

引用格式: YANG Ruike, GAO Xia, WU Fuping, et al. Simulation of 5G Millimeter Wave Rain Dynamic Attenuation[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(10):1006004

杨瑞科,高霞,武福平,等. 5G 毫米波降雨动态衰减模拟研究[J]. 光子学报, 2021, 50(10):1006004

5G 毫米波降雨动态衰减模拟研究

杨瑞科¹,高霞¹,武福平¹,李仁先¹,周晔²

(1 西安电子科技大学 物理与光电工程学院,西安 710071)

(2 中国航空工业集团公司雷华电子技术研究所,江苏 无锡 214063)

摘要:基于降雨衰减时间序列合成方法,模拟产生了北京地区 28 GHz、30 GHz 和 38 GHz 的动态降雨衰减时间序列,并应用快速傅里叶变换和 Kaiser 窗函数对其功率谱进行估计。多次模拟降雨衰减事件,并对模拟序列进行统计分析,得到降雨衰减的概率分布,并与 ITU-R 推荐的模型进行比较。本文方法可用于 5G 通信网络链路的降雨衰减预测和性能分析研究。

关键词:5G;毫米波;雨;衰减;时间序列模拟

中图分类号:TN929.5

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20215010.1006004

Simulation of 5G Millimeter Wave Rain Dynamic Attenuation

YANG Ruike¹, GAO Xia¹, WU Fuping¹, LI Renxian¹, ZHOU Ye²

(1 School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(2 LEIHUA Electronic and Technology Research Institute, Aviation Industry Corporation of China, Wuxi, Jiangsu 214063, China)

Abstract: Based on the synthetic method of rainfall attenuation time series, the dynamic rainfall attenuation time series at 28 GHz, 30 GHz and 38 GHz in Beijing are simulated, and the power spectra are estimated by using fast Fourier transform and Kaiser Window function. The probability distributions of rainfall attenuation are obtained by simulating rainfall attenuation events for many times and statistical analyzing of the simulation series. Compared with the model recommended by ITU-R, it can be used for the prediction of 5G millimeter wave rainfall attenuation.

Key words: 5G; Millimeter wave; Rain; Attenuation; Time series simulation

OCIS Codes: 060.4510; 010.1030; 350.7420; 300.6170; 010.7340

0 引言

随着无线电通信系统的高速发展,5G(第五代移动通信)毫米波通信系统由于其传输速率高,系统通信性能好,在很多场景得到有效的应用。但由于通信频率的增加,5G毫米波信号在大气信道传输时,更容易受到大气湿度以及链路降雨损耗的影响^[1-2]。降雨衰减使得系统可用性大大降低,严重时甚至引起通信中断。因此,为了使5G毫米波系统尽可能的全天候工作,需开展5G毫米波链路降雨衰减特性研究^[3-4]。而毫米波降雨衰减一般较大,采用传统的微波降雨衰落对抗技术不能有效的减缓,就需要采用多种抗衰落技术或自适应的抗雨衰减技术。为了能更好的研究毫米波链路的降雨衰落,必需研究降雨的动态衰减特性^[5]。降雨动态衰减研究一般采用长期实验或模拟的方法,而实验测量通常具有地域和时间的局限性,实现难度大,成

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究项目(No. 2021JM-127),中国航空工业集团公司雷华电子技术研究所资助项目(No. 2018610103002381)

第一作者:杨瑞科(1963—),男,教授,博士,主要研究方向为电磁波、光波的传播和散射特性及应用。Email: yrk18687@163.com

收稿日期:2021-07-21;录用日期:2021-09-06

<http://www.photon.ac.cn>

本高,因此,计算机模拟仿真成为一种行之有效的研究方法。结合本地的降雨参量和模型,应用计算机进行降雨衰减时间序列模拟和统计分析,能最快的评估降雨毫米波通信链路的特性,为5G毫米波通信系统设计和应用相应的抗雨衰技术提供一定的参考和依据^[6-7]。

目前,国内外已有一些机构对微波降雨衰减序列的模拟产生进行了分析研究,MASENG T等基于一阶马尔科夫理论提出了一种随机降雨衰减动态模型^[8],为动态降雨衰减特性的研究提供了很好的思路。LEMORTON J等对该模型进行了发展,得到 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模型验证^[9],国际电信联盟推荐EMB方法为降雨衰减时间序列合成的方法^[10]。XUE Bin等利用时间序列之间的关系建立差分整合移动平均自回归(Autoregressive Integrated Moving Average, ARIMA)模型,进行平稳性检验,将非平稳序列转化为平稳序列,并估计参数,是一种动态短期预报方法^[11]。ARGOTA J等提出了一种地面或地空路径传播信道的的时间序列合成方法,这种雨衰减合成方法是对 Maseng-Bakken 模型进行修改,由一阶回归模型组成,并对改模型在不同的环境和条件下进行测试^[12]。然而,能否用于中国各个雨区还需进行大量的研究。因此,结合降雨观测数据,应用EMB模型开展了中国典型地区的Ka波段地空链路降雨动态衰减特性研究^[13],应用ARIMA模型开展了Ku波段雨衰减时间序列的模拟^[14-15],应用基于马尔科夫理论建立的N阶马尔科夫链模型,模拟了长春和新乡地区的Ku波段的降雨衰减时间序列,验证了其在中国部分地区的可用性,并对Ku波段的EMB降雨衰减模型进行了修正^[16],使其能更好的应用于Ku和Ka波段的降雨衰落特性的分析研究。但由于条件限制,只在某些地区进行了一些微波降雨率和降雨衰减的测量。本文基于国际电信联盟推荐的雨衰减预测模型^[17]和EMB雨衰减时间序列产生方法^[3],针对5G毫米波链路,开展北京地区的降雨衰减时间序列的模拟产生和分析研究。

1 EMB雨衰减时间序列的产生

时间序列 $A(t)$ 可以由离散的高斯白噪声 $n(t)$ 经过低通滤波后,通过无记忆的非线性器件使其从正态分布转换为对数正态分布,再由偏移量校准得到^[18]。合成降雨衰减时间序列的原理流程图,如图1所示。

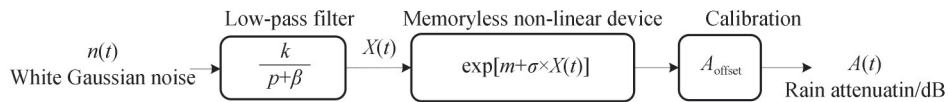


图1 雨衰减时间序列的产生流程图

Fig. 1 Generation flow chart of rain attenuation time series

1.1 雨衰减时间序列动态参数的确定

参量 β 描述的是降雨衰减的动态特性,可以由雨衰减对数正态分布的均值和方差来确定,计算采用 $\beta=2 \times 10^{-4} (\text{s}^{-1})$ 。降雨衰减偏移量 A_{offset} 由对数正态参量 m 和 σ 来估计^[19],其表达式为

$$A_{\text{offset}} = \exp \left[m + \sigma \sqrt{2} \times \text{erf}^{-1} \left(1 - 2 \times \frac{P_{\text{rain}}}{100} \right) \right] \quad (1)$$

式中,erf为误差函数, P_{rain} 为降雨时间百分概率,其值可以由ITU-R P.837建议书中计算得出,北京雨区气象站点的参量估计值如表1所示。利用北京地区的经纬度值(Lat=39.8, Lon=116.47),通过ITU-R P.837-7,

表1 北京雨区气象站点 $m, \sigma, A_{\text{offset}}$ 的参量估计值

Table 1 $m, \sigma, A_{\text{offset}}$ parameter estimation value of Beijing rain area

Station	Frequency/GHz	m	σ	$A_{\text{offset}}/\text{dB}$
Beijing	28	-3.82	1.67	0.35
	30	-3.75	1.68	0.38
	38	-3.54	1.70	0.49

利用双线性插值可以计算出超过年平均0.01%降雨率 R_{001} (mm/h), A_R 表示降雨引起的衰减

$$A_R = \gamma_R l \tag{2}$$

式中, l (km)为链路长度。由ITU-R P.838-3可得降雨特征衰减 γ_R (dB/km)与降雨强度的关系

$$\gamma_R = kR^\alpha \tag{3}$$

式中,参数 k 和 α 与电磁波的频率和极化方式有关。当链路长度为1 km时,计算得到北京地区气象站点的降雨量与降雨衰减值的结果如表2所示。

表2 北京雨区气象站点降雨率与降雨衰减值

Table 2 Rainfall rate and rain attenuation of meteorological stations in Beijingrain area

Station	0.01% $R/(mm \cdot h^{-1})$	28 GHz $\gamma_R/(dB \cdot km^{-1})$	30 GHz $\gamma_R/(dB \cdot km^{-1})$	38 GHz $\gamma_R/(dB \cdot km^{-1})$
Beijing	46.8	10.6	11.8	15.1

1.2 雨衰减时间序列的模拟

利用雨衰减时间序列的动态参量,模拟一个所需要的雨衰减时间序列, $A_{rain}(kT_s), k=1, 2, \dots$,产生一个特征均值为0标准方差为1的随机高斯白噪声时间序列 $n(kT_s)$,取 $k=1, 2, \dots$,采样时间间隔为 $T_s=1$ s。用递归的低通滤波器对序列 $n(kT_s)$ 进行滤波,滤波器的定义式为

$$X(kT_s) = \rho \times X[(k-1)T_s] + \sqrt{1-\rho^2} \times n(kT_s) \quad k=1, 2, \dots \tag{4}$$

式中, $\rho = \exp(-\beta T_s)$ 。将滤波后的随机时间序列 $X(kT_s)$ 通过无记忆的非线性器件,转变成为一个对数正态分布的雨衰减时间序列

$$Y_{rain}(kT_s) = \exp[m + \sigma X(kT_s)] \tag{5}$$

将得到的结果由偏移量校准检验后得到所需要的雨衰减事件的时间序列

$$A_{rain}(kT_s) = \text{Max}[Y(kT_s) - A_{\text{offset}}, 0] \tag{6}$$

由北京雨区的时间动态特性参量,模拟仿真出不同频率的降雨衰减事件的初始时间序列分布,将产生的模拟仿真雨衰减时间序列数据进行衰减量校正,达到预期的雨衰减量,如图2~3所示,产生北京地区28 GHz、30 GHz的降雨特征衰减的初始时间序列与模拟时间序列,图4表示38 GHz下,模拟产生不同传输距离下的降雨衰减时间序列,由图中可以看出,传输距离为2 km的雨衰减量大于1 km的雨衰减量。

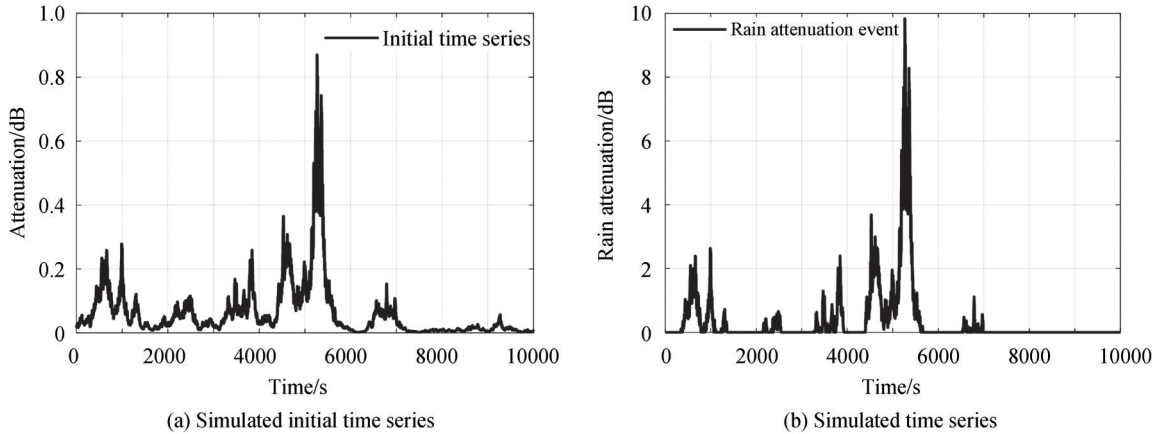


图2 模拟北京地区28 GHz降雨衰减时间序列
Fig. 2 Simulated 28 GHz rainfall attenuation time series in Beijing

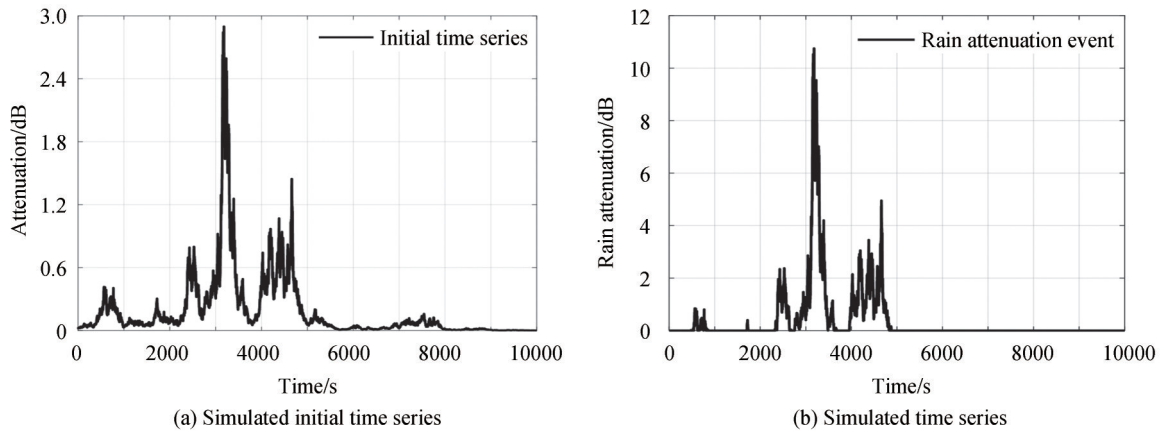


图3 模拟北京地区 30 GHz 降雨衰减时间序列
Fig. 3 Simulated 30 GHz rainfall attenuation time series in Beijing

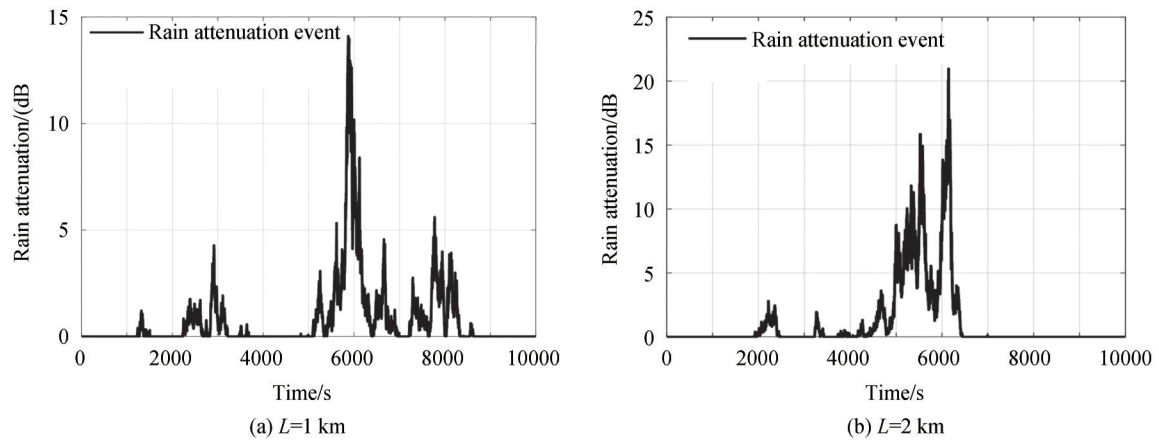


图4 传输路径不同时,北京地区 38 GHz 模拟降雨衰减时间序列
Fig. 4 Simulated 38 GHz rainfall attenuation time series in Beijing in different distances

1.3 雨衰减时间序列的功率谱估计

运用模拟产生的雨衰减事件数据,采用Kaiser窗函数进行处理,得到不同雨衰减序列的功率谱密度的斜率与理论分析斜率为 -20 dB/dec 基本一致^[20],如图5所示。因此,应用该方法产生的降雨时间序列可用于描述雨衰减的动态特性。

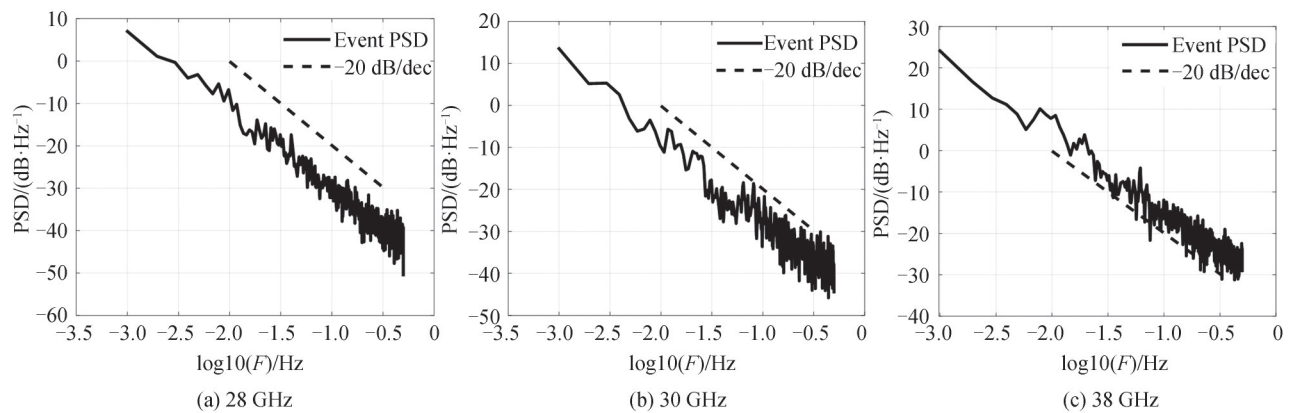


图5 模拟北京地区雨衰减事件的功率谱估计
Fig. 5 Power spectrum estimation of simulated rain attenuation events in Beijing

2 降雨衰减模型

2.1 ITU-R降雨衰减模型

基于ITU-R P.530-17地面视距链路雨衰减模型^[9],采用超过概率为0.01%,降雨空间分布为对数正态分布,可以测得长期统计的雨衰减数据。时间概率百分比从0.001%到5%所对应的降雨衰减值为

$$A_p = A_{0.01} C_1 p^{-(C_2 + C_3 \log_{10} p)} \quad (7)$$

式中,

$$\begin{cases} C_1 = 0.07^{C_0} \times 0.12^{(1-C_0)} \\ C_2 = 0.855C_0 + 0.546(1-C_0) \\ C_3 = 0.139C_0 + 0.043(1-C_0) \end{cases} \quad (8)$$

$$C_0 = \begin{cases} 0.12 + 0.4 [\log_{10}(f/10)^{0.8}] & f \geq 10\text{GHz} \\ 0.12 & f < 10\text{GHz} \end{cases} \quad (9)$$

利用ITU-R雨衰减预报模型,模拟仿真出发射天线高度为10 m,接收天线高度1.5 m,通信链路长度为1 km的北京地区5G毫米波通信链路在不同工作频率对应不同时间百分概率下的降雨衰减情况,如图6(a)所示,图6(b)表示频率为28 GHz时,不同的通信链路长度下的雨衰减情况。

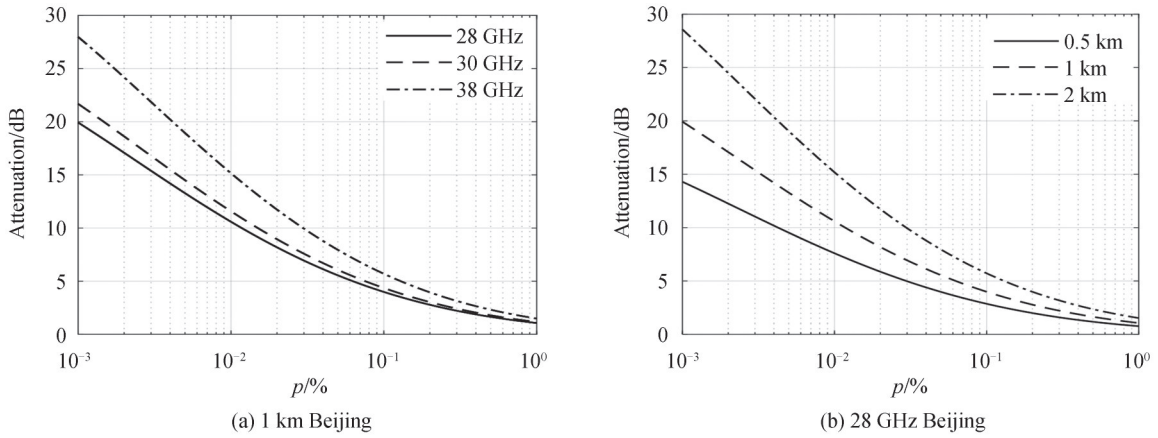


图6 北京地区的降雨衰减值与不同时间百分概率的关系

Fig. 6 Relationship between rain attenuation and time percentage probability in Beijing area

2.2 降雨事件的统计分析

一次雨衰事件模拟相当于对5G通信链路中降雨衰减这一随机过程的抽样,在本文中单次雨衰事件模拟的时间序列为 1×10^4 s。通过对单次模拟结果的统计处理,降雨衰减与时间概率的关系存在极大的随机性,没有具体的规律,很难体现出降雨衰减统计特性,所以,可以通过模拟产生的多组降雨事件来减小随机性造成的统计误差。本文中分别在28 GHz、38 GHz下各生成1 000次样本的雨衰事件时间序列,形成了三个频率的数据集,并对数据集进行总的统计处理,得到不同频率下降雨衰减与时间概率的关系。

为研究数据量对统计结果的影响,以28 GHz的降雨衰减为例,在不同数据量下经过相同的统计处理,得到降雨衰减与时间概率的关系,如图7所示,其中降雨事件为50次时,与ITU-R预测数据接近,但到100次时统计结果增大,这种衰减关系会发生变化,说明该数据量下仍呈现出一定的随机性。随着数据量的进一步增加,曲线规律逐渐趋于稳定,在图中500组数据和1 000组数据的计算结果几乎相同。说明只有满足一定的数据量,统计结果才能正确,而模拟方法较实验测量能得到更多的降雨序列数据。

模拟28、30、38 GHz频率各1 000次的降雨衰减时间序列的雨衰时间概率统计结果如图8所示,并与ITU地面视距传播模型的计算结果进行比较。结果表明,在时间概率大于0.01%时,三种频率下时间序列模拟雨衰模型与ITU模型的预测结果比较一致,而在时间概率小于0.01%时,利用时间序列模拟雨衰事件预测的降雨衰减相较于ITU模型预测值偏大,且时间概率越小,两种模型的预测结果相差越大。

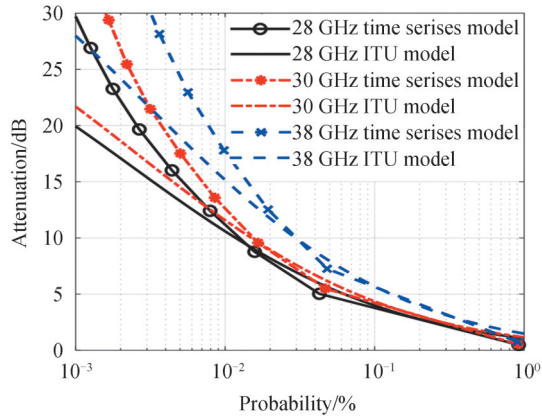


图7 28 GHz频率下不同模拟次数特征衰减统计结果

Fig. 7 Statistical results of specific attenuation of different simulation times at 28 GHz

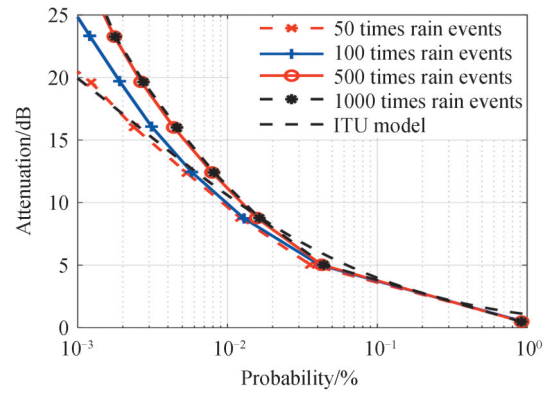


图8 不同频率下两种模型的特征衰减对比

Fig. 8 Comparison of specific attenuation of two models at different frequencies

在毫米波波段,波长较短,且链路降雨量较大时,信道容易发生严重衰落。而且根据现实中的气象统计,大降雨量的极端天气事件发生的概率极小,当降雨量继续增加时其发生概率变化也小,对应到降雨衰减与时间概率的关系上,当降雨衰减较大时,时间概率变化不明显,曲线斜率较大。对比两种模型的预测结果,不难看出通过时间序列模拟雨衰事件模型得出的预测结果可能更符合实际情况。对于5G毫米波通信,链路长度一般较短,较强的降雨会产生大的影响,因此,对于强降雨环境,尤其对于我国南方热带和亚热带地区,开展5G毫米波系统的应用需要进一步的研究降雨衰减,但由于实验和观测的时间、空间和人力和财力方面的限制,有必要开展降雨衰减的模拟统计分析研究。

3 结论

本文给出了模拟产生降雨时间序列的方法,并对模拟方法进行了检验分析。以北京地区降雨为例,进行了模拟统计计算分析,得到了根据动态雨衰减计算的超过年平均时间百分比概率的关系,并且与ITU-R预测的结果进行比较,表明降雨动态雨衰减模拟研究是预测降雨衰减可行的方法。由于实验测量具有时间和空间的局限性,且实现难度大,成本高,因此利用动态雨衰减模拟方法可以为降雨衰减统计分析提供更多的数据资源,这可为我国5G毫米波通信系统信道特性的研究和抗雨衰减技术的发展提供一定的帮助。

参考文献

- [1] PERIC M V, PERIC D B, TODOROVIC B M, et al. Dynamic rain attenuation model for millimeter wave network analysis[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 16(1): 441-450.
- [2] SHI J S, JONG S L, YIN L H. Characterization of rain attenuation statistics for 5G communication system in the equatorial region[J]. International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering, 2020, 9(1.4):157-162.
- [3] KOUROGIORGAS C, PANAGOPOULOS A D. A rain-attenuation stochastic dynamic model for LEO satellite systems above 10 GHz[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(2):829-834.
- [4] DALIA N, ANIMESH M. Study of rain attenuation effects for 5G MM-wave cellular communication in tropical location [J]. IET Microwaves Antennas and Propagation, 2018, 12(9):1504-1507.
- [5] ZHAO Xiongwen, WANG Qi, GENG Suiyan, et al. Path loss modification and multi-user capacity analysis by dynamic rain models for 5G radio communications in millimetre waves[J]. IET Communications, 2019, 13(10):1488-1496.
- [6] LUINI L, PANZERI A, RIVA C. Enhancement of the synthetic storm technique for the prediction of rain attenuation time series at EHF [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(7): 5592-5601.
- [7] ROY V, GISHKORI S, LEUS G. Dynamic rainfall monitoring using microwave links[J]. Journal on Advances in Signal Processing, 2016, 2016(1):1-17.
- [8] MASENG T, BAKKEN P. A stochastic dynamic model of rain attenuation [J]. IEEE Transactions on Communication, 1981, 29(5): 660-669.
- [9] LEMORTON J, CASTANET L, LACOSTE F, et al. Development and validation of time-series synthesizers of rain attenuation for Ka-band and Q/V-band satellite communication systems [J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2007, 25 (5):575-601.

- [10] Tropospheric attenuation time series synthesis[R]. Recommendation ITU-R.P.1853.
- [11] XUE Bin, TONG Ningning, XU Xin, et al. Dynamical short-term prediction of rain attenuation in W band: a time-series model with simpler structure and higher accuracy[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2019, 61(1):77-86.
- [12] ARGOTA J, ANITZINE I F. Attenuation time series synthesizer for dynamic prediction in millimeter wave frequency bands [J]. International Journal of Electronics and Electrical Engineering, 2020, 8(1):1-5.
- [13] YANG Ruike, ZHAO Zhenwei, LI Lei, et al. Research on statistics and simulation of rain attenuation time series at microwave [J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(12):2513-2517.
杨瑞科, 赵振维, 李磊, 等. 微波雨衰减序列的模拟统计研究[J]. 电子学报, 2013, 41(12):2513-2517.
- [14] GONG Shuhong. GAO Yifeng, SHI Houbao, et al. A practical MGA-ARIMA model for forecasting real-time dynamic rain-induced attenuation[J]. Radio Science, 2013, 48(3): 208-225.
- [15] YANG Ruike, LI Lei, ZHAO Zhenwei, et al. Simulation of rain attenuation time series by ARIMA model[C]. Cross Strait Quad-regional Radio Science and Wireless Technology Conference, IEEE, 2013.
- [16] YANG Ruike, LU Tongya, ZHAO Zhenwei, et al. Improvement on the microwave dynamic rain attenuation time series model [J]. Journal of Xidian University, 2016(43):82-86.
杨瑞科, 路同亚, 赵振维, 等. 微波动态雨衰减时间序列模型的修正[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2016(43):82-86.
- [17] ITU-R P.530-17. Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems[R]. ITU-R P Series Recommendationd Radio Wave Propagation, 2017.
- [18] ANDRADE F J A, SILVA MELLO da L A R. Rain attenuation time series synthesizer based on the gamma distribution [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2011, 10: 1381-1384.
- [19] LACOSTE F, BOUSQUET M, CORNET F, et al. Classical and on-demand rain attenuation time series synthesis: Principle and applications[C]. 24th AIAA International Communications Satellite Systems Conference, 2006: 5325.
- [20] CARRIE G, LACOSTE F, CASTANET L. 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.