

一种新的 Ka 频段雨衰预测模型

达新宇, 王艳岭

(空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

摘要:雨衰的预测与计算是 Ka 频段卫星通信中的关键问题之一。分析了 Ka 频段 DAH 雨衰预测模型,归纳了 DAH 模型的计算步骤。基于维纳预测思想,提出了一种结构相对简单、计算量较小、易于迭代的新雨衰预测模型,给出了具体算法与步骤。仿真结果表明,新模型在水平、垂直和圆极化方式下具有与 DAH 模型几乎一致的变化特性,在不同地区也具有一致的预测效果,当阶数为 2 和 3 时,新雨衰预测模型与 DAH 模型最大偏差分别不大于 0.065 dB 和 0.005 dB。证明提出的新模型有效、算法简单,易于工程化。

关键词:Ka 频段;雨衰;DAH 模型;维纳预测

DOI:10.3969/j.issn.1009-3516.2010.05.013

中图分类号:TN927.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2010)05-0060-05

雨衰是影响 Ka 频段(20 GHz - 30 GHz)链路质量的最主要问题,因此,准确地预测与估算具体地域的雨衰,对卫星通信系统设计和保障卫星链路质量至关重要。文献[1-3]中给出了一种 ITU-R 雨衰预测模型,文献[4-5]中给出了一种 DAH 雨衰预测模型,这两种模型的计算方法相对复杂,参数较多,计算量很大。文献[6]中提到了一种频率因子转换法,即在已知下行频段雨衰值时可推算出上行频率点的雨衰,该模型虽然减少了参数个数,但是它具有实用范围小等缺点。本文基于维纳预测^[7]的思想,提出了一种结构比较简单,计算量较小的 Ka 频段雨衰预测模型。仿真表明该模型与 DAH 模型具有相同的性能。

1 DAH 雨衰预测模型

DAH 模型是 Dissanayake、Allnutt 和 Haidara 等人利用欧洲宇航局(ESA)的 INTELSAT 卫星系统、Olympus 卫星、美国国家宇航局(NASA)的先进通信技术卫星(ACTS)等做电波传播试验得到的数据进行进一步统计分析后,提出的一种预测模型。该模型具体计算步骤归纳如下^[4-5]:

1) 计算结冰层的高度 h_r :

$$h_r = \begin{cases} 5 - 0.075(\varphi - 23) & , & \varphi > 23^\circ & \text{北半球} \\ 5 & , & 0^\circ \leq \varphi \leq 23^\circ & \text{北半球} \\ 5 + 0.1(\varphi + 21) & , & -71^\circ \leq \varphi \leq 21^\circ & \text{南半球} \\ 0 & , & \varphi < -71^\circ & \text{南半球} \end{cases} \quad (1)$$

式中 φ 是地面站纬度。

2) 计算结冰层以下倾斜路径 L_s :

* 收稿日期:2010-01-22

基金项目:陕西省自然科学基金资助项目(2009JM8001-3)

作者简介:达新宇(1961-),男,陕西眉县人,教授,博士生导师,主要从事现代通信系统与电路新技术研究。

E-mail:wangkdy@163.com

$$L_s = \begin{cases} \frac{(h_r - h_s)}{\sin\theta} & , \theta \geq 5^\circ \\ \frac{2(h_r - h_s)}{\sqrt{\left[\sin^2\theta + \frac{2(h_r - h_s)}{R_e}\right]} + \sin\theta} & , \theta < 5^\circ \end{cases} \quad (2)$$

式中: R_e 为地球有效半径,一般取值为 8 500 km; h_s 为地面站海拔高度; θ 为传播路径的仰角。

3) 计算倾斜路径的水平投影 L_G :

$$L_G = L_s \cos\theta \quad (3)$$

4) 查表获得当地平均 0.01% 时间概率点降雨率 $R_{0.01}$ 。

5) 计算衰减率 λ :

$$\lambda = \alpha R_{0.01}^\gamma \quad (4)$$

式中 α 为雨衰因子。

6) 计算 0.01% 时间水平路径调整因子 $rh_{0.01}$:

$$rh_{0.01} = \frac{1}{1 + 0.78 \sqrt{\frac{\lambda L_G}{f}} - 0.38 [1 - \exp(-2L_G)]} \quad (5)$$

7) 计算穿越降雨路径 L_r :

$$L_r = \begin{cases} \frac{h_r - h_s}{\sin\theta} & \zeta \leq \theta \\ \frac{L_G rh_{0.01}}{\cos\theta} & \zeta > \theta \end{cases} \quad (6)$$

式中 $\zeta = \arctan\left(\frac{h_r - h_s}{L_G rh_{0.01}}\right)$ 。

8) 计算 0.01% 时间垂直路径调整因子 $rv_{0.01}$:

$$rv_{0.01} = \frac{1}{1 + \sqrt{\sin\theta} \left\{ 31 \left[1 - \exp\left(-\frac{\theta}{1 + \psi}\right) \right] \frac{\sqrt{\lambda L_r}}{f^2} - 0.45 \right\}} \quad (7)$$

式中 $\psi = \begin{cases} 36 - |\varphi|, & |\varphi| < 36^\circ \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$ 。

9) 计算 0.01% 时间概率雨衰减 $A_{0.01}$:

$$A_{0.01} (\text{dB}) = \lambda L_r rv_{0.01} \quad (8)$$

式中 λ 为降雨率,其计算公式为:

$$\lambda = \alpha R^\gamma \quad (9)$$

式中: $\alpha = \frac{[\alpha_h + \alpha_v + (\alpha_h - \alpha_v) \cos^2\theta \cos(2\xi)]}{2}$; $\gamma = \frac{[\alpha_h \gamma_h + \alpha_v \gamma_v + (\alpha_h \gamma_h - \alpha_v \gamma_v) \cos^2\theta \cos(2\xi)]}{2\alpha}$; ξ 为极化角

($\xi_{\text{水平}} = 0^\circ$, $\xi_{\text{垂直}} = 90^\circ$, $\xi_{\text{圆}} = 45^\circ$); $\theta = \arctan\left[\frac{\cos\varphi \cos(\varphi_1 - \varphi_2) - \frac{R_e}{R_e + h_e}}{\sqrt{1 - [\cos\varphi \cos(\varphi_1 - \varphi_2)]^2}}\right]$ 。

2 新预测模型的提出

由于 DAH 模型的参数多,计算量较大,且在计算雨衰时,各个参数都与极化方式、频率等有关,在计算不同极化、不同频率下的雨衰时,需反复计算各个参数值,大大增加了计算量和计算复杂度。为了简化雨衰计算的复杂度并确保计算的精确性,根据维纳预测的思想,本文提出了一种新的雨衰预测模型。该模型可根据已知的几个连续频率点的雨衰,通过迭代递推,得出其他任意频率点的雨衰。

2.1 维纳预测的基本思想

维纳预测^[7]在信号处理中的基本思想是:已知以前时刻的 p 个数据 $x(n-1), x(n-2), \dots, x(n-p)$, 根

据信号内部之间的关联性,估计当前时刻 n 或者未来 $n+m$ 时刻的信号值。令 $x(n)$ 表示期望输出, $\hat{x}(n)$ 表示预测输出,则有:

$$\hat{x}(n) = -a_1^p x(n-1) - a_2^p x(n-2) - \cdots - a_p^p x(n-p) \quad (10)$$

$$e(n) = x(n) - \hat{x}(n) = x(n) + a_1^p x(n-1) + \cdots + a_p^p x(n-p) \quad (11)$$

式中: $e(n)$ 为预测误差; $a_1^p, a_2^p, \dots, a_p^p$ 是信号之间的关联系数。

一般通过对已知数据的自相关函数的有偏估计代入 Yule-Walker 方程来求解。由于数据有限,在求解自相关函数时必然会带来一定的估计误差。为了避免求自相关函数,本文采用 Burg 递推法并利用 Levenson 递推公式^[8-9],导出前向和后向误差,根据平均误差功率最小的原则,解出关联系数 $a_1^p, a_2^p, \dots, a_p^p$ 。

2.2 新模型的计算步骤

基于上述思想,令 $x(n-1), x(n-2), \dots, x(n-p)$ 表示某一地区几个连续频率点的雨衰, $x(n)$ 为待预测的频率点的雨衰, p 为模型阶数。则新模型算法具体步骤如下:

1) 计算模型前向误差 $e_F^p(n)$ 、后向误差 $e_B^p(n)$:

$$e_F^p(n) = x(n) + \sum_{k=1}^p a_k^p x(n-k) \quad (12)$$

$$e_B^p(n) = x(n-p) + \sum_{k=1}^p a_k^p x(n-p+k) \quad (13)$$

2) 计算误差平均功率 w_p :

$$w_p = 0.5(w_F^p + w_B^p) \quad (14)$$

式中: $w_F^p = \frac{1}{N-p} \sum_{n=p}^{N-1} |e_F^p(n)|^2$; $w_B^p = \frac{1}{N-p} \sum_{n=p}^{N-1} |e_B^p(n)|^2$ 。

3) 计算关联系数 a_p^p :

采用平均误差功率最小原则,利用梯度法求 w_p 对 a_p^p 的微分,令其结果等于零解出 a_p^p ,得:

$$a_p^p = \frac{-2 \sum_{n=p}^{N-1} e_{p-1,F}(n) e_{p-1,B}(n-1)}{\sum_{n=p}^{N-1} (|e_{p-1,F}(n)|^2 + |e_{p-1,B}(n-1)|^2)} \quad (15)$$

4) 计算求解其它系数 $a_1^p, a_2^p, \dots, a_{p-1}^p$:

$$a_i^p = a_{1,i}^p + a_p^p a_{p-i}^p \quad (16)$$

5) 计算雨衰的大小:

$$\hat{x}(n) = -a_1^p x(n-1) - a_2^p x(n-2) - \cdots - a_p^p x(n-p) \quad (17)$$

$$\hat{x}(n+1) = -a_1^p x(n) - a_2^p x(n-1) - \cdots - a_p^p x(n-p+1) \quad (18)$$

依次类推,得出 Ka 频段的雨衰值。

3 仿真及结果分析

以西安(纬度 34.30°, 经度 108.93°, 海拔高度 396.9 m, 降雨率 39 mm/h)、北京(纬度 39.80°, 经度 116.47°, 海拔高度 31.2 m, 降雨率 58 mm/h)、上海(纬度 31.17°, 经度 121.43°, 海拔高度 4.5 m, 降雨率 80 mm/h)为例,选取通信卫星的轨道位置为 92°E,在不同的模型阶数下和 DAH 雨衰预测模型进行仿真比较^[5]。所得的模型关联系数见表 1。

从表 1 模型的关联系数中可以得出,在同一地区的不同极化方式下,模型的关联系数大致相同,其最大偏差约为 0.004 3,所以,在工程化应用中,可以忽略极化的不同所带来的关联系数的变化。

通过仿真,在水平、垂直和圆极化方式下具有相似的特性,图 1 为水平极化下,阶数分别为 2 和 3 时,新模型(New Model, NM)与 DAH 模型预测的雨衰随频率变化曲线。从图中可以得出:在 Ka 频段,提出的模型在 2 阶和 3 阶情况下,在不同地区基本上与 DAH 雨衰模型具有相当的预测效果,如果阶数增大,逼近效果会更好,表明提出的模型在精度方面是有效的;不同地区、不同极化下 Ka 频段雨衰随频率大致基本呈线性关系,这为工程估算提供了参考;不同地区、不同频率下,由于降雨量的不同,其雨衰是有明显区别的。

表 1 各个地区在不同极化下的关联系数

Tab. 1 The parameter of different polarization methods in different area

地区	极化方式	a_{11}	a_{21}	a_{22}	a_{31}	a_{32}	a_{33}
西安	水平极化	-0.999 0	-1.996 7	0.998 8	-2.992 3	2.989 0	-0.996 7
	垂直极化	-0.999 0	-1.970	0.998 9	-2.988 0	2.980 2	-0.992 1
	圆极化	-0.999 0	-1.970	0.998 9	-2.990 8	2.985 7	-0.994 9
北京	水平极化	-0.999 1	-1.997 2	0.999 0	-2.993 2	2.990 2	-0.997 0
	垂直极化	-0.999 2	-1.997 3	0.999 0	-2.991 7	2.987 2	-0.995 4
	圆极化	-0.999 1	-1.997 2	0.999 0	-2.992 3	2.988 4	-0.996 1
上海	水平极化	-0.999 2	-1.997 6	0.999 2	-2.994 3	2.991 8	-0.997 5
	垂直极化	-0.999 3	-1.997 7	0.999 2	-2.992 1	2.987 4	-0.995 2
	圆极化	-0.999 2	-1.997 6	0.999 2	-2.993 6	2.990 5	-0.996 9

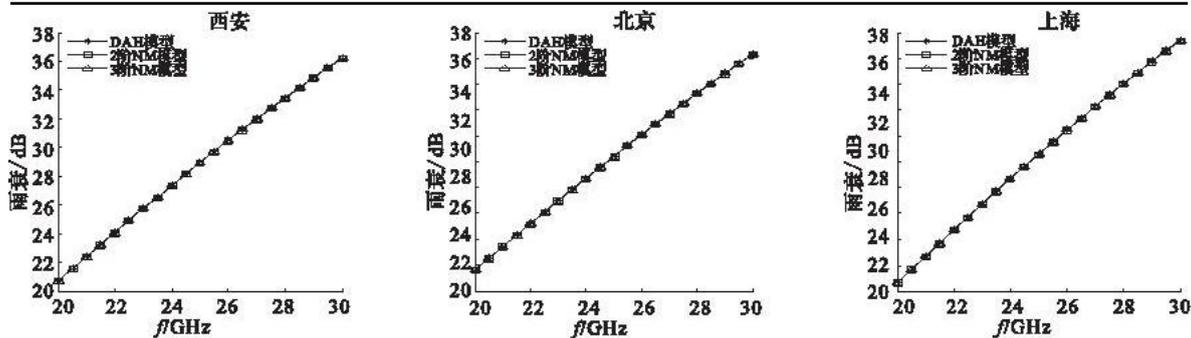


图 1 不同地区新旧雨衰预测模型性能比较

Fig. 1 Performance Comparison of new model and DAH model in different areas

由于提出的新模型和 DAH 预测模型具有非常接近的预测效果,需要精确地研究新模型在不同阶数下与 DAH 模型的预测细微差别,图 2 为新模型和 DAH 模型的预测偏差。

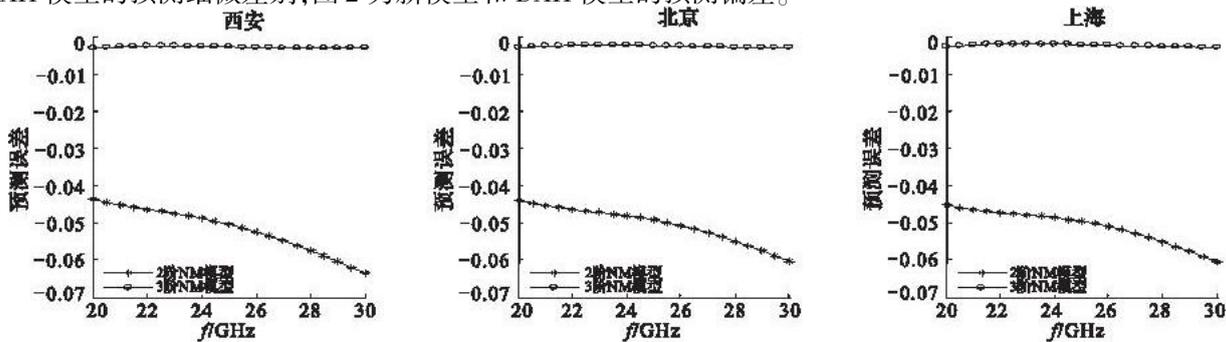


图 2 新模型和 DAH 模型的偏差

Fig. 2 Deviation of new model and DAH model

从图 2 可以看出,在新模型阶数为 2 时,它和 DAH 模型的最大偏差为 0.065 dB,在阶数为 3 时,其最大偏差小于 0.005 dB,这表明 3 阶新雨衰预测模型已经可以达到与 DAH 模型基本一样的预测效果。如果新模型的阶数增大,二者预测误差会更小,效果会更好。由于 3 阶新雨衰预测模型只有 3 个关联系数,并且已知的基准频率为 20 GHz 以下的雨衰预测数据隐含了降雨率、极化方式、有效路径以及频率变化等因素的影响,故该关联系数一般不随频率变化而变化,且在不同极化下差异很小,所以,与 DAH 模型相比,在达到相同的预测效果下,新模型大大简化了雨衰的计算量。

4 结束语

本文针对 DAH 雨衰预测模型的计算量大,复杂度高的不足,提出了一种简化的新雨衰估算模型,对该模型的算法进行了分析和推导。结果表明,该模型阶数为 3 时就可以达到与 DAH 雨衰预测模型相同的效果。该模型由于结构与算法简单,运算量小,更适用于工程应用。

参考文献:

- [1] International Telecommunication Union. Recommendation ITU – RP 837 – 3 Characteristics of Precipitation for Propagation Modelling[S]. Geneva: International Telecommunication Union Electronic Publishing Service, 2004.
- [2] International Telecommunication Union. Recommendation ITU – RP 618 – 8 Propagation Data And Prediction Methods Required for the Design of Earth – space Telecommunication Systems[S]. Geneva: International Telecommunication Union Electronic Publishing Service, 2004.
- [3] 康健,王宇飞. 中国 Ka 波段卫星通信线路的雨衰分布特性[J]. 通信学报,2006,27(8):78 – 81.
KANG Jian, WANG Yufei. Rain Attenuation Distribution Characteristic of Ka Band Satellite Communication[J]. Journal on Communications, 2006,27(8):78 – 81. (in Chinese)
- [4] Dissanayake A W, Allnutt J E, Haidara F. A Prediction Model That Combines Rain Attenuation and Other Propagation Impairments Along Sarth – satellite Paths[J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 1997, 45(10):1546 – 1558.
- [5] 王宇飞. Ka 频段多波束卫星通信系统降雨衰减补偿方法的研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2006.
WANG Yufei. Research on Rain Attenuation Compensation Methods in Ka Band Multi – beam Satellite Communication[D]. Jilin: Jilin University, 2006. (in Chinese)
- [6] 钟怀东,徐慨,侯柳英. Ka 频段卫星通信上行链路自适应功率控制[J]. 计算机工程,2009,35(10):107 – 109.
ZHONG Huaidong, XU Kai, HOU Liuying. Uplink Adaptive Power Control in Ka Band Satellite Communication[J]. Computer Engineering, 2009, 35(10): 107 – 109. (in Chinese)
- [7] Shui P L, Zhao Y B. Image Denoising Algorithm Using Doubly Local Wiener Filtering with Block – adaptive Windows in Wavelet Domain[J]. IEEE Signal Process, 2007, 87(1):1721 – 1734.
- [8] 赵知劲. 统计通信信号处理技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2009.
ZHAO Zhijin. Study on Statistical Signal Processing for Communication[D]. Xi'an: Xidian University, 2009. (in Chinese)
- [9] 沈福民. 自适应信号处理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2001.
SHEN Fumin. Adaptive Signal Processing[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2001. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)

A New Model for Rain Attenuation Prediction in Ka Band

DA Xin – yu, WANG Yan – ling

(Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: The prediction and calculation of rain attenuation is one of the key problems of satellite communication in Ka – band. The model of DAH rain attenuation prediction in Ka – band is analyzed and its calculation procedure is summed up. Based on Wiener prediction, a new predictive model of rain attenuation, which enjoys the advantages of relatively simple structure, the ease of iteration and simple calculation amount, is established. Its concrete algorithm and procedure are also given. The simulation results show that the characteristics of this new model are almost the same as those of DAH model under horizontal, vertical and circular polarized modes. The predictions in different regions are also consistent. The maximum deviations between this new model and DAH model are no more than 0.065 dB and 0.005 dB respectively when the orders are 2 and 3. These demonstrate that the new model proposed is available for use, effective, simple in algorithm and easy to be applied in engineering.

Key words: Ka band; rain attenuation; DAH model; Wiener prediction