

文章编号 1005-0388(2012)05-0906-07

海口地区雨衰落斜率统计分析

赵振维¹ 张 鑫¹ 林乐科¹ 卢昌胜¹ 朱庆林^{1,2}

(1. 中国电波传播研究所 电波环境及模化技术重点实验室, 山东 青岛 266107;

2. 宇航动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710043)

摘 要 基于海口站接收的为期一年的中卫一号卫星 12.5 GHz 信标数据, 分析了降雨过程中衰落斜率的统计分布特性。衰落斜率的条件概率分布表明正负衰落斜率满足对称分布, 并对这一结论进行了验证; 基于实测衰落斜率的累积分布特性, 重新拟合了 VandeKamp 模型中的衰落斜率标准偏差, 并建立了该参数与衰减电平和时间间隔之间新的关系式。比较了 VandeKamp 模型、Salonen 模型和改进模型的预测误差, 改进模型在该地区具有最好的预测精度。

关键词 衰落斜率; 雨衰减; VandeKamp 模型; 抗衰落技术

中图分类号 P426.6

文献标志码 A

Statistical analysis on rain fade slope at Haikou

ZHAO Zhenwei¹ ZHANG Xin¹ LIN Leke¹ LU Changsheng¹ ZHU Qinglin^{1,2}

(1. China Research Institute of Radio Wave Propagation,

National Key Laboratory of Electromagnetic Environment, Qingdao Shandong 266107, China;

2. State Key Laboratory of Astronautic Dynamics, Xi'an Shaanxi 710043, China)

Abstract A statistical analysis is made of the measured distribution of fade slope of rain attenuation, measured at Haikou from the ChinaStar-1 at the frequency of 12.5GHz. The distribution of conditional probability density of fade slope shows that the positive and negative slopes are distributed symmetrically. The standard deviation of fade slope which is the only parameter in VandeKamp model is refitted to fit the cumulative distribution of fade slope and a new relationship of this parameter to attenuation level and time interval is proposed. By comparison with the VandeKamp model and Salonen model, the improved model obtains the best accuracy.

Key words fade slope; rain attenuation; VandeKamp model; fade mitigation techniques

引 言

卫星通信技术的快速发展使得 10 GHz 以下频段变得非常拥挤。高频段的使用满足了宽带、高速、小尺度地面终端的需求, 但是, 对于 10 GHz 以上频段, 降雨成为了衰减的主要因素, 影响通信的可靠性

和实用性, 大的降雨能引起数十分贝的衰减最终导致系统中断。传统的预留链路余量的方法很难满足系统的通信可靠性需求, 同时在晴天还会造成链路间的干扰, 自适应抗衰落技术考虑晴空时的最坏情况为系统设定一个固定的余量, 对于云、降雨等造成的额外衰减则采用其他自适应手段给予补偿。开环

收稿日期: 2011-12-19

基金项目: 国家自然科学基金(No:61179003); 宇航动力学国家重点实验室(2011ADL-DW0301)

联系人: 张鑫 E-mail: melodyzx@126.com

上行链路功率控制就是一种常用的自适应实时补偿手段,通过将测量得到的下行链路衰减经过频率转换后得到上行链路的衰减值,进而调整地面端的上行链路发射功率,最终达到补偿衰减的目的^[1]。雨衰减的变化速率—衰落斜率的信息直接决定了控制环路所需要的最小跟踪速率,同时可以改进控制环路的衰减短期预报精度^[2]。提高降雨衰落斜率的预报精度对微波、毫米波无线通信系统设计、高可靠工作具有重要的应用价值。因此,有必要对降雨衰落斜率进行深入建模研究。

1981年,Matricciani^[3]基于Sirio卫星11.6 GHz信标数据得出正负衰落斜率分布相似且服从对数正态分布的结论,认为大的衰减对应大的衰落斜率,并给出了衰落斜率与衰减电平之间关系的经验表达式;同年,Dintelmann^[4]开展了基于欧洲实验通信卫星(OTS)的试验工作,提供了11 GHz信标信号107次衰落事件的衰落斜率累积分布,衰减电平为5 dB;Webber^[5](1986)通过辐射计观测的13 GHz数据同样得出衰落斜率服从对数正态分布的结论;Rucker^[6](1993)分析了得自Olympus卫星的12、20、30 GHz信标信号,认为衰落斜率同时依赖于衰减电平和信号频率;Nelson和Stutzman^[7](1996)同样基于Olympus卫星开展了衰落斜率的研究工作,分析了不同衰减电平和频率条件下衰落斜率的柱状分布图,建立了依赖于频率和衰减电平的衰落斜率预测经验模型;Timothy^[8](2000)基于在新加坡接收的11 GHz INTELSAT卫星信标信号拟合得到了依赖于衰减电平的衰落斜率预测经验模型;Van de Kamp^[9](2003)基于Olympus卫星信标信号,分析了不同衰减电平下衰落斜率条件概率分布特性并建立了近似高斯分布的衰落斜率预测模型,同时分析了衰减电平、时间间隔、滤波器截止频率等参数对模型的影响,该模型已经被ITU-R采纳并形成ITU-R P. 1623建议书^[10];Salonen^[11](2003)依据试验数据对Van de Kamp模型的参数进行了重新拟合,得到了新的衰落斜率预测模型。

国内也开展了大量的雨衰减研究工作,主要研究单位有中国电波传播研究所和西安电子科技大学等,并取得了一系列的研究成果^[12-15],但基于试验数据开展的雨衰落斜率的研究工作还不多。我国于1998年发射的中卫一号通信卫星上搭载了Ku频段的信号转发器,本文基于海口地区地面站接收的中卫一号卫星信标数据对衰落斜率的统计分布特性进行了分析和研究。

1 衰落斜率统计特性分析

1.1 衰落斜率的概念

衰落斜率定义为衰落随时间变化的速率,其计算公式^[10]为

$$\zeta(t) = \frac{A(t + \frac{1}{2}\Delta t) - A(t - \frac{1}{2}\Delta t)}{\Delta t} \quad (1)$$

式中: Δt 为计算衰落斜率的时间间隔; $A(t)$ 对应采样时间为 t 时的衰减电平值。需要注意的是,在计算衰落斜率时需要滤除由对流层闪烁等因素引起的衰落的快速变化分量,因此,需要对接收的信标信号进行低通滤波,ITU-R P. 1623建议书^[10]建议低通滤波器截止频率取0.001~1 Hz,此时能有效滤除上述高频分量的影响,采用汉宁窗函数设计低通滤波器,截止频率取0.02 Hz。

衰落斜率的分布特性一般通过以下两个量来描述,一是衰落斜率条件概率密度(CPD),即 $p(\zeta|A)$,表示给定衰减值为 A 时,衰落斜率值等于 ζ 的条件概率,实际的数据处理中,考虑一定范围内的 A 和 ζ ,取1 dB和0.002 dB/s,例如:衰减为2 dB时衰落斜率等于0.01 dB/s的概率 $p(\zeta=0.01|A=2)$,实际为 $p(0.009<\zeta<0.011|1.5<A<2.5)$;另一个是衰落斜率累积分布函数(CDF),即 $P(|\zeta| \leq A)$,表示给定衰减值为 A 时,衰落斜率(绝对值)超过 $| \zeta |$ 的累积概率。

1.2 测量结果

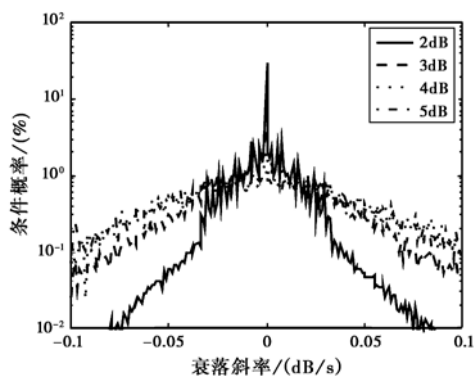
海口站信标机接收的信标信号频率为12.5 GHz。非降雨时的采样率为1 Hz,降雨时的采样率为15 Hz,并对每秒钟数据进行平均处理,通过对比降雨与非降雨时的接收信号电平值就可以得到雨衰减序列^[16]。设备可测量的衰减动态范围为0~22 dB,站点详细信息如表1所示,观测时间自2010年7月至2011年7月。

表1 海口观测站

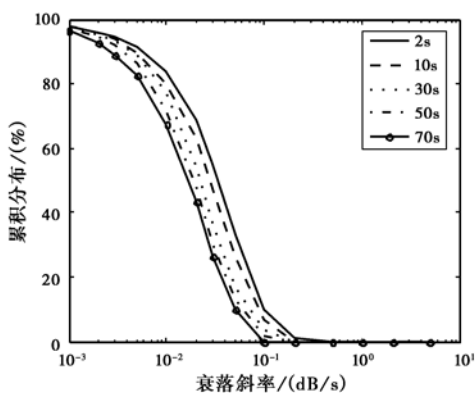
站点	经度/度	纬度/度	频率/GHz	仰角/度
海口	110.20	20.02	12.5	55

图1(a)是海口地区的衰落斜率条件概率密度的分布曲线, A 取2、3、4、5 dB,随着衰减值的增加,分布曲线向两边展开,即较大衰落斜率的发生概率增加;同时,正负衰落斜率呈对称分布。图1(b)是不同时间间隔下的衰落斜率累积分布特性,可以看出随着时间间隔的增加,衰减的变化被平均到一段

较长的时间上,同一时间概率下的衰落斜率值减小。



(a) 衰落斜率条件概率密度($\Delta t=2$ s)



(b) 衰落斜率条件累积分布($A=5$ dB)

图 1 衰落斜率统计分布

1.3 衰落斜率分布的对称性

为了验证正负衰落斜率对称分布的结论,考虑衰落斜率中值和平均正(负)衰落斜率值。中值能够表明正的(负的)衰落斜率的发生频率,若中值大于零则表明正的衰落斜率发生的次数更多,反之,则表示负的衰落斜率发生的更频繁;平均正(负)衰落斜率值则在一定程度上反映了正(负)衰落斜率的起伏程度。

图 2 给出了海口地区的衰落斜率中值随不同衰减值的变化情况,衰减电平从 2 dB 到 15 dB,间隔为 1 dB;图 3 则为平均正(负)衰落斜率值随衰减电平的变化情况,为了方便比较,对平均负的衰落斜率值取绝对值。

从图 2 可以看出,海口地区的中值随衰减值不同在零点上下极小的范围内浮动,说明正负衰落斜率的发生频率相当;图 3 中正负衰落斜率均值极为相近,且随着衰减的增加正负衰落斜率均值的变化趋势基本一致,表明正负衰落斜率的起伏程度相当。综合上述两点,衰落斜率分布是满足对称性的,这一

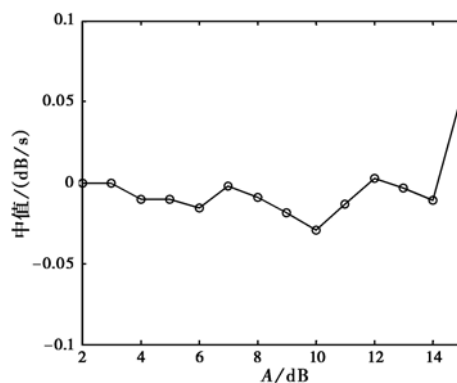


图 2 中值随衰减电平的变化

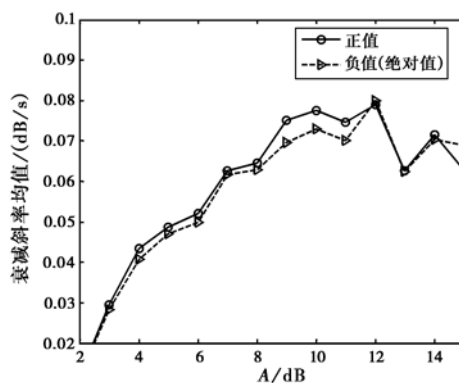


图 3 均值随衰减电平的变化

结论经其他站点数据验证同样成立^[17]。

2 衰落斜率预测模型

2.1 VandeKamp 模型^[9-10]

基于衰落斜率分布的对称性, Van de Kamp 建立的衰落斜率 CPD 计算公式为

$$p(\zeta|A) = \frac{2}{\pi\sigma_\zeta(1+(\zeta/\sigma_\zeta)^2)^2} \quad (2)$$

式中: ζ 为衰落斜率; σ_ζ 为衰落斜率标准偏差,

$$\sigma_\zeta = sF(f_B, \Delta t) \quad (3)$$

$$F(f_B, \Delta t) = \sqrt{\frac{2\pi^2}{(1/f_B^b + (2\Delta t)^b)^{1/b}}} \quad (4)$$

s 为与气候和仰角有关的参数,在欧洲和美国地区的总平均值为 0.01, f_B 为低通滤波器截止频率, Δt 为计算衰落斜率的时间间隔, b 为常数取 0.3。

对式(2)积分可得到衰落斜率的 CDF 为

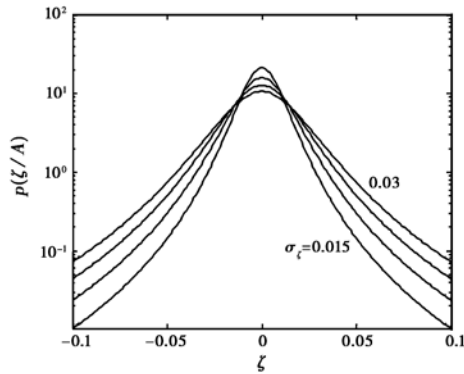
$$P(|\zeta| \leq A) = 1 - \frac{2(|\zeta|/\sigma_\zeta)}{\pi(1+(|\zeta|/\sigma_\zeta)^2)} - \frac{2\arctan(|\zeta|/\sigma_\zeta)}{\pi} \quad (5)$$

式(2)~(5)即为 VandeKamp 模型的预测公

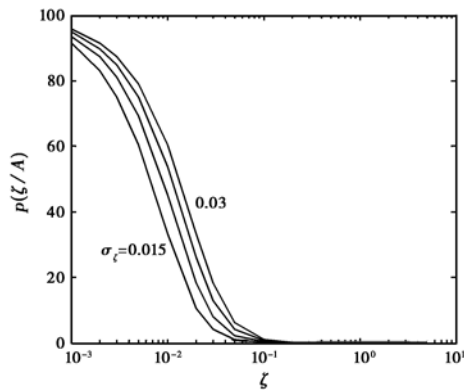
式。Salone 拟合了式(3)中参数 s 与仰角 ϵ 的关系式如下(以下称 Salone 模型)^[11]:

$$S = \frac{1}{138 - 102 \sin \epsilon} \quad (6)$$

图4是不同 σ_ζ 时模型预测的 $p(\zeta|A)$ (式(2))和 $P(\zeta|A)$ (式(5))的分布情况, σ_ζ 为模型的唯一参数,通过调整 σ_ζ 可以使图4的预测曲线与图1的实测曲线相吻合,从而达到改善模型预测精度的目的,正是基于这一点,下面对上述模型中的 σ_ζ 进行优化。



(a) 预测条件概率



(b) 预测累积分布

图4 σ_ζ 对模型预测结果的影响

2.2 VandeKamp 模型的改进

海口地区的衰落斜率分布满足对称性,式(2)和(5)可以用于描述该地区的衰落斜率分布特性。为了使预测模型能更好的描述实测结果,通过衰落斜率的条件概率分布或者累积分布(文中选择后者,即(5)式)可拟合得到不同时间间隔和衰减电平时 σ_ζ 的最优解。

图5为海口地区 σ_ζ 与不同衰减电平 A 和不同时间间隔 Δt 的关系曲线,可以看出,衰减 A 不同时, σ_ζ 随 Δt 的变化趋势相近,仅仅是幅度有所不同,于是建立如下关系式为

$$\sigma_\zeta = S(A) \times \sigma(\Delta t) \quad (7)$$

式中 $S(A)$ 是对 $\sigma(\Delta t)$ 的一个幅度加权函数。针对不同的时间间隔 Δt ,对 σ_ζ 进行幅度平均,拟合得到 $\sigma(\Delta t)$ 关于 Δt 的关系式如下(拟合曲线见图6)。

$$\sigma(\Delta t) = -1.8106 \times 10^{-8} \Delta t^3 + 7.1973 \times 10^{-6} \Delta t^2 - 0.001 \Delta t + 0.0839 \quad (8)$$

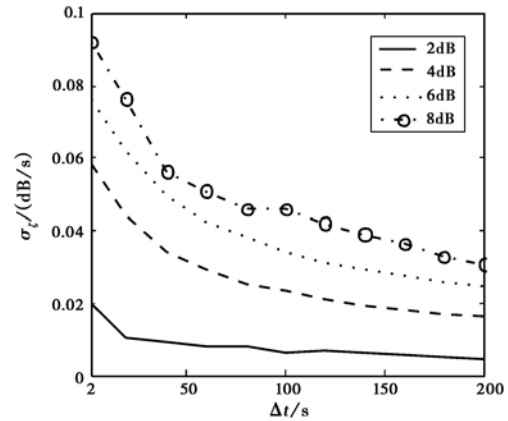


图5 σ_ζ 与 A 、 Δt 的关系

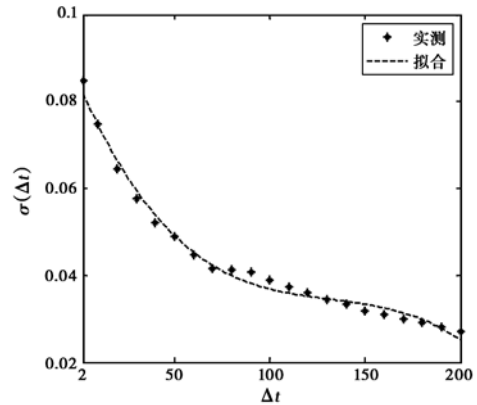


图6 $\sigma(\Delta t)$ 与 Δt 拟合曲线

为了得到幅度加权函数 $S(A)$ 的具体形式,考虑在不同衰减电平下, σ_ζ 随 $\sigma(\Delta t)$ 的变化趋势发现(如图7所示), σ_ζ 与 $\sigma(\Delta t)$ 满足近似的线性关系,在不同衰减电平下对 σ_ζ 和 $\sigma(\Delta t)$ 进行线性拟合,可以得到不同衰减 $A(2, 3, 4, \dots, 15 \text{ dB})$ 对应的 $S(A)$ 值(图7只给出衰减为4 dB的情况),最终得到的 $S(A)$ 与 A 的拟合曲线,如图8所示,表达式为

$$S(A) = -0.0128A^2 + 0.2874A - 0.3104 \quad (9)$$

式(7)、(8)、(9)即为改进模型中 σ_ζ 的计算方法,改进模型的衰落斜率累积分布函数仍然为式(5)。

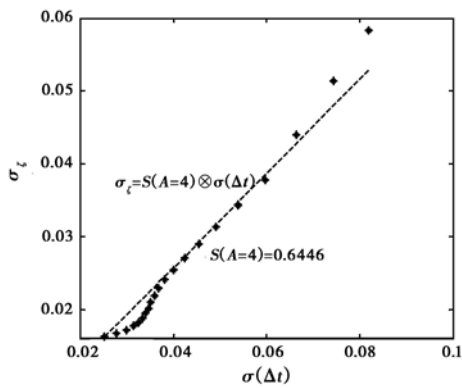


图 7 σ_{ζ} 与 $\sigma(\Delta t)$ 关系的线性拟合

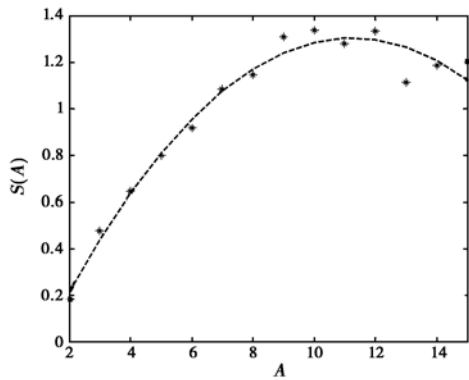


图 8 $S(A)$ 与 A 的拟合曲线

3 模型比较与分析

ITU-R P. 311 建议书^[18]通过比较衰落斜率 CDF 来确定模型的预测精度,并且给出第 i 条链路的测试变量计算公式:

$$\epsilon_i = 2 \frac{P_p(|\zeta| \geq A) - P_m(|\zeta| \geq A)}{P_p(|\zeta| \geq A) + P_m(|\zeta| \geq A)} \times 100/\% \quad (10)$$

得到测试变量后考虑权年因素,进一步可得到模型预测的平均误差、标准偏差和均方根误差 (RMS),通过比较,均方根误差最小的预报模型,认为其预报精度最高。

用海口地区一年数据对 VandeKamp 模型、Salone模型和改进模型的预测结果进行比较,图 9 给出了衰减为 5 dB、时间间隔为 2 s 情况下三个模型预测的衰落斜率累积分布同实测结果的比较曲线,从图形上看,改进模型与实测结果符合的最好。表 2 是综合考虑不同衰减电平(2,3,4,...,15 dB)和不同时间间隔(2,10,20,...,180,190,200 s)时三个模型在该地区预测的总的平均误差、标准偏差和均方根误差,数据显示,改进模型具有最小的预测误差,预测精度最高,Salonen 模型次之,VandeKamp

模型最差。

为了比较模型预测精度的稳定性,分别比较了不同衰减电平(2,3,4,...,15 dB)和时间间隔(2,10,20,...,180,190,200 s)时各模型预测的均方根误差,如图 10 和 11 所示。图 10 中,各模型在衰减电平取 2 dB 时的预测误差都比较大,此时的衰减主要由小雨引起,变化缓慢,衰落斜率的绝对值很小,由式(9)计算出的测试变量值很大,最终得到的均方根误差也较大。总体上,改进模型在不同的衰减电平和时间间隔下都能保持高的预测精度和稳定的预测性能。

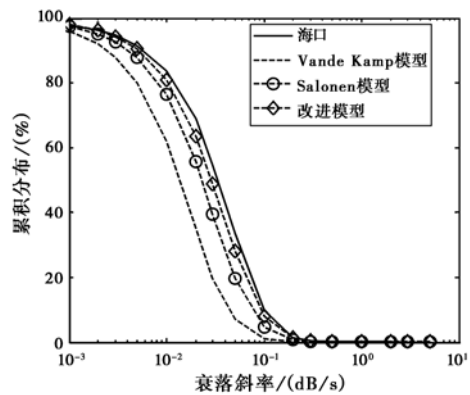


图 9 模型预测 CDF 与实测结果

表 2 各模型预测结果比较

模型	平均误差 /%	标准偏差 /%	均方根误差 /%
VandeKamp 模型	-35.18	51.73	62.56
Salonen 模型	10.42	34.82	36.35
改进模型	1.20	20.04	24.07

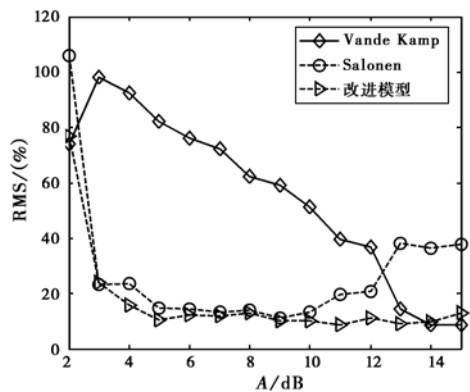


图 10 不同衰减电平下的 RMS 比较

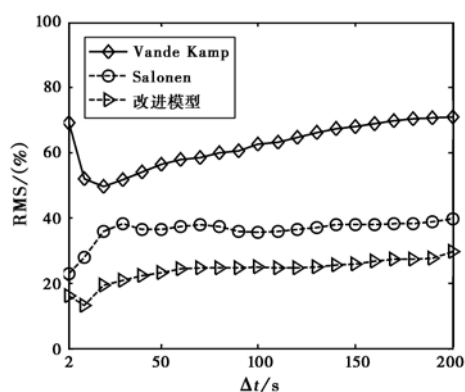


图 11 不同时间间隔下的 RMS 比较

4 结 论

基于海口地区 12.5 GHz 信标数据,对海口地区衰落斜率的条件概率分布作了统计分析,得出正负衰落斜率对称分布的结论,并通过比较衰落斜率中值和正负衰落斜率均值对该结论进行了验证。

基于衰落斜率分布的对称性,在该地区对 VandeKamp 模型中的参数 σ_{ϵ} 进行了重新拟合,得到了依赖于衰落电平 A 和时间间隔 Δt 的改进模型。按照 ITU-R P. 311 要求,比较了改进模型、VandeKamp 模型以及 Salonen 模型的预测误差,结果显示改进模型具有最好的预测精度,并且在不同衰减电平下具有稳定的预测性能。因此,利用本文改进模型进行系统设计可进一步提高系统的可靠性。

雨衰落斜率统计分布具有强烈的地域特性,因此,在我国不同地区雨衰减试验累积数据的基础上,开展雨衰落斜率统计特性的地域建模研究是下一步工作的重要内容之一。

参考文献

- [1] CASTANET L. Fade Mitigation Techniques for New Satcom Systems Operating at Ka and V Bands[D]. Toulouse: SUPAERO, 2001.
- [2] BOLEA-ALAMA AC A, BOUSQUET M, CASTANET L, et al. Impact of short-term prediction models in Fade Mitigation Techniques control loops[R]. Noordwijk: COST 272-280 Workshop, 2003.
- [3] MATRICCIANI E. Rate of change of signal attenuation from SIRIO at 11.6 GHz[J]. Electron Lett, 1981, 17(3): 139-141.
- [4] DINTELMAN F. Analysis of 11 GHz slant path fade duration and fade slope[J]. Electron Lett, 1981, 17(3): 267-268.
- [5] WEBBER R V, SCHLESACK J J. Fade rates at 13 GHz on earth-space paths[J]. Ann Telecommun, 1986, 41(11-12): 562-567.
- [6] RUCKER F. Frequency and attenuation dependent fade slope statistics[J]. Electron Lett, 1993, 29(9): 744-746.
- [7] NELSON B, STUTZMAN W L. Fade slope on 10 to 30 GHz earth-space communication links-measurements and modelling[J]. IEE Proc Microw Antennas Propag, 1996, 143(4): 353-357.
- [8] TIMOTHY K I, ONG J T, CHOO E B L. Descriptive fade slope statistics on INTELSAT Ku-band communication link[J]. Electron Lett, 36(16): 1422-1424.
- [9] VAN DE KAMP M M J L. Statistical analysis on rain fade slope[J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 2003, 51(8): 1750-1759.
- [10] International Telecommunication Union. Recommendation ITU-R P.1623 Prediction Method of Fade Dynamics on Earth-Space Paths[S]. Geneva: ITU, 2003.
- [11] SALONEN E T, HEIKKINEN P. Fade slope analysis for low elevation angle satellite links[C]// COST280/COST272 Joint Workshop. Noordwijk, Netherlands, May 2003.
- [12] 林乐科, 赵振维, 刘玉梅. 我国不同积分时间降雨率的统一转换模[J]. 电波科学学报, 2002, 17(6): 641-645.
LIN Leke, ZHAO Zhenwei, LIU Yumei. A general conversion model of China rainfall rate distributions with different integration times[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2002, 17(6): 641-645. (in Chinese)
- [13] 林乐科, 赵振维, 董庆生, 等. 地空路径水凝物交叉极化特性研究[J]. 电波科学学报, 2006, 21(1): 49-52.
LIN Leke, ZHAO Zhenwei, DONG Qingsheng, et al. Study on hydrometeor-induced cross-polarization along earth-space path[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2006, 21(1): 49-52. (in Chinese)
- [14] 赵振维, 吴春雨, 林乐科, 等. 视距链路的雨衰减预报模式研究[J]. 电波科学学报, 2006, 21(5): 656-658.
ZHAO Zhenwei, WU Chunyu, LIN Leke, et al. Chinese Journal of Radio Science, 2006, 21(5): 656-658. (in Chinese)
- [15] 赵振维, 卢昌胜, 林乐科. 基于雨胞分布的视距链路雨衰减预报模型[J]. 电波科学学报, 2009, 24(4):

627-631.

ZHAO Zhenwei, LU Changsheng, LIN Leke. Prediction model of rain attenuation based on the EX-CELL rain cell model for the terrestrial line-of-sight systems[J]. Journal of Radio Science, 2009, 24(4): 627-631. (in Chinese)

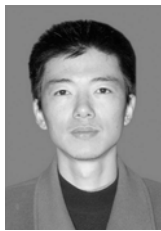
- [16] 卢昌胜, 赵振维, 林乐科, 等. 雨衰减观测网综述[J]. 电波科学学报, 2011, 26(增刊): 146-149.
- [17] 张 鑫, 林乐科, 赵振维, 等. Ka 频段雨衰减观测的初步分析[J]. 电波科学学报, 2011, 26(增刊): 159-163.
- [18] International Telecommunication Union. Recommendation ITU-R P. 311-13 Acquisition, Presentation and Analysis of Data in Studies of Tropospheric Propagation[S]. Geneva: ITU, 2009.

作者简介

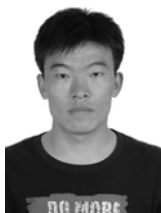


赵振维 (1965—), 男, 河北人, 研究员, 博士, 中国电波传播研究所副总工程师, 主要研究方向为电波传播和电波环境特性等。

张 鑫 (1986—), 男, 安徽人, 硕士, 主要从事降雨传播特性方面的研究。



林乐科 (1972—), 男, 山东人, 高级工程师, 博士, 主要从事对流层环境与电波传播特性研究。



卢昌胜 (1983—), 男, 甘肃人, 工程师, 硕士, 主要从事毫米波传播特性方面的研究。

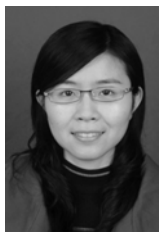


朱庆林 (1981—), 男, 河南人, 博士, 中国电波传播研究所工程师, 主要从事电波传播和 GNSS 遥感方面的研究。

(上接第 885 页)

- [12] LIU Leilei, WAND Yuanqing, ZHANG Yan, Ultra-wideband channel measurement and modeling for the future intra-vehicle communications[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2012, 54(2): 322-326.

作者简介



刘蕾蕾 (1980—), 女, 山东人, 南京邮电大学电子科学与工程学院讲师, 2003 年和 2009 年于东南大学分别获学士、博士学位。主要研究方向为新一代无线通信中的信道建模。



张念祖 (1977—), 男, 江苏人, 东南大学电磁场与微波技术专业博士生, 东南大学讲师, 主要从事微波毫米波相关通信技术和无线信道测量与建模方向的研究。



洪 伟 (1962—), 男, 河北人, 1982 年于解放军信息工程大学获学士学位、1985 和 1988 年分别于东南大学获硕士、博士学位。现为东南大学信息科学与工程学院教授、博士生导师, 教育部长江学者特聘教授, 毫米波国家重点实验室主任。主要从事电磁理论与微波技术方面的科研与教学工作。