

雨衰时间序列的混沌识别与预测

张 轶¹, 翟盛华¹, 陶海红²

(1. 中国空间技术研究院西安分院, 陕西西安 710100; 2. 西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 陕西西安 710071)

摘要: 针对传统模型在高频段雨衰预测时存在参数计算复杂、实时性差的问题, 设计了一种新的非线性动态预测模型. 通过混沌识别证明了雨衰时序具备混沌的动力学特性及采用混沌预测方法的可行性. 该方法以雨衰前导数据为训练样本建立非线性自适应滤波器, 可忽略不同地理区域降雨分布差异性的影响. 仿真结果表明, 嵌入维数是影响预测精度的最主要因素, 在满足嵌入维数为8、重构时延为3 s、采样间隔为1 s条件时预测相对误差可达0.05以下. 同时预测的雨衰时间概率分布与ITU-R模型相比有较好的一致性, 验证了所提方法具备参数配置简单、可用度高的优点.

关键词: 降雨衰减; 混沌识别; 混沌预测; 时间序列; 随机微分方程

基金项目: 国家自然科学基金(No.61771015)

中图分类号: TN927

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2023)02-0365-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20210030

Chaos Identification and Prediction for Rain Attenuation Time Series

ZHANG Yi¹, ZHAI Sheng-hua¹, TAO Hai-hong²

(1. China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an, Shaanxi 710100, China;

2. National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: To cope of the issue of intricate parameters and low real-time characteristic of traditional models in predicting rain attenuation, a new nonlinear dynamic model is proposed. Through the strict proof for chaotic characteristic of rain attenuation time series, chaos prediction method is deemed to be feasible. By this method, the leader rain attenuation data is obtained as training samples to establish a nonlinear adaptive filter, so as to break through the influence of rainfall distribution from different climatic regions. Simulations show that embedding dimension is the most important factor affecting the prediction accuracy and relative error increases with the increase of embedding dimension. Moreover, the prediction relative error of proposed model is less than 0.05 when embedding dimension is eight, delay is three seconds, and sampling interval is one second. The comparison with experimental results also represents that the proposed method has advantages of real-time forecast and high availability. Significantly, the prediction using the proposed model shows good agreement with ITU-R model in terms of exceedance probability.

Key words: rain attenuation; chaos identification; chaos prediction; time series; stochastic differential equation

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.61771015)

1 引言

降雨衰减是影响高频段(大于10 GHz)卫星通信可用度的主要因素. 为了保证可靠通信, 对雨衰值的准确预测与估计成为卫星通信系统设计和保障卫星链路质量的关键所在. 由于降雨的不确定性, 要想建立雨衰模型, 就必须对降雨分布、降雨率、雨滴特性、信号频率、极化方式等各类参数进行综合考虑与分析^[1,2].

针对上述问题, 国内外学者的成果颇丰. 在参数优化方面, 张轶等人^[3]在ITU-R模型的基础上, 利用雨衰

随频率变化时呈现的差分平稳性提出了线性预测方法, 可忽略极化方式对预测精度的影响, 却仍无法解决实时预测问题; 针对降雨特性, He等人^[4]利用季风与降雨的非线性相关性建立了东亚地区降雨的复杂网络预测模型, 在强季风条件下具有较高的预测精度, 但该方法在弱季风时预测误差较大; 从概率分布的角度出发, Spiros等人^[5]利用Copulas函数预测雨衰的联合互补累计分布函数, 将雨衰联合概率分布与边缘概率分布这两个随机变量有机地统一了起来, 然而不同地区预测时需

要计算不同的特征参数,给雨衰模型的“本地化”带来困难.同时由于降雨传播实验周期长、成本高、实现难度大,目前全球大部分雨衰数据由欧美国家在中高纬度地区测量得到,现有模型无法真实反映具有高仰角的低纬度地区的适用性^[6].

在此基础上,本文通过对雨衰时序进行混沌识别,利用随机微分方程(Stochastic Differential Equation, SDE)推导证明了其具备混沌的动力学特性,将复杂的经验参数建模转化为以雨衰固有性质实现混沌预测,旨在通过挖掘雨衰时间序列的内在特性以突破传统预报模式的地域性和局限性.

2 混沌理论

图1为2019年9月某地实测12.5 GHz频率的雨衰时间序列(具体参数见第4节表1).可以看出,实时雨衰序列是近似随机的非线性的时间序列,并不适用于传统的如自适应滤波器等基于线性系统的建模和预测方法.而混沌理论的出现开创了这类非线性科学模型化的一个新典范,即对许多随机现象的预测成为可能^[7,8].

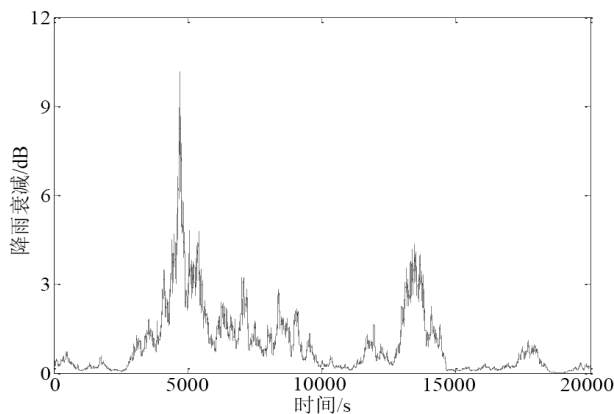


图1 12.5 GHz雨衰时间序列

在一定条件下,宏观的、确定的非线性系统如果呈现出了不可预测性或不确定性,则称这种独特的随机现象为混沌.其不可确定性或无序随机性不是来源于外部干扰,而是源自内部的“非线性交叉耦合作用机制”.这种数学表式为动力学方程的非线性项,使得非线性系统在一定的临界性条件下表现出混沌现象,导致其对初始值表现出极端敏感性,该特征意味着混沌不可能无限预测;但同时混沌现象又是“确定性系统”的一种“内在的随机性”,它有别于系统外部引入的随机影响,因此系统的短期演化结果是确定的、可以预知的.随着人们对混沌预测认知的深入,自20世纪60年代以来,混沌现象被广泛发现于太阳黑子、降雨量、径

流量等诸多研究领域的时间序列中,为原来被认为不可预测的复杂系统的预测提供了新的理论和方法途径,为预测方面的进一步探索开拓了新的思路^[9,10].

以降雨量时间序列为例,当地球站位置和信号频率确定后,降雨强度无疑是决定信号衰落大小的最直接因素,同时利用马尔可夫链对雨衰建模时,转移概率由衰落强度和持续时间决定^[11],那么任一状态均可与前一状态构成微观的混沌现象.由此可以设想降雨衰减构成的时间序列是否也具备混沌特性.21世纪初, Costamagna 等人^[12,13]首次通过对混沌方程的输出采样模拟生成了雨衰序列,初步得出了降雨事件与混沌序列存在着某种联系,但并没有给出严格的理论推导及确定性的结论.因此对于降雨衰减能否利用混沌方法建模和预测,还需要对雨衰时间序列进行混沌识别.

3 雨衰时序的混沌识别

在混沌运动中,同时存在着轨道分离和耗散系统的相空间收缩两种现象,从而产生可以表征混沌特性的奇异吸引子.刻画奇异吸引子的主要特征参数包括 Lyapunov 指数、关联维数和 Kolmogorov 熵.

3.1 Lyapunov 指数

Lyapunov 指数用以描述邻近轨道的发散率,其定义为

$$\lambda = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} \ln \left| \frac{dF(x)}{dx} \right|_{x=x_t} \quad (1)$$

式(1)中, $F(x_t) = x_{t+1}$ 为一维动力系统.当 Lyapunov 指数大于0时,系统具有混沌特征.

假设采样间隔为 Δt ,则在时间独立条件下生成的雨衰时序可表示为 $\{a_t\}$, $t=0, \Delta t, 2\Delta t, \dots, T-\Delta t$.由上述分析可知,若雨衰时序是混沌的,则需证明式(2)成立.

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-\Delta t} \ln \left| \frac{da_{t+\Delta t}}{da_t} \right| > 0 \quad (2)$$

分析 将雨衰时序 $\{a_t\}$ 看作一个随机过程.大量的实验数据表明,同一路径上两个不同频率的雨衰链路服从二维联合对数正态分布(频率大于10 GHz)^[14].基于这种假设,对于其中任意一条雨衰链路(上行或下行)满足如下 SDE:

$$\begin{cases} da_t = a_t \left(\frac{s^2 + c^2}{2} dt + dX_t \right) \\ X_t = \ln a_t - \ln a_m \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中, s 和 c 分别表示两条卫星链路中噪声的自相关和互相关参数, $\ln a_m$ 表示对数正态雨衰随机变量的均

值. 令 $K = (s^2 + c^2)/2$, 代入式(3)可得:

$$\begin{aligned} \frac{da_{t+\Delta t}}{da_t} &= \frac{a_{t+\Delta t}}{a_t} \cdot \frac{Kd(t+\Delta t) + dX_{t+\Delta t}}{Kdt + dX_t} \\ &= \frac{a_{t+\Delta t}}{a_t} \cdot \frac{K + \frac{a'_{t+\Delta t}}{a_{t+\Delta t}}}{K + \frac{a'_t}{a_t}} \cdot \frac{d(t+\Delta t)}{dt} \\ &= \frac{Ka_{t+\Delta t} + a'_{t+\Delta t}}{Ka_t + a'_t} \end{aligned} \quad (4)$$

同时又有

$$\frac{da_{t+\Delta t}}{da_t} = \frac{a'_{t+\Delta t}}{a'_t} \cdot \frac{d(t+\Delta t)}{dt} = \frac{a'_{t+\Delta t}}{a'_t} \quad (5)$$

结合式(4)和式(5)得到:

$$\frac{da_{t+\Delta t}}{da_t} = \frac{a_{t+\Delta t}}{a_t} \quad (6)$$

另外, 受降雨率、雨滴尺寸等因素影响, 不同纬度地区的雨衰时序存在较大差异. 文献[15]指出, 基于 Weibull 分布的动态模型在温带地区较其他方法能更准确地描述雨衰过程, Gamma 分布则在热带及亚热带地区体现出了更强的适配性. 下面以 Weibull 分布为例, 证明其 Lyapunov 指数大于 0.

证明 服从 Weibull 分布的雨衰随机过程可表示为^[16]

$$\begin{cases} a_t = \frac{Y_t}{\left(1 + v\beta \int_0^t Y_x^v dx\right)^{1/v}} \\ Y_t = a_0 \cdot e^{mB_t + nt} \\ m = \sqrt{2\beta\omega/v} \\ n = \beta\omega \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中, β 为表征本地降雨变化率的动态参数 (量纲为 10^{-4}); B_t 表示布朗运动过程; ω 和 v 由经验模型计算得到, 是描述 Weibull 分布的两个正参数 (介于 0 和 1 之间). 根据式(7)有

$$\frac{a_{t+\Delta t}}{a_t} = e^{m(B_{t+\Delta t} - B_t) + n\Delta t} \cdot \left(\frac{1 + v\beta \int_0^t Y_x^v dx}{1 + v\beta \int_0^{t+\Delta t} Y_x^v dx} \right)^{1/v} \quad (8)$$

对上式两项复杂因式分别进行化简.

第一步, 由布朗运动可表示为独立增量过程, 有

$$\begin{aligned} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-\Delta t} [m(B_{t+\Delta t} - B_t) + n\Delta t] \\ = 0 + \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-\Delta t} n\Delta t = n \end{aligned} \quad (9)$$

第二步, 易知下式成立:

$$\begin{aligned} \sum_{t=0}^{T-\Delta t} \ln \left(\frac{1 + v\beta \int_0^t Y_x^v dx}{1 + v\beta \int_0^{t+\Delta t} Y_x^v dx} \right)^{1/v} \\ = \frac{1}{v} \cdot \ln \left(\frac{1 + v\beta \int_0^0 Y_x^v dx}{1 + v\beta \int_0^{\Delta t} Y_x^v dx} \cdot \frac{1 + v\beta \int_0^{\Delta t} Y_x^v dx}{1 + v\beta \int_0^{2\Delta t} Y_x^v dx} \cdots \frac{1 + v\beta \int_0^{T-\Delta t} Y_x^v dx}{1 + v\beta \int_0^T Y_x^v dx} \right) \\ = \frac{1}{v} \cdot \ln \frac{1}{1 + v\beta \int_0^T Y_x^v dx} \end{aligned} \quad (10)$$

令 $f(T) = -\frac{1}{v} \cdot \ln \left(1 + v\beta \int_0^T Y_x^v dx \right)$, 根据洛比达法则, 有

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} f(T) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{f'(T)}{T'} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{-\beta(Y_T^v - a_0^v)}{1 + v\beta \int_0^T Y_x^v dx} \quad (11)$$

注意到 Y_T 为无界不单调函数, 因此将 Y_T^v 用如下 SDE 形式表示^[16]:

$$Y_T^v = a_0^v + \int_0^T 2nv \cdot Y_x^v dx - \int_0^T mv \cdot Y_x^v dB_x \quad (12)$$

将其代入式(11), 并再次利用洛比达法则, 有

$$\begin{aligned} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} f(T) \\ = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{-\beta [2nv \cdot (Y_T^v - a_0^v) - mv \cdot (Y_T^v - a_0^v)]}{v\beta (Y_T^v - a_0^v)} \\ = m - 2n \end{aligned} \quad (13)$$

第三步, 结合式(9)~式(13)及式(2)可得:

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-\Delta t} \ln \left| \frac{a_{t+\Delta t}}{a_t} \right| = n + m - 2n = m - n > 0 \quad (14)$$

证毕

对于 Gamma 分布而言, 采用类似分析方法可知其 Lyapunov 指数同样大于 0.

3.2 关联维数

关联维数用以描述吸引子的维数, 对其采用经典的 G-P 算法进行计算. 首先通过相空间重构得到 $X(t) = \{x(t), x(t+\tau), \dots, x[t+(d-1) \cdot \tau]\}$, 其中 $t \leq M$, d 为嵌入维数, τ 为重构时延; 然后计算存在于相空间中上述 M 个点的关联积分, 即它在一切可能 M^2 种配对中有关联向量的对数所占的比例:

$$C_d(r) = \frac{1}{M^2} \sum_{i,j=1}^M \theta[r - \|X(i) - X(j)\|] \quad (15)$$

其中 $\theta(\cdot)$ 为阶跃函数:

$$\theta(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases} \quad (16)$$

$C_d(r)$ 与 r 在一段区间内有 $C_d(r) \propto r^D$, 则指数 D 即为关联维数:

$$D = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln C_d(r)}{\ln r} \quad (17)$$

在随机序列中, 关联维数与嵌入维数呈近似线性的关系, 即伴随嵌入维数的增加而不断增大, 而在混沌序列中, 关联维数增大到一定数值后不再显著上涨, 将会出现饱和现象, 这种区别可以作为对混沌序列和随机序列的有效判定. 关联维数达到饱和值时的嵌入维数即为最小嵌入维数.

对实测雨衰数据的前 10 000 个样值进行相空间重构, 嵌入维数取值范围 2~15, 得到 $\ln C_d(r)$ 与 $\ln r$ 的关系如图 2 所示. 可以看到, 随着嵌入维数的增加, 关联维数出现了饱和现象. $\ln r$ 从 -1.5~-1 变化时, 对应 d 为 8~14, 曲线近似为直线, 取斜率平均值即可得到该雨衰时序的关联维数为 2.18.

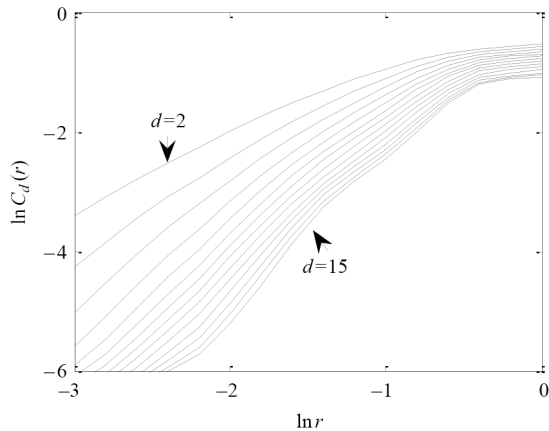


图2 关联维数计算

3.3 Kolmogorov 熵

Kolmogorov 熵用以反映信息产生的频率, 其定义为信息的平均损失率 k , 若系统表现出混沌特性, 则 k 是大于 0 的常数. 在一维映射中, Kolmogorov 熵恰为 Lyapunov 指数.

综上所述, 雨衰时间序列是混沌的, 可用相关理论方法进行建模和预测.

4 仿真分析

仿真中混沌预测采用基于 Volterra 级数的自适应滤波算法^[17]. 该方法可根据当前获得的数据和预测误差不断修正模型参数, 适用于已知的数据不完整或实际物理系统具有时变特性的情况, 因此是一种动态调

整模型参数的滤波算法. 设置滤波器阶数为 2, 最小二乘迭代次数为 5 000, 其余参数按照表 1 进行设置. 由于算法中需要对原混沌序列进行归一化处理, 故以相对误差作为预测效果的评价标准, 其定义为

$$\delta = \frac{\sum_{k=1}^{N_{TE}} [\hat{x}(k) - x(k)]^2}{\sum_{k=1}^{N_{TE}} x^2(k)} \quad (18)$$

对于实测 12.5 GHz 雨衰时序, 将其按照序列长度分成 10 组, 每组取前 N_{TR} 个样值作为训练样本, 取 1 000 点以后的 N_{TE} 个样值作为测试样本, 通过训练滤波器得到预测模型后可进行验证, 最后对 10 组结果取均值进行仿真分析.

表1 雨区及仿真参数

雨区参数		仿真参数	
卫星位置	92°E	嵌入维数 d	8~20
地面站位置	34.4°N	重构时延 τ/s	1~20
海拔高度/m	397	采样间隔 $\Delta t/s$	1~20
降雨率 $R_{0.01}/(mm/h)$	38	训练样本数 N_{TR}	300, 600, 900
上/下行频率/GHz	17.5/12.5	测试样本数 N_{TE}	1000, 50~250

4.1 嵌入维数的影响

重构时延 $\tau = 3$ s, 采样间隔 $\Delta t = 1$ s, 测试样本数 $N_{TE} = 1$ 000, 不同训练样本数下的仿真结果如图 3 所示.

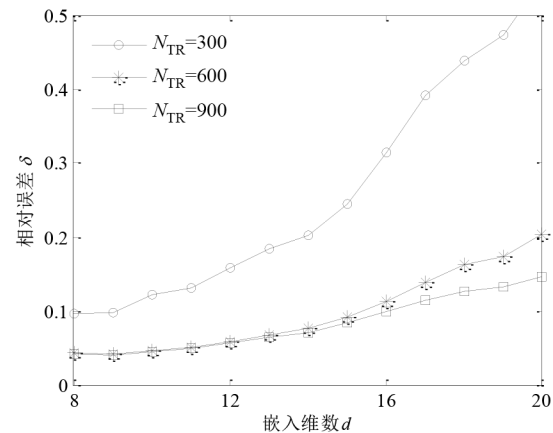


图3 嵌入维数与相对误差曲线图

研究结果表明, 嵌入维数越大则误差越大, 原因是维数的增大使得重构相空间中的相点显得相对稀疏, 导致可用数据的长度减少, 训练样本越少则受这种影响越明显, 甚至还可能由于多余维数而引起噪声干扰. 不同训练样本数条件下, 样本越多则误差越小, 这是因为更多的先验信息可以提供更好的训练效果, 从而获得更精确的预测结果. 同时注意到训练样本增大到一定数值时, 预测误差并不随之显著改善, 说明通过占用更多的前导雨衰数据以换取更优的预测性能是没有必要的, 表明在可控误差范围内应对训练样本数进行优

化选择,从而提高资源的可用度和预测的实时性.

4.2 重构时延的影响

嵌入维数 $d=8$, 采样间隔 $\Delta t=1$ s, 测试样本数 $N_{TE}=1\ 000$, 不同训练样本数下的仿真结果如图 4 所示.

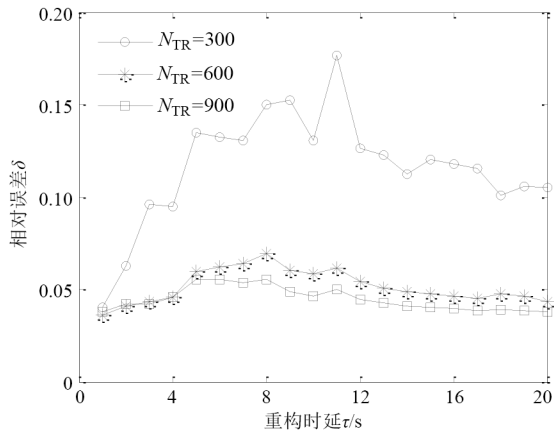


图 4 重构时延与相对误差曲线图

研究表明,随着重构时延的增大,预测误差呈波动性变化.受到蝴蝶效应的影响,如果 τ 太大,则混沌吸引子相邻值之间将变成近乎随机的关系;而当 τ 太小时,相邻值在数值上就彼此接近,难以保证相互独立性.同时可以看到误差曲线的变化幅度不大,预测精度也维持在较高的范围内,说明重构时延对预测误差的影响较小.对于 τ 的选择问题,已产生许多确定方法,这里不作讨论.不同训练样本数条件下,误差曲线特点与 4.1 节的结果相一致,不再赘述.

4.3 采样间隔的影响

嵌入维数 $d=8$, 重构时延 $\tau=3$ s, 测试样本数 $N_{TE}=1\ 000$, 不同训练样本数下的仿真结果如图 5 所示.由于前导数据的长度与采样间隔大小有关,故本例中需根据不同 Δt 调整序列分组数.

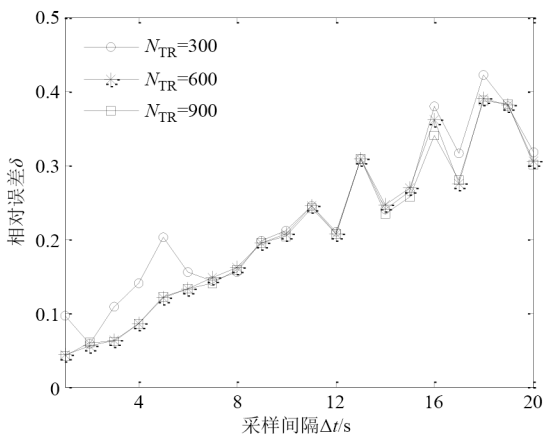


图 5 采样间隔与相对误差曲线图

研究表明,采样间隔越大则误差越大,这是因为采样间隔的大小决定了混沌序列相邻值在前导数据中的关系.如果 Δt 太大,则相邻值之间的相关度降低,即混沌特性被破坏,导致预测精度下降.同时可以看到不同训练样本数下误差曲线的差异很小,说明随着 Δt 的增大,即使增大先验信息量也无法达到理想的预测效果. Δt 的增大还使得前导数据使用率提高,对雨衰预测的实时性也是不利的.

4.4 测试样本的影响

嵌入维数 $d=8$, 重构时延 $\tau=3$ s, 采样间隔 $\Delta t=1$ s, 不同训练样本数下的仿真结果如图 6 所示.

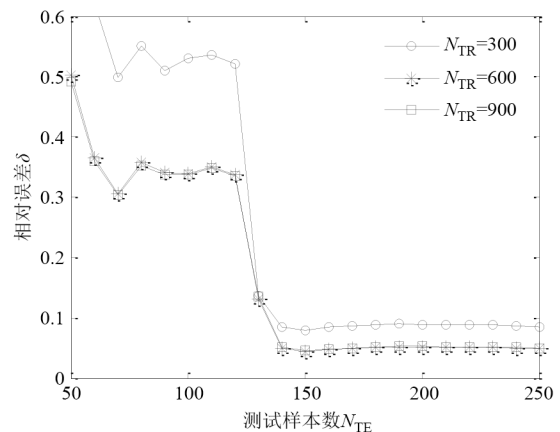


图 6 测试样本数与相对误差曲线图

研究表明:当测试样本数 $N_{TE}<120$ 时,相对误差较大且曲线波动明显;当 $N_{TE}>120$ 时,误差曲线出现急剧下降,并在大于 150 时稳定在一个较小的误差范围内.这是因为过少的测试样本无法全面展现雨衰序列的动力特性,即很难实现对经过训练的滤波器模型预测结果的准确匹配,然而随着测试样本的增大,其混沌特性逐渐显著,预测精度便随之提高了.

4.5 不同链路雨衰时序

估计卫星链路的降雨衰减量,实质是为了更好地完成对上行链路的衰减补偿.图 7 展示了同一路径下不同链路的雨衰时间序列,其中上/下行雨衰曲线均为实测数据,预测雨衰曲线由下行数据混沌预测后通过频率变标得到.可以看到,由于存在高相关性,上、下行链路雨衰值呈现出一致的波动规律.混沌预测结果与上行链路雨衰吻合度较高,直观表明了所提方法的可靠性;同时表明在实际应用时,可直接利用 12.5 GHz 雨衰前导数据估算 17.5 GHz 的雨衰值,避免星地之间因交换控制信息产生额外开销,从而实现上行链路功率的开环控制.

4.6 混沌时序的时间概率分布

为了进一步验证混沌预测模型的可用性,仅通过

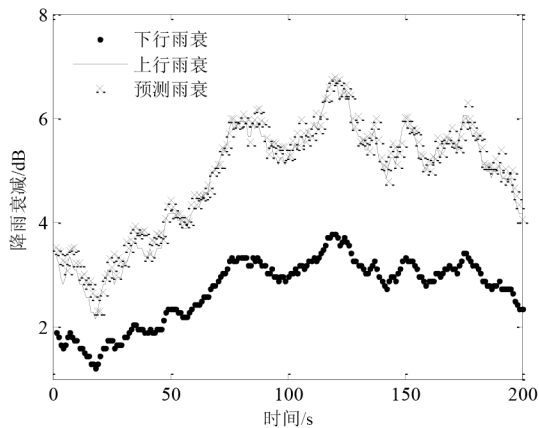


图7 不同链路雨衰时序

与单个实测雨衰序列的比较是远远不够的,必须进行大量样本的统计分析.由于实测数据有限,利用增强MB(Maseng Bakken)模型^[18]按照表1雨区参数模拟生成500组时间序列,每组预测的样本数为1000,并与ITU-R P.618模型^[19]在同参数下的雨衰概率分布进行比较,如图8所示.

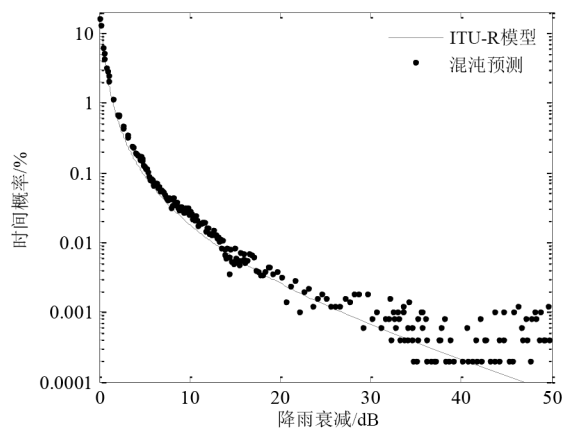


图8 混沌序列与ITU-R模型比较

研究表明,当降雨衰减较小时,利用混沌预测得到的雨衰时间序列的概率分布与ITU-R提供的降雨时间百分概率分布一致性较好,而当发生小概率降雨事件时,两者会出现一定偏差.在大部分时间百分概率下两者较为一致,表明该预测方法的可用性.

5 结论

借鉴非线性动力学系统的研究思路,通过对雨衰时间序列进行混沌识别,提出基于混沌时序的卫星链路雨衰预测方法.该方法利用雨衰序列的混沌特性进行非线性预测,涉及参数少,实时性强,同时可忽略区域特性对降雨动态参数的影响,因此具备一定的“普适性”.仿真结果表明,在Volterra级数自适应滤波

算法下,其预测相对误差可达0.05以下,且预测的雨衰时间概率分布与ITU-R相比有较好的一致性,因此对10 GHz以上频段雨衰削减技术的研究和应用具备一定的参考价值.

参考文献

- [1] 咸明皓,刘西川,姬文明,等.降水对KuKa频段星地链路衰减特性的影响研究[J].电子学报,2020,48(3):417-425. XIAN M H, LIU X C, JI W M, et al. Research on the effect of precipitation on the attenuation characteristics of earth-space link at Ku/Ka band[J]. Acta Electronica Sinica, 2020, 48(3): 417-425. (in Chinese)
- [2] 张建飞,丁广,杨建东,等.海上云层和降水对船载高频段卫星通信的影响[J].电子学报,2018,46(2):381-386. ZHANG J F, DING G, YANG J D, et al. Influence of ocean clouds and precipitation to shipborne high frequency band satellite communication[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(2): 381-386. (in Chinese)
- [3] 张轶,达新宇.基于差分平稳时序的Ka波段雨衰预测[J].物理学报,2014,63(6):060203. ZHANG Y, DA X Y. Rain attenuation prediction at Ka band based on difference stationary time series[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(6): 060203. (in Chinese)
- [4] HE S H, FENG T C, GONG Y C, et al. Predicting extreme rainfall over eastern Asia by using complex networks[J]. Chinese Physics B, 2013, 62(15): 154303.
- [5] SPIROS N L, CHARILAOS I K, ATHANASIOS D P, et al. On the prediction of joint rain attenuation statistics in earth-space diversity systems using copulas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62(4): 2250-2257.
- [6] IGWE K C, OYEDUM O D, AJEWOLE M O, et al. Evaluation of some rain attenuation prediction models for satellite communication at Ku and Ka bands[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2019, 188(7): 52-61.
- [7] 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,2005. LV J H, LU J A, CHEN S H. Analysis and Application of Chaotic Time Series[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2005. (in Chinese)
- [8] 黄飞江,陈演羽,李廷会,等.基于灰色模型和混沌时间序列的卫星钟差预测算法[J].电子学报,2019,47(7):1416-1424. HUANG F J, CHEN Y Y, LI T H, et al. A satellite clock bias prediction algorithm based on gray model and chaotic

- time series[J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(7): 1416-1424. (in Chinese)
- [9] 彭甜. 流域水文气象特性分析及径流非线性综合预报研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
PENG T. Study on Watershed Hydro-Meteorological Characteristics Analysis and Runoff Nonlinear Integrated Forecasting[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2018. (in Chinese)
- [10] 梁涤青, 陈志刚, 邓小鸿. 基于小波包能量熵的混沌序列复杂度分析[J]. 电子学报, 2015, 43(10): 1971-1977.
LIANG D Q, CHEN Z G, DENG X H. Analysis of chaotic sequence complexity based on wavelet packet energy entropy[J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43(10): 1971-1977. (in Chinese)
- [11] 李磊, 杨瑞科, 赵振维. 长春和新乡雨衰时间序列的马尔科夫链模拟[J]. 电波科学学报, 2012, 27(3): 476-481.
LI L, YANG R K, ZHAO Z W. Rain attenuation time series simulation by Markov chain about Changchun and Xinxiang areas[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2012, 27(3): 476-481. (in Chinese)
- [12] COSTAMAGNA E, FAVALLI L, GAMBA P. Ka fading channel models derived from chaotic dynamical systems [C]//IEEE 54th Vehicular Technology Conference. Atlantic City: IEEE, 2001: 2082-2085.
- [13] COSTAMAGNA E, FAVALLI L, GAMBA P, et al. Improving chaos equations fading models for Ka band satellite links[C]//IEEE 55th Vehicular Technology Conference. Birmingham: IEEE, 2002: 1990-1994.
- [14] GEORGIOS A K, ATHANASIOS D P, JOHN D K. Short-term rain attenuation frequency scaling for satellite up-link power control applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(5): 2829-2837.
- [15] SOTIRIOS A K, ATHANASIOS D P, CHARILAOS I K, et al. Satellite and terrestrial links rain attenuation time series generator for heavy rain climatic regions[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(6): 3396-3399.
- [16] SOTIRIOS A K, CHARILAOS I K, ATHANASIOS D P, et al. Channel model for satellite communication links above 10 GHz based on weibull distribution[J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(4): 568-571.
- [17] 张玉梅, 吴晓军, 白树林. 基于DFP的二阶Volterra模型及其对Rössler混沌序列的预测[J]. 电子学报, 2014, 42(9): 1801-1806.
ZHANG Y M, WU X J, BAI S L. A DFP-based second-order Volterra model with applications to Rössler chaotic series prediction[J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(9): 1801-1806. (in Chinese)
- [18] LACOSTE F. Classical and on demand rain attenuation time series synthesis: principle and applications[C]//Proceedings of 24th AIAA International Communications Satellite Systems Conference. San Diego: AIAA, 2006: 1-10.
- [19] ITU-R. Propagation data and prediction methods required for the design of earth-space telecommunication systems [R]. Geneva, Switzerland: International Telecommunication Union, P Series Radiowave propagation: ITU-R P.618-10, 2009.

作者简介



张 轶 男, 1986年生, 山西太原人. 现为中国空间技术研究院西安分院博士后工作站博士后. 主要研究方向为自适应抗干扰技术与通信信号处理.

E-mail: zhangyi1290@163.com



翟盛华 男, 1978年生, 陕西宝鸡人. 研究员, 毕业于法国国立航空航天大学, 现任中国空间技术研究院西安分院空间通信与导航技术研究所所长. 主要研究方向为空间通信抗干扰与测控技术.

E-mail: zsh@cast504.com



陶海红 女, 1976年生, 安徽亳州人. 教授, 博士生导师, 现在西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室工作. 主要研究方向为雷达信号波形设计、自适应和阵列信号处理. 中国电子学会会员编号: E190003895S.

E-mail: hhtao@xidian.edu.cn