊):442-445)

[9] Narendra K S, Parthasarathy K. Identification and control of dynamical systems using neural networks [J]. *IEEE Trans. Neural Networks*, 1990, **1**(1):4-27

[10] Haykin S, Li L. Nonlinear adaptive prediction of nonstationary signals [J]. *IEEE Trans. Sign. Proc.*, 1995, **43**(2):526-535

[11] Roy E, Srewart R W, Durrani T S. Higher-order system identification with an adaptive recursive second-order polynomial filter [J]. *IEEE Sign. Proc. Lett.*, 1996, **3**(10):276-279

[12] Han Min. Prediction Theory and Method of Chaotic Time Series [M]. Beijing: China Water Power Press, 2007. 168-185. In Chinese (韩敏. 混沌时间序列预测理论与方法 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007. 168-185)

[13] Zhang Jiashu, Xiao Xianci. Predicting low-dimensional chaotic time series using Volterra adaptive filters [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2000, **49**(3):403-408. In Chinese (张家树, 肖先赐. 混沌时间序列的 Volterra 自适应预测 [J]. 物理学报, 2000, **49**(3):403-408)

[14] Liang Cunfeng. Flood forecast based on the chaotic volterra adaptive model [J]. *J. Water Res. Water Eng.*, 2011, **22**(1):146-150. In Chinese (梁存峰. 基于混沌 Volterra 自适应模型的洪水预测研究 [J]. 水资源与水工程学报, 2011, **22**(1):146-150)

[15] Packard N H, Crutchfield J P, Farmer J D, *et al.* Geometry from a time series [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1980, **45**(9):712-716.

[16] Takens F. Determing strange attractors in turbulence [C]//Dynamical Systems and Turbulence, Lecture Notes in Mathematics. Berlin: Springer-Verlag, 1981, **898**:361-381

[17] Kugiumtzis D. State space reconstruction parameters in the analysis of chaotic time series — the role of the time window length [J]. *Physica*: *D*, 1996, **95**(1):13-28

[18] Lü Jinhu, Lu Junan, Chen Shihua. Analysis and Application of Chaos Time Series [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2002. In Chinese (吕金虎, 陆君安, 陈士华. 混沌时间序列分析及其应用 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002)

[19] Chen Keng, Han Botang. A survey of state space reconstruction of chaotic time series analysis [J]. *Comput. Sci.*, 2005, **32**(4):67-70. In Chinese (陈铿, 韩伯堂. 混沌时间序列中相空间重构技术综述 [J]. 计算机科学, 2005, **32**(4):67-70)

[20] Meng Qingfang. Prediction Methods and Application of Chaos Time Series [D]. Jinan: Shandong University, 2005. In Chinese (孟庆芳. 混沌时间序列预测方法及其应用 [D]. 济南: 山东大学, 2005)

[21] Fraser A M, Swinney H L. Independent coordinates for strange attractor from mutual information [J]. *Phys. Rev. A*, 1981, **33**(2):1134-1140

[22] Resenstein M T, Collins J J, De L J C, *et al.* Reconstruction expansion as a geometry-based framework for choosing proper delay times [J]. *Physica*: *D*, 1994, **73**(1/2):82-89

[23] Kennel M B, Brown R, Abarbanel H D, *et al.* Determining embedding dimension for phase space reconstruction using a geometrical construction [J]. *Phys. Rev*: *A*, 1992, **45**(6):3403-3411

[24] Cao Liangyue. Practical method for determining the minimum embedding dimension of a scalar time series [J]. *Physica*: *D*, 1997, **110**(1/2):43-50

[25] Kim H S, Eykholt R, Salas J D. Nonlinear dynamics, delay times and embedding windows [J]. *Physica*: *D*, 1999, **127**(1/2):48-60

[26] Grassberg P, Procaccia I. Characterization of strange attractors [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1983, **189**:45-51

[27] Liu Yuhua. The Study of Noise Smoothing Methods on Chaotic Time Series [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005. In Chinese (刘玉花. 混沌时间序列的噪声平滑方法研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2005)

[28] Jiang Xiangchao, Zheng Junli. Analysis of algorithms and error evaluation criteria in chaotic neural network predictions [J]. *J. Tsinghua Univ.* (*Sci. Tech.*), 2001, **41**(7):43-46. In Chinese (简相超, 郑君里. 混沌神经网络预测算法评价准则与性能分析 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2001, **41**(7):43-46)

[29] Chen J L, Islam S, Pratim B. Nonlinear dynamics of hourly ozone concentrations: nonparametric short term prediction [J]. *Atmos. Envir.*, 1998, **32**(11):1839-1848

[30] Wang Jian, Fu Wei, Feng Xiaozhe, *et al.* Technique on high-frequency single-site location in short distance [J]. *Electron. Inf. Warfare Tech.*, 2009, **24**(1):25-28. In Chinese (王健, 付炜, 冯晓哲, 等. 近距离高频单站定位技术 [J]. 电子信息对抗技术, 2009, **24**(1):25-28)

[31] Wang Jian, Hui Shouqiang, Fu Wei, *et al.* Error characteristic analysis and accuracy optimizing idea of HF single site location [J]. *Chin. J. Radio Sci.*, 2010, **25**(5):925-933. In Chinese (王健, 惠守强, 付炜, 等. 高频单站定位误差特性分析及精度优化构想 [J]. 电波科学学报, 2010, **25**(5):925-933)