

微波雨衰减序列的模拟统计研究

杨瑞科¹, 赵振维², 李 磊¹, 林乐科², 张一治¹, 李 莉¹

(1. 西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西西安 710071; 2. 中国电波传播研究所, 山东青岛 266107)

摘 要: 降雨测试数据和参量引入雨衰时间序列 EMB 模型, 模拟了海口、青岛和北京雨区的斜径降雨衰减时间序列, 进行功率谱估计, 与文献中测试得到的结果有好的一致性. 通过对模拟海口、青岛和北京 12.5GHz 雨衰序列的衰落持续时间的统计, 并与观测统计结果及 ITU-R 预测结果比较, 在海口雨区有好的一致性; 在青岛和北京雨区, 当衰落时间较短, 约小于 100s 时, 模拟与测试的统计结果一致性好, 而对于长衰落时间的结果存在偏差, 与 ITU-R 预测结果有一定差异. 30/20GHz 模拟统计与 ITU-R 预测结果的比较, 对于较小衰落门限和较短衰落持续时间均有好的一致性, 但衰落门限较高的较长衰落时间时的一致性较差. 结果表明该模拟统计方法可应用于降雨量较大的雨区, 然而, 对于某些雨区, 模拟序列的长衰落持续时间的统计或 ITU-R 预测模型还需修正. 论文工作为更高频段无线电系统中雨衰落储备技术的研究奠定基础.

关键词: 微波; 降雨; 衰减时间序列; 衰落统计

中图分类号: TN011

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2013) 12-2513-05

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

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.12.031

Research on Statistics and Simulation of Rain Attenuation Time Series at Microwave

YANG Rui-ke¹, ZHAO Zhen-wei², LI Lei¹, LIN Le-ke², ZHANG Yi-zhi¹, LI Li¹

(1. School of Physis and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

2. China Research Institute of Radio Wave Propagation, Qingdao, Shandong 266107, China)

Abstract: The rain attenuation time series are simulated by the EMB model based on rain measured data and parameters at Haikou, Qingdao and Beijing. The power spectra estimated with simulative series are in good agreement with the measured result in references. The probability of fade exceeding a given fade duration value are calculated based on simulative attenuation time series, and compared with ITU-R predictive and measured values at 12.5GHz, in Haikou, Qingdao and Beijing. At Haikou, the statistics agree with predicted and measured results. At Beijing and Qingdao, as fade duration is less than about 100s, the simulative statistics are in agreement with measured results. As fade duration is more than about 100s, there are the difference among them. At 30/20GHz, for the smaller fade threshold and duration, the statistics based on simulation approach to the results predicted by ITU-R. As the larger fade threshold and duration, the statistical results by simulation are different to the prediction statistics by ITU-R. The results show that the simulation method is available for the rain region of abundant rainfall. However, at insufficient rainfall region, the method or ITU-R prediction may be modified as longer fade duration. It is significant groundwork for rain fade mitigation techniques development in higher frequency wireless systems.

Key words: microwave; rain; attenuation time series; fade statistics

1 引言

随着卫星通信的发展以及终端用户业务需求量、通信容量不断增大, 所需的带宽越来越宽, 正在使用的频段更加拥挤, 已不能满足用户需求, 急需开发和应用更高的频段资源. 然而, 随着通信频率向 Ku(14/12GHz) 和 Ka(30/20GHz) 及以上频段的发展, 降雨的影响愈来愈严

重^[1], 严重地限制系统的可用性和服务质量. 为了提高系统的可用性, 必需采用抗雨衰技术, 即衰落削减技术^[2] (Fade Mitigation Techniques, FMT). 要实现 FMT 技术, 就必须对降雨衰减、尤其是雨衰减动态和统计特性进行详细分析. 降雨及降雨衰减研究已开展较多^[3~6], 而降雨动态及统计特性的研究还很少. 降雨动态与衰落统计特性的研究需建立在长期的实验测量或模拟得到的雨

衰时间序列的基础上,降雨传播实验周期长、成本高、实现难度大,使得计算机仿真成为一种行之有效的分析方法,能尽快地评估降雨对系统性能的影响,为系统的抗雨衰措施提供依据。

降雨时间序列和衰落统计特性的研究在欧美一些国家已经展开, Maseng-Bakken^[7]在 1981 年提出了降雨衰减序列模型,法国航空航天和国立太空科学研究中心(ONERA-CNES)对该模型进行了发展,得到了 Enhanced Maseng-Bakken (EMB)模型,并应用意大利、比利时和加拿大的一些数据进行了模型验证,且已经应用到 ONERA-CNES 通道模型^[8,9]。2001 年欧洲合作科技研究联盟(COST)将 EMB 模型用在毫米波无线系统的传播损耗削减方案中^[10]。2009 年 ITU-R^[11]推荐 EMB 方法为降雨衰减时间序列合成的方法。然而,能否用于中国各个雨区还需进行大量的研究,中国的研究处于开始阶段,中国电波传播研究所和西安电子科技大学等正在努力从事该方面的研究^[12,13],本文基于中国典型雨区的观测结果和 EMB 模型进行雨衰序列模拟仿真与衰落统计分析研究,为我国的降雨衰模拟与统计研究提供方法及通信系统抗雨衰技术的发展奠定基础。

2 雨衰减时间序列的产生方法

降雨衰减时间序列合成的 EMB 模型^[8,11]模拟产生雨衰序列的原理流程如图 1 所示,图 1 中, m 和 σ : 对数正态雨衰减分布的均值和标准偏差, p : 降雨百分概率, β : 描述时间动态特性的参量, A_{offset} : 调整时间序列与降雨百分概率相匹配的偏移量。

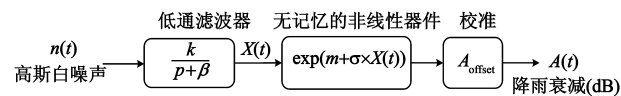


图1 雨衰减时间序列产生流程图

雨衰时间序列, $A_{\text{rain}}(kT_s)$, $k = 1, 2, \dots$, 的产生方法为:产生一个均值为 0 和标准方差为 1, 时间间隔为 1s 的随机高斯白噪声时间序列 $n(kT_s)$;应用式(1)描述的递归低通滤波器在设初值 $X(0) = 0$ 时,对噪声序列进行滤波,生成一个随机时间序列, $X(kT_s)$,

$$X(kT_s) = \rho \times X((k-1)T_s) + \sqrt{1-\rho^2} \times n(kT_s), \quad (1)$$

$$k = 1, 2, \dots$$

其中 $\rho = \exp(-\beta T_s)$;使 $X(kT_s)$ 通过无记忆的非线性器件,式(2),使其从正态分布转变成为一个对数正态分布的雨衰减时间序列, $Y_{\text{rain}}(kT_s)$ (dB),

$$Y_{\text{rain}}(kT_s) = \exp(m + \sigma X(kT_s)) \quad (2)$$

再进行偏移量校正,可得到所需的雨衰减事件的时间序列。

$$A_{\text{rain}}(kT_s) = \text{Max}[Y(kT_s) - A_{\text{offset}}, 0] \quad (3)$$

3 模拟降雨衰减时间序列

对于 12.5、20 和 30GHz 的 87.5°E 卫星的斜程路径,基于海口、青岛、北京站点的地理位置及降雨测量和雨衰减统计结果^[14],应用最小二乘法计算得到动态雨衰参量值如表 1 所示,表 2 中给出 0.01% 降雨时间百分概率所对应的 12.5、20 和 30GHz 降雨衰减。

表 1 海口、青岛和北京站点 $m, \sigma, A_{\text{offset}}$ 参量估计值

站点	频率(GHz)	仰角(°)	m	σ	A_{offset}
海口	12.5	55.01	-4.0376	1.8528	0.3002
	20		-2.5913	1.7184	1.0380
	30		-1.4937	1.6164	2.6616
青岛	12.5	35.74	-4.4143	1.8267	0.3010
	20		-3.0688	1.7175	0.9539
	30		-2.0552	1.6353	2.2744
北京	12.5	35.04	-4.9326	1.8905	0.1680
	20		-3.5108	1.7584	0.5586
	30		-2.4474	1.6596	1.3724

表 2 海口、青岛和北京站点的降雨率

气象站点	0.01%降雨率 (mm/h)	2.5GHz 雨衰值 (dB)	20GHz 雨衰值 (dB)	30GHz 雨衰值 (dB)
海口	95.0	15.332	35.973	73.219
青岛	63.0	10.532	26.100	51.700
北京	42.0	7.7581	19.474	38.764

根据表 1 和表 2 给出的降雨参量和衰减值,应用 EMB 方法,可得到 30/20GHz 的 0.01% 降雨概率时的海口、青岛和北京站点的地空路径雨衰时间序列,如图 2 所示。

通过对模拟产生雨衰减序列的功率谱进行估计,如图 3,可看出得到的不同降雨衰减序列功率谱密度的斜率与文献[9]中给出的测试结果的 -20dB/decade 理想斜率直线有很好的-一致性,因此,用该方法产生的降雨时间序列可用于降雨动态传播信道特性的分析研究。

4 雨衰落的统计特性分析

衰落持续时间定义为对于给定衰减门限时衰落信号超过该门限值的持续时间间隔,其统计特性是通信系统抗雨衰技术设计中必须要考虑的重要参数。

4.1 ITU-R 衰落持续时间预测方法

ITU-R 建议书中表明衰落持续时间统计特性可用衰落持续时间的发生概率函数 $P(d > D | a > A)$ 来描

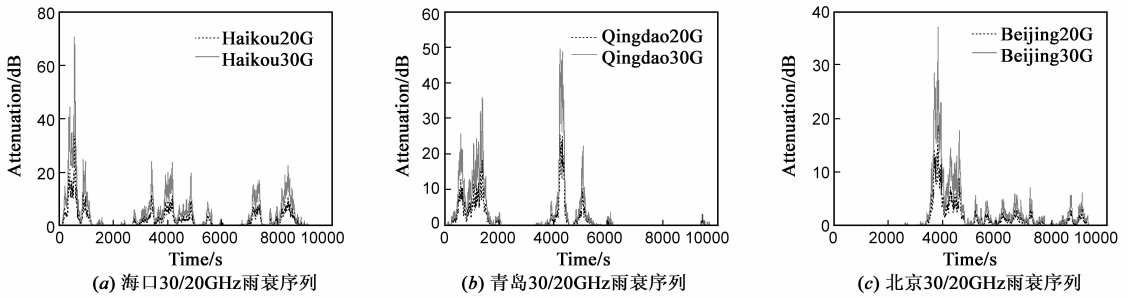


图2 模拟降雨事件的30/20GHz雨衰时间序列

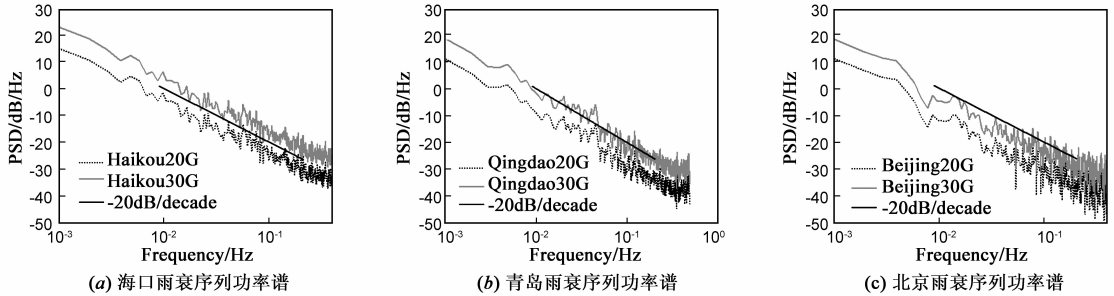


图3 模拟降雨事件的30/20GHz雨衰序列的功率谱

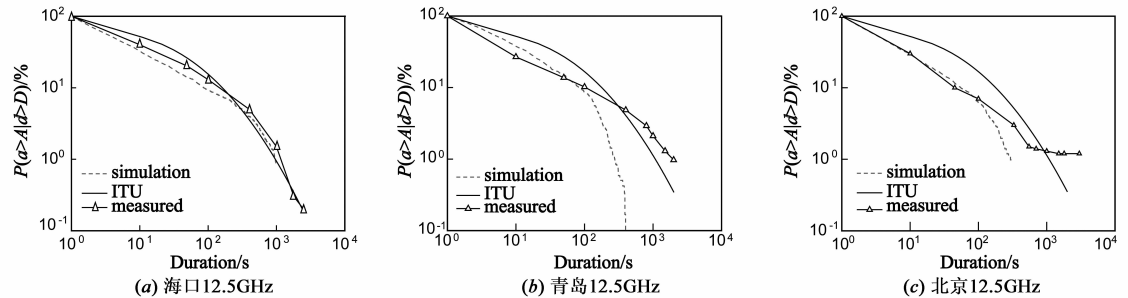


图4 衰落持续时间发生概率的比较

述^[15],其表示当衰减 a 大于给定衰减门限值 A (dB), 衰落持续时间 d 大于 D (s) 时衰落发生的概率, 其预测表达式为

$$p(d > D | a > A) = \begin{cases} D^{-\gamma}, & 1 \leq D \leq D_t \\ D_t^{-\gamma} \cdot \frac{Q\left(\frac{\ln(D) - \ln(D_2)}{\frac{\sigma}{\sigma}}\right)}{Q\left(\frac{\ln(D_t) - \ln(D_2)}{\frac{\sigma}{\sigma}}\right)}, & D > D_t \end{cases} \quad (4)$$

其中 $Q(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_z^{\infty} e^{-\frac{1}{2}x^2} dx$, $D_t = D_0 e^{p_1 \sigma^2 p_2 \sigma - 0.39}$, $D_2 = D_0 \cdot e^{-\sigma^2}$, $\sigma = 1.85 f^{-0.05} A^{-0.027}$, $D_0 = 80 \varphi^{-0.4} f^{1.4} A^{-0.39}$, $p_1 = 0.885\gamma - 0.814$, $p_2 = -1.05\gamma^2 + 2.23\gamma - 1.61$, $\gamma = 0.055 f^{0.65} A^{-0.003}$. 模型可用于 10 ~ 50GHz, 仰角 5 ~ 60°, 持续时间大于 1s 的雨衰落事件.

4.2 降雨衰减时间序列的衰落统计

应用 EMB 方法, 模拟了海口、青岛和北京雨区各 50

个 12.5GHz 的斜径雨衰减时间序列, 在 3dB 的衰减门限时对它衰落持续时间进行统计, 并与海口、青岛和北京站点一年测试数据的统计结果^[16], 及用 ITU-R 模型预测的结果进行了比较, 如图 4 所示.

从统计结果可看出, 在海口站点, 基于模拟雨衰时间序列的统计结果和测试统计结果及 ITU-R 预测的结果均有很好的一致性. 对于北京和青岛, 模拟与测试的统计结果对于小于 100s 的衰落持续时间有很好的一致性, 对于较大的衰落持续时间存在一些差别, 而观测和模拟的统计结果都与 ITU-R 的预测结果有稍大的偏差, 说明 ITU-R 预测模型可能在中国某些雨区使用时还需修正. 结果表明, 可采用模拟产生的雨衰时间序列进行降雨通信链路衰落特性的统计预测分析.

进一步应用计算机模拟仿真方法产生的海口、青岛和北京站点 Ka(30/20GHz) 频段的各 50 个雨衰时间序列进行衰落统计分析, 并与 ITU-R 预测的结果进行比较, 得到一定衰落门限下的衰落持续时间的累计概率

分布如图 5 所示.

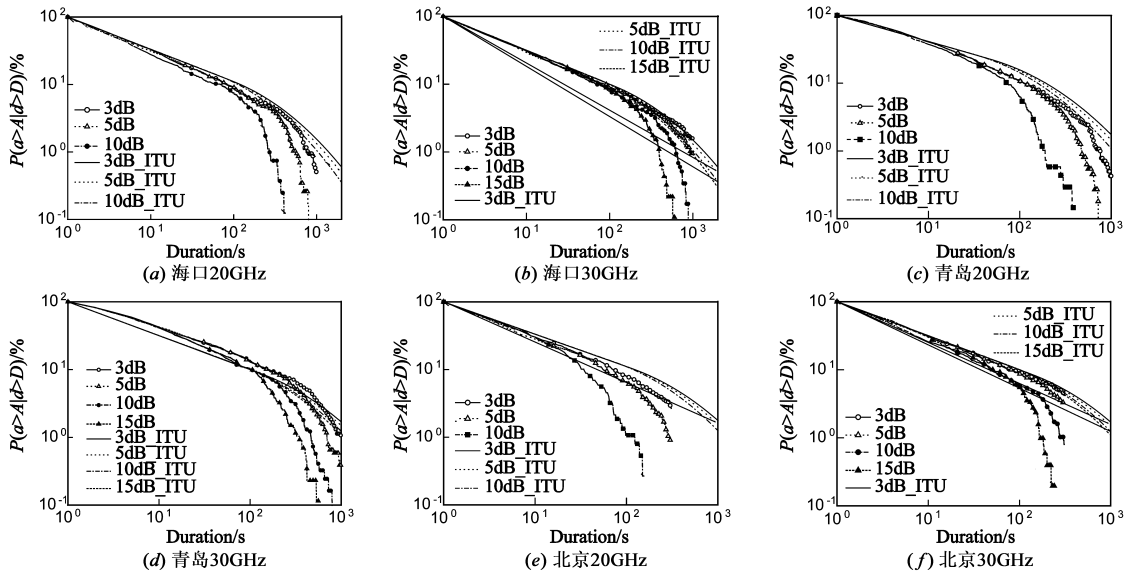


图5 衰落持续时间的统计概率

从图 5 可看出,相同的衰落持续时间,随着衰减门限值的增大其发生概率减小;对于较大的衰落持续时间,不同衰减门限值的差别越来越明显,这符合降雨的统计规律,即降雨时间序列中衰落持续时间较长的事件发生概率要比衰落持续时间短的发生概率小,这是由于一场降雨中观测点的降雨率很难较长时间保持不变.比较结果可看出,对于较小的衰减持续时间,模拟统计与 ITU-R 的预测结果一致性较好,但对较大的持续时间,差别较大,衰减门限小时一致性稍好,而衰减门限大时差别显著.实际上降雨量较小的广布式降雨中降雨率及其变化率均小于对流性较强的对流式降雨;因此,衰减门限较大时,随衰减门限的变化,衰落持续时间应该有一定的差别.而较大的差别也可能是由于 EMB 模拟产生的降雨衰减序列中持续时间较长的数据量较少,也可能由于 ITU-R 预测模型在一些雨区,尤其在北方近年来由于全球气候变化等因素引起降雨量有所减小的雨区应用时需要改进.

5 总结

基于欧美降雨环境建立的 EMB 雨衰时间序列模型与基于测量得到的中国典型雨区降雨参量的结合,应用于中国典型雨区的 Ku 和 Ka 频段的地空斜径链路的动态降雨衰减模拟和统计分析研究,可为各雨区的雨衰时间序列产生提供模拟方法,为更高频段通信系统的衰落持续时间的统计分析和抗雨衰技术的研究提供重要依据.研究结果表明,12.5GHz 的模拟统计分析结果在降雨量较大的海口站点与基于测试和 ITU-R 预测的结果一致性较好,表明了该模拟方法的可用性.在北

京和青岛站点,当衰落持续时间短于 100s 时一致性很好,当衰落持续时间较大时有偏差,但基于模拟和测试的统计结果均与 ITU-R 的预测结果存在差异,如图 4.基于 20 和 30GHz 模拟结果与 ITU-R 预测结果的比较,如图 5,在较小的衰落门限和短衰落时间时,一致性很好,但对于大衰减门限值的大衰落持续时间,差别较明显,表明此情况下或模拟方法或 ITU-R 预测模型在中国某些雨区应用时有待进一步改进和研究,也还需更长时间的进一步的实验观测研究,这正是下一步的工作.

参考文献

- [1] A Y Abdulrahman, et al. Rain attenuation predictions on terrestrial radio links: differential equations approach[J]. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 2012, 23: 293 - 301.
- [2] R J Acosta. Rain fade compensation alternatives for Ka-band communication satellites[A]. 3rd Ka band Utilization Conference [C]. Sorrento, Italy: NASA Technical Memorandum, 1997. 1 - 14.
- [3] A Y Abdulrahman, et al. A new rain attenuation conversion technique for tropical regions[J]. Progress in Electromagnetics Research, 2010, B26(1): 53 - 67.
- [4] 李应乐, 黄际英. 雨滴的衰落截面模型和参数估计[J]. 电子学报, 2004, 32(3): 505 - 507.
Li Yingle, Huang Jiying, The model of attenuation cross-section for raindrops and estimation of the parameters[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(3): 505 - 507. (in Chinese)
- [5] A Y Abdulrahman, et al. Rain attenuation predictions on terres-

- trial radio links: differential equations approach[J]. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 2012, 23: 293 – 301.
- [6] 赵振维, 吴振森, 沈广德. 利用雨滴尺寸分布数据确定雷达测雨参数[J]. 电子学报, 2000, 28(3): 109 – 111.
Zhao Zhenwei, Wu Zhensen, Shen Guangde. Determination of radar parameters for measuring rainfall based on raindrop size distribution data[J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(3): 109 – 111. (in Chinese)
- [7] Maseng T, Bakken P M. A stochastic dynamic model of rain attenuation[J]. IEEE Transaction Communication, 1981, COM-29(5): 660 – 669.
- [8] Lacoste F, et al. Improvement of the ONERA-CNES rain attenuation time series synthesizer and validation of the dynamic characteristics of the generated fade events[J]. Space Communications, 2005, 20(1-2): 45 – 59.
- [9] Carrie G, et al. A new 'event-on-demand' synthesizer of rain attenuation time series at Ku-, Ka- and Q/V-bands[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2011, 29: 47 – 60.
- [10] FILIP M, et al. COST 280: Propagation impairment mitigation for millimeter wave radio systems[A]. Twelfth International Conference on Antennas and Propagation (ICAP 2003)[C]. Exeter, UK: ICAP, 2003. 573 – 576.
- [11] ITU-R P. 1853, Tropospheric Attenuation Amplitude Synthesis[S]. 2009.
- [12] Zhao Zhenwei, Lu Changsheng, Lin Leke. Modeling and Prediction Methods of Rain Attenuation Statistics[R]. ITU-R Doc. 3J/20 and 3M/25, 2008.
- [13] 杨瑞科, 等. 我国典型地区动态降雨衰减时间序列仿真研究[J]. 电波科学学报, 2011, 26(5): 875 – 880.
Yang Ruike, et al. Simulation of dynamic rain attenuation time series at typical regions of China[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2011, 26(5): 875 – 880. (in Chinese)
- [14] 孙修贵. 中国主要城市降雨雨强分布和 Ku 波段的降雨衰减[M]. 北京: 气象出版社, 2004.
Sun Xiugui. The Rainfall Distribution and the Rainfall Attenuation at Ku-Band for the Main City in China[M]. Beijing: Publishing House of Weather, 2004. (in Chinese)
- [15] ITU-R P. 1623 – 1, Prediction Method of Fade Dynamics on Earth-Satellite[S]. 2005.
- [16] 张鑫. 雨衰减动态特性分析与建模研究[D]. 北京: 电子科学研究院, 2012.
Zhang Xin. Analysis and modeling of rain fade dynamics[D]. Beijing: China Academy of Electronics and Information Technology, 2012. (in Chinese)

作者简介



杨瑞科 男, 1963 年生于陕西. 西安电子科技大学博士、教授. 研究方向为电磁(光)波在随机介质中传播和散射、大气信道建模与仿真、及对通信和雷达系统性能影响研究等.

E-mail: ruikeyang@sohu.com