

基于差分平稳时序的Ka波段雨衰预测*

张轶† 达新宇

(空军工程大学信息与导航学院, 西安 710077)

(2013年11月10日收到; 2013年11月29日收到修改稿)

针对经典模型在Ka波段雨衰预测时存在涉及参数多、计算量大的问题, 提出了基于差分平稳时序的预测方法. 该方法利用前导雨衰值的差分变换建立预测模型, 并通过平稳时序的参数估计得到各频点的雨衰预测值, 进而实现将传统的非线性预测转化为简便的线性预测. 仿真结果表明: 不同预测间隔、时序个数、差分次数下的预测精度不同, 与Dissanayake-Allnut-Haidara模型相比在满足预测间隔0.1 GHz、时序数20、二次差分条件时预测误差可达 10^{-3} 以下, 同时表明极化方式对模型参数的影响可以忽略, 验证了所提方法具备参数计算简单、预测精度高的优点.

关键词: Ka波段, 雨衰预测, 差分, 平稳时序

PACS: 02.30.Lt, 92.60.jf, 92.60.Wc

DOI: 10.7498/aps.63.060203

1 引言

降雨衰减是影响Ka波段(30/20 GHz)卫星通信可用度的主要因素, 为了保证可靠通信, 必须设法补偿因雨衰引起的信号电平的损失. 然而由于降雨的不确定性, 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.

目前国际上常用的雨衰预测模型有International Telecommunication Union Rain (ITU-R)^[1]和Dissanayake-Allnut-Haidara (DAH)^[2], 利用它们进行雨衰预测时, 降雨衰减值与信号频率、天线仰角、极化角等有关, 涉及的参数较多, 一旦频率或极化方式发生变化, 则会由于参数的反复计算导致计算量与复杂度大大增加.

针对上述问题, 国内外的研究工作屡有成果涌现. 文献^[3]在归一化雨滴谱分布的基础上讨论了雨滴各种物理特征对微波传输特性的影响, 提出了衰减模型但没有给出具体的预报方案; 文献^[4]利用维纳预测的思想提出了自相关雨衰预测模型, 但并没有讨论自相关性成立的条件以及对阶数选取的要求; 文献^[5, 6]分别提出基于衰减持续时间和

SC EXCELL模型的经验方法, 两种方法都是针对地面通信链路进行设计和统计测量的; 文献^[7]利用连续马尔可夫过程的一阶随机微分方程进行动态建模, 提出了基于Gamma分布的雨衰时序发生器, 然而该模型适用于大雨气候区, 不具备普适特点; 文献^[8]利用微波衰减的幂律关系, 研究了使用微波链路衰减信息重建二维降雨场的反演模型, 但缺乏对雨衰模型呈非线性波段的处理方法.

在此基础上, 本文提出一种基于差分平稳时序的Ka波段雨衰线性预测方法. 首先简要介绍了几种常用的经典雨衰预测模型; 通过理论推导描述了建模过程, 并简要分析了模型的平稳性条件, 进一步详细给出了模型参数的计算方法; 最后通过软件仿真, 验证了差分模型具备较高的预测精度.

2 经典雨衰预测模型

对于电波降雨衰减的预测, 通常采用两种不同的方法. 一是通过实测数据提出经验模型进行预测. 由于降雨在时间、空间分布的非均匀性以及随不同地域、季节的差异性, 要准确掌握地球站区域的降雨衰减特性, 就必须经过长期的实地测量, 而

* 国家自然科学基金(批准号: 60972042, 61271250)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: zhangyi1290@163.com

世界上大多数地区缺乏相应的降雨衰减数据库^[9]. 在这种情况下, 目前多采用另一种方法, 即根据比较容易得到的气象数据 (降雨量、降雨率等) 进行建模来预测雨衰值. 利用该方法的典型雨衰预测模型主要有以下几种^[10]:

Leitao Watson 和 Moupfouma 模型适用于 11—18 GHz 频率, 前者利用散射理论通过双极化雷达对降雨结构进行观测得到, 而后者主要以欧洲、北美、日本等地降雨量的测量值为基础建立预测模型; Garcia Lopez 模型是对已有地面通信链路雨衰预测模型的延伸, 它是在对欧洲、美国、日本、澳洲等地卫星链路相关参数测量的基础上发展起来的; Crane 模型通过对降雨结构和降雨量等物理参数进行建模得到, 所涉及到的参数有点降雨率、垂直雨深、雨顶下倾斜路径长度、雨滴特性带来的频变参数等.

ITU-R 和 DAH 模型由于计算精度较高、适用范围广泛, 是目前国际上两种广为应用的雨衰预测模型. 其都采取计算降雨中有效路径长度的半经验近似方法, 在这个有效路径上假设降雨率是不变的, 则相应得到一个恒定的单位衰减. 两者的区别在于对等效雨高的定义不同.

3 差分线性预测模型

由上述分析可知, 传统的雨衰预测模型建立在计算各类参数的基础上, 数据之间是否存在关联性并未考虑. 以广州、哈尔滨和西安地区为例, 当地在 DAH 模型下的雨衰-频率仿真曲线 (假设通信卫星所处轨道位置为 92°E) 如图 1 所示, 纵坐标表示平均 0.01% 时间概率的降雨衰减, 极化方式为水平极化. 从图中可以看到, 在 Ka 波段, 雨衰随频率的增加而增大, 但其增幅越来越小, 雨衰与频率在整体上近似呈线性关系, 因此考虑利用此线性关系进行雨衰预测建模, 将传统的非线性计算转化为简便的线性运算.

3.1 模型描述

图 2 为图 1 曲线抽象化的一部分, 其中 S_1, S_2, \dots, S_{i+2} 为等间隔频率连续采样下对应的雨衰值. 由上述分析可得:

$$\begin{aligned} d_1 &= S_2 - S_1 > d_2 = S_3 - S_2 > \dots > d_{i+1} \\ &= S_{i+2} - S_{i+1} \quad i \geq 1, \end{aligned} \quad (1)$$

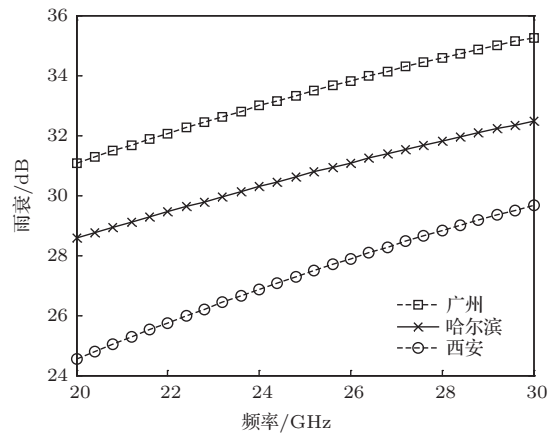


图 1 雨衰-频率曲线图

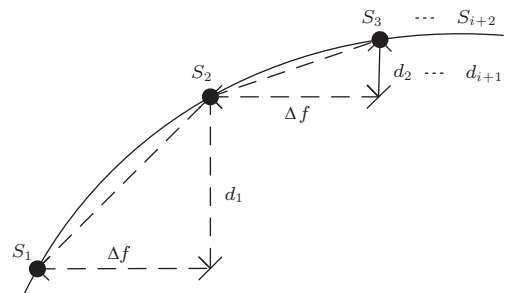


图 2 抽象模型示意图

令 $W_i = d_i - d_{i+1}$, 得到一组时序 $\{W_i\}$

$$W_i = 2S_{i+1} - (S_i + S_{i+2}) \quad i \geq 1, \quad (2)$$

利用雨衰与频率的近似线性关系有 $W_i \approx 0$, 且 W_i 是由雨衰值做二次差分得到, 同理可由三次差分得到新的时序:

$$W_i = 3S_{i+1} - 3S_{i+2} - (S_i - S_{i+3}) \quad i \geq 1, \quad (3)$$

若考虑通过 $\{W_i\}$ 进行线性建模和预测, 则要求 $\{W_i\}$ 是平稳的时间序列^[11], 此时 $\{W_i\}$ 中第 $i+k$ 项可由前 k 项的线性组合估计得到:

$$\begin{aligned} \hat{W}_{i+k} &= \phi_{k1}W_{i+k-1} + \phi_{k2}W_{i+k-2} \\ &+ \dots + \phi_{kk}W_i \quad k \geq 1, \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $\phi_{k1}, \phi_{k2}, \dots, \phi_{kk}$ 是系数. 由 (2) 和 (4) 式可知, 只需获得前 $k+2$ 个前导雨衰数据, 并通过相应的参数估计就能得到下一个频点的雨衰预测量 \hat{S}_{i+k+2} , 依此类推得到更高波段的雨衰量.

下面检验 $\{W_i\}$ 是否满足平稳性条件.

3.2 平稳性检验

样本选取: 基于 DAH 模型, 以广州地区为例, 在 17.9—20 GHz 范围内以频率间隔 $\Delta f = 0.1$ GHz

采样得到22个前导雨衰数据,做二次差分获得样本序列 $\{W_i\}$, $i = 1, 2, \dots, 20$. 样本的数字特征如表1所示.

从表1中可以看到,样本并非在某一固定值附近变动,而是逐渐递减,由此得知随着样本数目的变化,其均值并不是恒定的常数.然而基于雨衰与频率近似呈线性关系的前提,在Ka波段范围内样本均值的变化量很小,可认为是符合平稳条件的.同时根据Green函数与自协方差函数 γ_k 的关系,当 $\{W_i\}$ 是平稳时序时,有^[12]:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \gamma_k = 0. \quad (5)$$

这里定义样本自协方差函数为

$$\hat{\gamma}_k = E(W_i W_{i+k})$$

表1 样本统计特性

样本 ($\times 10^{-4}$)	$W_1 = 3.09$	$W_2 = 2.97$...			$W_{20} = 1.77$
均值 ($\times 10^{-4}$)		$\hat{m} = 2.29$	方差 ($\times 10^{-9}$)			$\hat{d} = 1.54$
自协方差 ($\times 10^{-8}$)	$\hat{\gamma}_0 = 5.38$	$\hat{\gamma}_1 = 5.07$	$\hat{\gamma}_2 = 4.76$	$\hat{\gamma}_3 = 4.46$	$\hat{\gamma}_4 = 4.18$	$\hat{\gamma}_5 = 3.90$

3.3 参数计算

由3.2节内容可知(4)式是可行的,现需确定系数 $\varphi_{k1}, \varphi_{k2}, \dots, \varphi_{kk}$ 以求得 W_{i+k} 的估计值. 其中 φ_{kk} 称为偏相关函数,它刻画了平稳时序两端 W_i 和 W_{i+k} 的线性关系密切程度,可由Yule-Walker (Y-W) 方程计算得到.由于Y-W方程计算量较大,常利用下面的递推公式计算样本参数^[13]:

$$\begin{cases} \hat{\phi}_{11} = \hat{\rho}_1 \\ \hat{\phi}_{k+1,k+1} = \frac{\hat{\rho}_{k+1} - \sum_{j=1}^k \hat{\rho}_{k+1-j} \hat{\phi}_{kj}}{1 - \sum_{j=1}^k \hat{\rho}_j \hat{\phi}_{kj}} \\ \hat{\phi}_{k+1,j} = \hat{\phi}_{kj} - \hat{\phi}_{k+1,k+1} \hat{\phi}_{k,k-j+1} \\ j = 1, 2, \dots, k \end{cases}, \quad (7)$$

式中, $\hat{\rho}_k = \hat{\gamma}_k / \hat{\gamma}_0$ 称为样本自相关函数.

上式对样本偏相关函数 $\hat{\phi}_{kk}$ 的估计会引入预测误差,因此利用(7)式结果和文献[4]提出的参数推导算法求解修正后的 $\hat{\phi}_{kk}$:

$$\hat{\phi}_{kk} = \frac{2 \sum_{i=k+1}^n e f_i \cdot e b_i}{\sum_{i=k+1}^n (e f_i^2 + e b_i^2)} \quad k = 1, 2, \dots, K, \quad (8)$$

$$= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-k} W_i W_{i+k} \quad k = 0, 1, 2, \dots, K, \quad (6)$$

式中, n 为样本数目, K 取 $n/4$ 以保证 $\hat{\gamma}_k$ 能充分接近 γ_k . 计算样本的自协方差如表1所示,根据(5)式结果,明显看到 $\hat{\gamma}_k$ 随 k 的增大而向0衰减,故认为 $\{W_i\}$ 是平稳的.

应当注意的是,由于雨衰与频率的线性程度只是近似的,假如将整个Ka波段雨衰值生成的时序看成一个随机过程,则样本的数字特征只能表征前导数据临近频点所生成时序的特征,并不能准确反映整个随机过程的情况,因此随着预测频率的升高,预测误差在理论上是增大的.

式中, $e f_i, e b_i$ 分别为前向、后向预测误差:

$$\begin{cases} e f_i = \left| W_i - \sum_{j=1}^k \hat{\phi}_{kj} W_{i-j} \right| \\ e b_i = \left| W_{n-i+1} - \sum_{j=1}^k \hat{\phi}_{kj} W_{n-i+j+1} \right| \end{cases}. \quad (9)$$

4 仿真与分析

仿真中选择广州地区作为地球站位置(纬度 23.10° , 经度 113.15° , 海拔 0.044 km , 0.01% 时间降雨率为 120 mm/h); 通信卫星所处轨道位置为 92°E ; 极化角取 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 分别表示水平极化、圆极化和垂直极化; 预测间隔 Δf 为 $0.05, 0.1, 0.2 \text{ GHz}$; 利用DAH模型生成前导雨衰数据,选取时序个数 n 为 $20, 40, 60$. 采用二次差分和三次差分两种模型实现线性预测,并将仿真结果与DAH模型进行比较.表2所示为水平极化方式下的模型参数.

实验1 不同预测间隔的比较

采用二次差分模型,时序个数 $n = 20$,极化方式为水平极化,仿真结果如图3所示.仿真结果表明,提出的差分模型的预测值与DAH模型之间的误差随频率的升高而增大,这与3.2节的结论相一致,验证了算法及仿真的正确性;采用不同预测间隔的模型其预测精度不同,原因是频率间隔的减

表2 模型参数

预测模型	时序个数 n	预测间隔 $\Delta f/\text{GHz}$	偏相关系数 $\hat{\phi}_{ki}, i = 1, 2, \dots, k$				
二次差分	20	0.05	-2.5020	-1.4650	1.5993	2.4456	0.9221
		0.1	-0.8472	-0.2607	0.5725	0.9119	0.6224
	40	0.2	0.6722	0.0264	0.0399	0.0504	0.1674
		0.1	0.5478	-0.0268	-0.0066	0.0140	0.0334
	60	0.1	0.0501	0.0628	0.0706	0.0732	0.1731
			0.8494	0.0009	0.0018	0.0027	0.0036
三次差分	20	0.1	0.0044	0.0052	0.0059	0.0066	0.0072
			0.0077	0.0082	0.0085	0.0088	0.0601
			0.7114	0.0299	0.0395	0.0458	0.1326

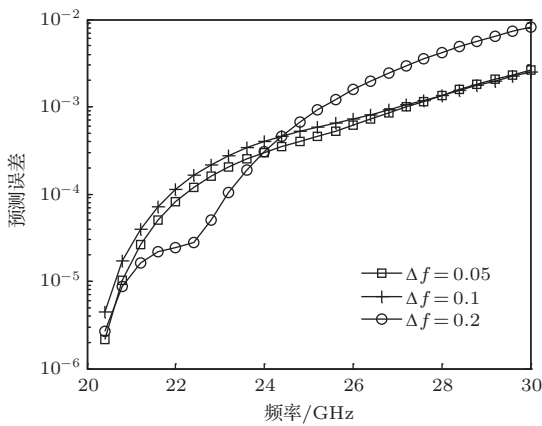


图3 不同预测间隔的误差曲线

小使得前导雨衰数据的相关性增强, 由于差分变换属于线性变换, 因此时序中各元素的相关性随之增强, 从而对模型参数的估计更加精确; 同时注意到对某一段范围的雨衰值进行预测时, 频率间隔的大小决定了预测数的多少, 导致产生的累积误差不尽相同, 频率间隔越大则累积误差越小, 所以 Δf 为 0.2 GHz 时呈现出显著的变化趋势, 而 Δf 为 0.05 和 0.1 GHz 的预测精度差异很小, 并随着预测频率的升高趋向同一水平.

实验2 不同时序个数的比较

采用二次差分模型, 预测频率间隔 $\Delta f = 0.1$ GHz, 极化方式为水平极化, 仿真结果如图 4 所示. 仿真结果表明, 采用不同时序个数的模型其预测精度不同, 这是因为时序个数由前导数据量决定, 前导数据量越多则对数据之间的相关性估计越准确, 从而优化了模型的参数; 同时注意到时序个数的多少决定了待计算模型参数的多少, 导致产生的累积误差不尽相同, 时序个数越多则累积误差越大, 因此 $n = 60$ 时呈现出显著的变化趋势, 而 n 为

20 和 40 的预测精度差异很小, 并随着预测频率的升高趋向同一水平.

实验3 不同差分次数的比较

取时序个数 $n = 20$, 预测频率间隔 $\Delta f = 0.1$ GHz, 极化方式为水平极化, 仿真结果如图 5 所示. 仿真结果表明, 采用不同差分次数的模型其预测精度不同. 差分运算越多, 则生成的时序线性程度越高, 因此图中频率在 22.4 GHz 以下时, 三次差分模型的预测精度较高; 另一方面, 由 (2) 和 (4) 式可知, 对于某一频点的雨衰预测值, 三次差分模型需要三个前导数据, 同时又将作为下一频点预测值的前导数据, 因此随着预测频率的升高, 差分次数越多则累积误差越大, 导致预测精度下降.

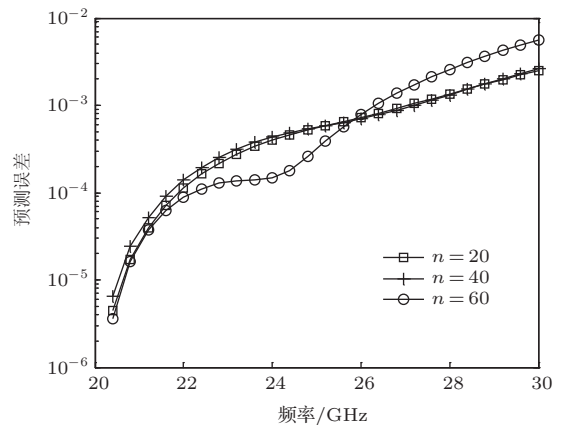


图4 不同时序个数的误差曲线

实验4 不同极化方式的比较

采用二次差分模型, 时序个数 $n = 20$, 预测频率间隔 $\Delta f = 0.1$ GHz, 仿真结果如图 6 所示. 仿真结果表明, 三种极化方式下的预测精度差异很小, 并随着预测频率的升高趋向同一水平. 图 7 为利

用水平极化模型参数预测圆极化、垂直极化下雨衰减值的误差曲线. 从图中可以看到, 无论是圆极化、垂直极化, 两种误差曲线是基本重合的, 因此可以忽略极化方式对差分模型参数的影响, 从而减少了由不同极化方式造成的雨衰计算量.

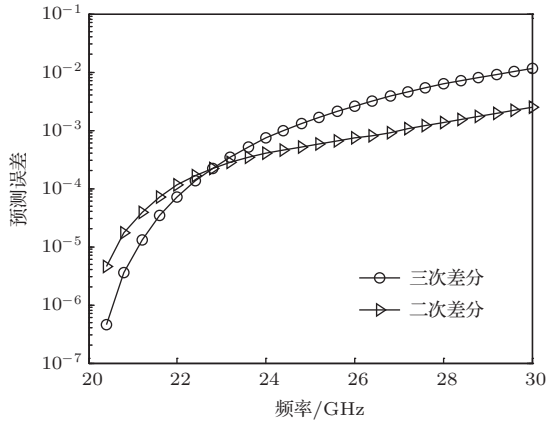


图5 不同差分次数的误差曲线

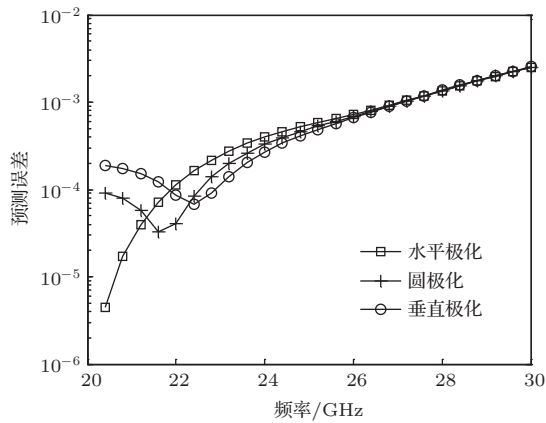


图6 不同极化方式的误差曲线

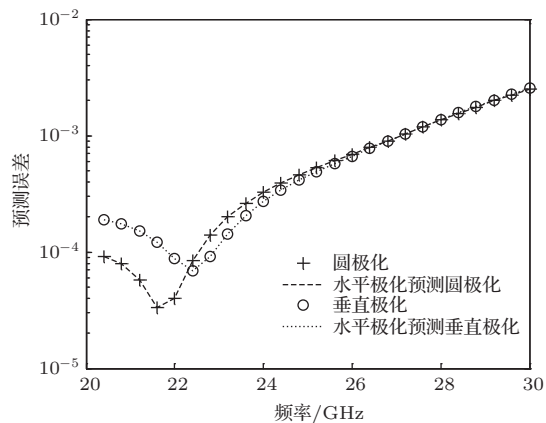


图7 水平极化参数预测的误差曲线

5 结 论

本文通过分析DAH模型下的雨衰-频率曲线, 提出了基于差分思想的Ka波段雨衰预测模型. 该模型利用雨衰差分值的线性特性构造平稳时序, 模型表述简单, 涉及参数少, 计算复杂度低. 研究结果表明, 以广州地区为例, 差分雨衰预测模型与DAH模型相比预测误差可达 10^{-3} 以下, 并在预测中可忽略极化方式对模型参数的影响, 因此对Ka波段雨衰衰减技术的研究和应用具有一定的参考价值, 下一步将对该模型在实时数据下的有效验证做深入研究.

参考文献

- [1] International Telecommunication Union 2004 Recommendation ITU-R P. 618-8
- [2] Dissanayake A, Allnutt J E, Haidara J 1997 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **45** 1546
- [3] Liu X C, Gao T C, Qin J, Liu L 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2156 (in Chinese)[刘西川, 高太长, 秦健, 刘磊 2010 物理学报 **59** 2156]
- [4] Wang Y L, Da X Y 2011 *J. Xi'an Jiaotong Univ.* **45** 78 (in Chinese) [王艳岭, 达新宇 2011 西安交通大学学报 **45** 78]
- [5] da Silva Mello L, Pontes M S, Couto de Miranda E 2012 *Electron. Lett.* **48** 545
- [6] Luini L, Capsoni C 2013 *Electron. Lett.* **49** 307
- [7] Kanellopoulos S A, Panagopoulos A D, Kourogiorgas C I, Kanellopoulos J D 2013 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **61** 1546
- [8] Jiang S T, Gao T C, Liu X C, Lie L, Liu Z T 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 154303 (in Chinese)[姜世泰, 高太长, 刘西川, 刘磊, 刘志田 2013 物理学报 **62** 154303]
- [9] Yang R K, Li L, Zhong P, Zhao Z W 2011 *Chin. J. Radio Sci.* **26** 875 (in Chinese) [杨瑞科, 李磊, 钟普, 赵振维 2011 电波科学学报 **26** 875]
- [10] Nalinggam R, Ismail W, Mandeep J S 2011 *IET Microw. Antennas Propag.* **13** 1546
- [11] Zhang Y 2013 *Chin. Phys. B* **22** 050502
- [12] Yang S Z 1991 *Time Series Analysis in Engineering Application* (Vol. 1) (Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press) p181 (in Chinese) [杨叔子 1991 时间序列分析的工程应用 (上册) (武汉: 华中科技大学出版社) 第181页]
- [13] Wang R X 2006 *Random Process* (Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press) p136 (in Chinese) [汪荣鑫 2006 随机过程 (西安: 西安交通大学出版社) 第136页]

Rain attenuation prediction at Ka band based on difference stationary timeseries*

Zhang Yi[†] Da Xin-Yu

(School of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

(Received 10 November 2013; revised manuscript received 29 November 2013)

Abstract

To cope with the issue of multi-parameter and intricate calculation of classical models in predicting rain attenuation in Ka band, a method is presented to reduce the complexity by utilizing difference stationary time-series. By this method, a prediction model is established based on the difference transform of leader rain attenuation data, and parameters of stationary time-series are estimated to compute the rain attenuation at each frequency point in Ka band for achieving linear prediction. Simulations show that the prediction precision depends on prediction interval, the number of time-series and the frequency of difference. Compared with Dissanayake-Allaut-Haidara model, the proposed model has a prediction error of less than 10^{-3} when prediction interval is 0.1 GHz and the number of time-series is 20 with quadratic difference. Furthermore, the simulation results also indicate that the proposed method is simple and practical due to the fact that influence of polarization mode on model parameters may be ignored.

Keywords: Ka band, rain attenuation prediction, difference, stationary time-series

PACS: 02.30.Lt, 92.60.jf, 92.60.Wc

DOI: [10.7498/aps.63.060203](https://doi.org/10.7498/aps.63.060203)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60972042, 61271250).

[†] Corresponding author. E-mail: zhangyi1290@163.com