

Study on the Characteristics of Rain-Induced Polarization Mismatch Factor at Ka Bands*

Baoquan Zhang¹, Shuhong Gong², Wanyu Wang¹, Houbao Shi²

¹Center for Earth Observation and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing

²School of Science, Xidian University, Xi'an

Email: {bqzhang, wywang}@ceode.ac.cn, ljbrp2003@yahoo.com.cn, shihoubao4214@sina.com

Received: Nov. 28th, 2011; revised: Dec. 24th, 2011; accepted: Jan. 5th, 2012

Abstract: The formulae for estimating polarization mismatch factor of linear and circular polarization waves are derived. The statistical characteristics of polarization mismatch factor at Ka bands for earth-space link are given in Xi'an, Beijing, Sanya, China, based on the measured rain-rate data in Xi'an and the statistical rain-rate data in Beijing and Sanya, China. The results presented in this paper are significant and practical for pre-calculating power reserve and pre-estimating link performance at Ka bands.

Keywords: Rain; Ka Bands; Polarization Mismatch Factor

Ka 频段雨致极化失配特性研究*

张宝全¹, 弓树宏², 王万玉¹, 史厚宝²

¹中国科学院对地观测与数字地球科学中心, 北京

²西安电子科技大学理学院, 西安

Email: {bqzhang, wywang}@ceode.ac.cn, ljbrp2003@yahoo.com.cn, shihoubao4214@sina.com

收稿日期: 2011 年 11 月 28 日; 修回日期: 2011 年 12 月 24 日; 录用日期: 2012 年 1 月 5 日

摘要: 推导得出了线极化和圆极化状态下评估极化失配因子的数学模型, 基于西安地区降雨率测量数据和北京、三亚地区统计降雨率数据, 给出了西安、北京、三亚地区 Ka 频段地空链路雨致极化失配因子统计特性, 本文的研究结果对于 Ka 频段无线链路功率储备预算和性能评估具有重要的理论意义和实用价值。

关键词: 降雨环境; Ka 频段; 极化失配

1. 引言

Ka 频段通信具有通信容量大、波束窄、终端尺寸小和抗干扰能力强、电磁兼容性好、设备更易小型化、天线可以减小等优势, Ka 频段通信将成为未来卫星通信、邻近空间飞行器通信等重要系统的必须通信方式。美国、日本、意大利等国家已相继完成了 Ka 频段卫星通信试验, 并已正式推出了各自的商用系统。中国下一代的无线通信必将使用 Ka 频段, 特别是对

于特殊任务和特殊环境下的无线通信, 例如, 经过多方面论证, Ka 频段是克服“黑障”问题的有效频段, 国际上关于 Ka 频段卫星轨道频率资源的争夺已不再停留在纸面上, 并在未来将可能达到白热化^[1-5]。

Ka 频段卫星通信系统遇到的难点之一是如何评估与克服对流层大气对信号带来的衰减问题。其中降雨产生的衰减尤为严重, 降雨衰减成为制约 Ka 波段电磁波开发、应用的一个显著问题, 所以雨衰问题受到相关研究人员的足够重视, 国内外研究得出了许多模型^[1-5]。实际上, 当电磁信号通过降雨区域时, 同时

*资助信息: 国家自然科学基金资助项目(61001065); 中央高校基本科研业务费专项资金资助。

会发生去极化效应^[1-6]。去极化效应通常在应用频率复用技术时才加以研究,进而分析不同极化通道之间的分辨率或者隔离度,很少有文献专门评估链路极化适配问题,关于卫星通信系统的文献中提到极化失配因子影响的重要性,但没有给出具体的计算模型或者统计规律^[6]。事实上,去极化效应会导致极化失配损耗,虽然信号没有被散射和吸收,但是来波功率会由于极化失配同样不能被有效接收,对于衰减已经很严重的情况下,极化失配功率损失无疑是雪上加霜,特别是在特殊环境下极化失配损耗可能成为隐形“杀手”^[5,7]。所以,研究极化失配的评估方法和规律特性,对于Ka频段无线通信系统链路预算和性能评估具有重要的理论意义和实用价值。但是,很少有文献详细具体地研究极化失配损耗的评估方法,更没有文献具体给出特定地区极化失配损耗的规律特性。

本文通过分析极化失配产生的机理,推导得出了线极化和圆极化状态下极化失配因子与去极化分辨率之间的关系,基于西安地区降雨率测量数据和北京、三亚地区降雨量统计数据,给出了西安、北京、三亚地区Ka频段地空链路雨致极化失配因子统计特性,本文的研究结果对于Ka频段无线链路功率储备预算和性能评估具有重要的理论意义和实用价值。

2. 去极化效应的机理及其相关概念

晴空大气和大气沉降粒子及电离层环境都可以导致去极化效应。晴空大气去极化机理主要包括:大气湍流的随机散射,主要影响散射通信系统;大气折射指数水平分布不均匀,主要影响地空链路通信系统;反射面横向倾斜,主要影响地面移动通信系统。大气沉降粒子去极化主要是由随机分布的非球对称粒子所导致。电离层环境主要是法拉第旋转导致的去极化效应,只对线极化波有去极化效应^[1,2,6-8]。

去极化效应常用交叉极化分辨率(XPD)或交叉极化隔离度(XPI)表示。XPD是指发射单一极化信号时,接收点场的同极化分量与交叉极化分量的功率比;XPI是指用同一频率同时传输两路互为正交的极化信号时,其中一种极化波的同极化分量与另一种极化波的交叉极化分量在接收点的功率比。XPD或XPI越大,表示去极化效应越小。可以证明,当产生去极化的非球对称粒子具有一定的对称特性,则理论上应该有 $XPD = XPI$,例如雨滴、冰晶粒子、沙尘粒子模型

就具有一定对称特性。实践证明,XPD和XPI之间没有显著的差异^[7]。

例如发射一个左旋圆极化信号 E_L ,在接收端同时接收到左旋圆极化信号 E_{LL} 和右旋圆极化信号 E_{RL} ,则左旋圆极化的极化分辨率表示为^[7]

$$XPD_L = 20 \log(E_{LL}/E_{RL}) \quad (1)$$

例如用同一频率同时传送左旋圆极化信号 E_L 和右旋圆极化信号 E_R ,左旋圆极化信号在接收点信号为 E_{LL} ,右旋极化信号在接收点产生的左旋极化信号为 E_{LR} ,则左旋圆极化的交叉隔离度表示为^[7]

$$XPI_L = 20 \log(E_{LL}/E_{LR}) \quad (2)$$

去极化效应应用也可以用去极化D表示,D定义为:发射单一极化信号时,接收点场强的交叉极化分量与同极化分量的功率比。例如发射一个左旋圆极化信号 E_L ,在接收点同时接收到左旋圆极化信号 E_{LL} 和右旋圆极化信号 E_{RL} ,则左旋圆极化的去极化D表示为^[7]

$$D_L = 20 \log(E_{RL}/E_{LL}) \quad (3)$$

去极化分辨率XPD与去极化D的值互为相反数,例如XPD为40dB对应的去极化D为-40dB。

其它关于去极化效应的相关概念还有交调分辨、交叉极化失真、去极化率、交叉极化等级等,这些概念不常用而且通常能够用XPD或者XPI表示^[7]。

3. 极化失配因子及其评估方法

设能流密度为 S 的单位极化平面波,入射至一个有效接收截面为 A_e 的天线,则其输出功率 P_R 表示为^[7]

$$P_R = m_p S \cdot A_e \quad (4)$$

其中 m_p 表示极化失配因子,取值为0~1之间的实数,表示来波和接收天线之间极化状态的匹配程度。假设来波和接收天线极化状态均为椭圆极化,则^[7]

$$m_p(w, a) = \frac{1}{2} + \frac{4r_w r_a + (r_w^2 - 1)(r_a^2 - 1) \cos[2(\tau_a - \tau_w)]}{2(r_w^2 + 1)(r_a^2 + 1)} \quad (5)$$

其中“ w ”表示波的特性,“ a ”表示天线的特性, r_w 和 r_a 分别表示来波和天线的极化轴比^[7], τ_w 和 τ_a 分别表示来波和天线的极化倾角^[7]。

所以,去极化分辨也可以表示为^[7]

$$XPD = 10 \log \frac{m_p(w, a)}{m_p(w, a_o)} \quad (6)$$

其中, $m_p(w, a)$ 表示发射某种极化状态信号条件下, 来波极化状态相对于与发射信号同极化状态的接收天线之间的极化失配因子, $m_p(w, a_o)$ 表示发射某种极化状态信号条件下, 来波极化状态相对于与发射信号正交极化状态的接收天线之间的极化失配因子。

设收、发天线均为圆极化天线, 发射信号为左旋圆极化(LHCP), 所以相对于发射信号, 接收天线同极化状态为左旋圆极化其轴比为 $1^{[7]}$, 正交极化极化状态为右旋圆极化(RHCP)其轴比为 $-1^{[7]}$, 由于传输环境的去极化效应, 来波信号为椭圆极化状态, 其轴比为 r 。根据(5)可知, 左旋圆极化信号的 $m_{pLHCP}(w, a)$ 和 $m_{pLHCP}(w, a_o)$ 表示为

$$m_{pLHCP}(w, a) = \frac{1}{2} \frac{(r+1)^2}{r^2+1} \quad (7)$$

$$m_{pLHCP}(w, a_o) = \frac{1}{2} \frac{(r-1)^2}{r^2+1} \quad (8)$$

根据(6)可知, 左旋圆极化信号的去极化分辨率可以写为

$$XPD_{LHCP} = 20 \log \left[\frac{(r+1)}{(r-1)} \right] \quad (9)$$

令

$$x_L = 10^{\frac{XPD_{LHCP}}{20}} \quad (10)$$

则来波轴比 r 表示为

$$r = \frac{x_L + 1}{x_L - 1} \quad (11)$$

所以左旋圆极化极化失配因子表示为

$$m_{pLHCP} = \frac{1}{2} \frac{\left[\left(\frac{x_L + 1}{x_L - 1} \right) + 1 \right]^2}{\left(\frac{x_L + 1}{x_L - 1} \right)^2 + 1} \quad (12)$$

所以, 通过评估去极化分辨率的统计特性, 可以评估得出极化失配因子。同样的道理可以得出右旋圆极化失配因子为

$$m_{pRHCP} = \frac{1}{2} \frac{\left[\left(\frac{1+x_R}{1-x_R} \right) - 1 \right]^2}{\left(\frac{1+x_R}{1-x_R} \right)^2 + 1} \quad (13)$$

其中 $x_R = 10^{\frac{XPD_{RHCP}}{20}}$, 在相同的环境中左右旋极化失配因子相同。

设如图 1 所示, 设收、发天线均为线极化天线, 发射信号为水平极化信号即沿 x 方向极化, 所以相对于发射信号, 接收天线同极化状态为水平极化状态其轴比为 ∞ 、倾角为 0 度^[7], 正交极化极化状态为垂直极化其轴比为 ∞ 、倾角为 90 度^[7], 由于传输环境的去极化效应, 来波信号为椭圆极化状态, 其轴比为 r 、倾角为 τ 。根据(5)和(6)可知, 水平极化信号的也可以表示为

$$XPD_H = 10 \log \left[\frac{(r^2+1) + (r^2-1)\cos(2\tau)}{(r^2+1) - (r^2-1)\cos(2\tau)} \right] \quad (14)$$

在不同环境中可以用环境特性参数近似地描述 τ , 例如降雨、降雪、沙尘等环境中可以用非球形粒子的主轴倾角代替 τ ^[6]。令

$$x_H = 10^{\frac{XPD_H}{10}} \quad (15)$$

通过(14)可以求解得到轴比与去极化分辨率的函数关系

$$r^2 = \frac{(1 + \cos 2\tau)x_H - (1 - \cos 2\tau)}{(1 + \cos 2\tau) - (1 - \cos 2\tau)x_H} \quad (16)$$

所以极化失配因子可以通过评估去极化分辨率和环境特性参数得出, 水平极化波的极化失配因子可以表示为

$$m_{pH} = \frac{1}{2} + \frac{\left\{ \left[\frac{(1 + \cos 2\tau)x_H - (1 - \cos 2\tau)}{(1 + \cos 2\tau) - (1 - \cos 2\tau)x_H} \right] - 1 \right\} \cos(2\tau)}{2 \left\{ \left[\frac{(1 + \cos 2\tau)x_H - (1 - \cos 2\tau)}{(1 + \cos 2\tau) - (1 - \cos 2\tau)x_H} \right] + 1 \right\}} \quad (17)$$

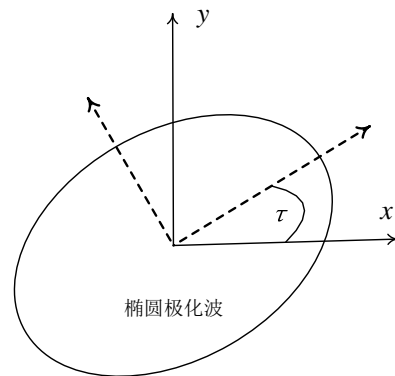


Figure 1. The sketch of polarization mismatch for linear polarization wave
图 1. 线极化极化失配示意图

同样的方法可以推导出垂直极化失配因子的表达式为

$$m_{pV} = \frac{1}{2} \frac{\left\{ \left[\frac{(1 - \cos 2\tau)x_V - (1 + \cos 2\tau)}{(1 - \cos 2\tau) - (1 + \cos 2\tau)x_V} \right] - 1 \right\} \cos(2\tau)}{2 \left\{ \left[\frac{(1 - \cos 2\tau)x_V - (1 + \cos 2\tau)}{(1 - \cos 2\tau) - (1 + \cos 2\tau)x_V} \right] + 1 \right\}} \quad (18)$$

其中 $x_V = 10^{XPD_V/10}$ 。

其中,去极化分辨率与同极化衰减 A_p 之间满足一定关系, A_p 计算方法见参考文献[2], ITU-R 模型适合于 $8 \leq f \leq 35$ GHz 和链路仰角小于 60 度, 表示为^[9]

$$XPD_p(\text{dB}) = U \log f - V \log A_p + C_{\tau_1} + C_{\theta} + C_{\sigma} \quad (19)$$

其中

$$U = 30 \quad (20)$$

$$V = \begin{cases} 12.8f^{0.19} & 8 \leq f \leq 20 \text{ GHz} \\ 22.6 & 20 < f \leq 35 \text{ GHz} \end{cases} \quad (21)$$

$$C_{\tau_1} = -10 \log [1 - 0.484(1 + \cos 4\tau_1)] \quad (22)$$

(22)中 τ_1 表示与电磁波极化类型有关, $\tau_1 = 45^\circ$ 圆极化、 $\tau_1 = 0^\circ$ 表示水平极化、 $\tau_1 = 90^\circ$ 表示垂直极化。(19)中

$$C_{\theta} = -40 \log(\cos \theta) \quad (23)$$

$$C_{\sigma} = 0.0052\sigma^2 \quad (24)$$

其中 θ 表示链路仰角, σ 为雨滴倾角方差, 对应时间概率为 1%、0.1%、0.01%、0.001% 时, 取值为 0° 、 5° 、 10° 、 15° 。如果(19)中的 $U = 26$ 、 $V = 20$ 则以上模型可以推广至 V 波段使用。

冰晶去极化问题也是地 - 空路径在考虑降雨去极化时需要考虑的问题, 冰晶出现在对流层 0 摄氏度等温层以上, 冰晶去极化效应通常与降雨去极化存在某种联系, 冰晶去极化的计算理论不再赘述。冰晶去极化分辨率与降雨产生的去极化分辨率关系为^[9]

$$XPD_{\text{ice},p} = XPD_{\text{rain},p} \cdot 0.5 \cdot [0.3 + 0.1 \cdot \log(p)] \quad (25)$$

雨滴和冰晶共同的去极化效应表示为^[9]

$$XPD_p = XPD_{\text{rain},p} - XPD_{\text{ice},p} \quad (26)$$

4. 西安、北京、三亚地区极化失配统计特性

经过对西安地区的降雨率测量统计得出西安地区降雨分布及北京、三亚地区 ITU-R 统计数据, 利用

ITU-R 模型计算西安地区去极化分辨率的统计特性, 利用文中推导得到的模型计算得出了西安、北京、三亚地区 Ka 频段地空链路极化失配因子的统计规律。

表 1 中列出了西安地区降雨率长期统计特性测量结果和 ITU-R 推荐结果。图 2 是西安、北京、三亚地区降雨率统计分布结果。图 2 中西安地区的数据为测量结果, 北京和三亚的结果是 ITU-R 给出的结果, 详见参考文献[2]。

图 3~图 5 是 Ka 频段圆极化和线极化条件时空链路雨致极化失配因子计算结果, 计算中考虑了冰晶的去极化效应, 计算时链路仰角为 10 度, 计算线极化时粒子倾角为 5 度。

Table 1. Measured rain rate and the rain rate recommend by ITU-R for Xi'an, China

表 1. 西安地区降雨率测量值及 ITU-R 推荐值

年时间概率(%)	0.001	0.0025	0.0038	0.0048	0.0053
测量值(mm/h)	69.0000	55.0000	50.0000	45.0000	40.0000
年时间概率(%)	0.0061	0.0076	0.0086	0.0141	0.0283
测量值(mm/h)	35.0000	30.0000	25.0000	15.0000	10.0000
年时间概率(%)	0.1311	0.3729	1.5862	2.4157	3.7483
测量值(mm/h)	5.0000	3.0000	1.0000	0.5000	0.0500
年时间概率(%)	0.001	0.003	0.01	0.03	0.1
ITU-R 值(mm/h)	70	41	22	12	6
年时间概率(%)	0.3	1.0	测量统计值源于 2010,1-2011,10 的降雨率测量数据		
ITU-R 值(mm/h)	2.4	0.6	备注		

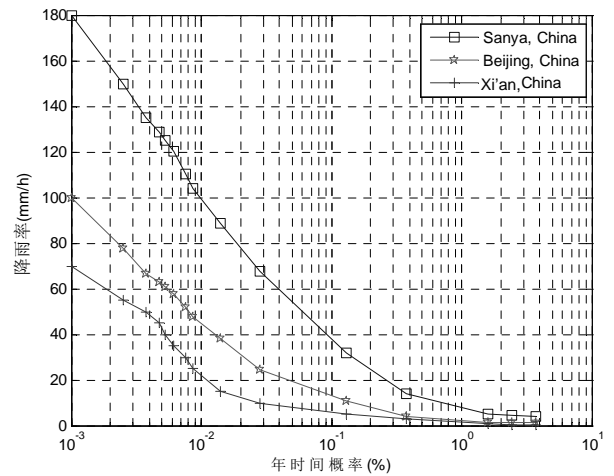


Figure 2. The statistical results of rain rate in Xi'an, Beijing, Sanya, China

图 2. 西安、北京、三亚地区降雨率统计结果

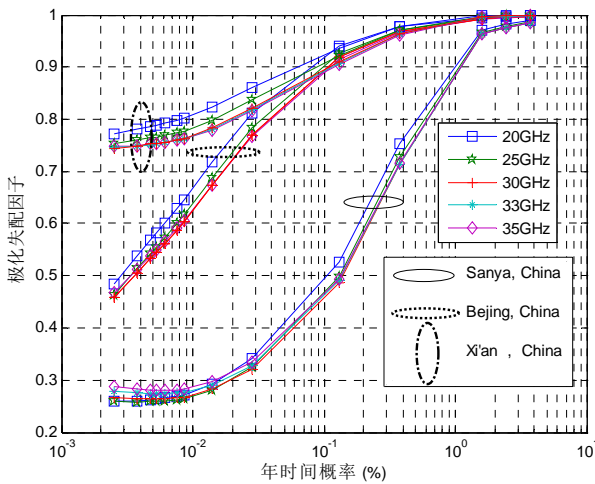


Figure 3. The statistical distribution of polarization mismatch factor for circular polarization wave
图 3. 地空链路圆极化极化失配因子统计特性

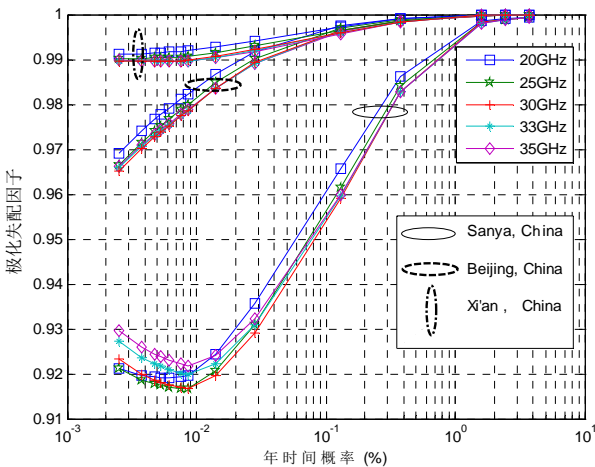


Figure 4. The statistical distribution of polarization mismatch factor for vertical polarization wave
图 4. 地空链路垂直极化极化失配因子统计特性

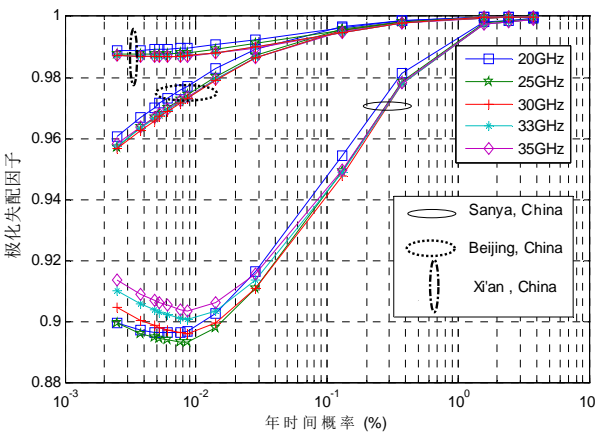


Figure 5. The statistical distribution of polarization mismatch factor for horizontal polarization wave
图 5. 地空链路水平极化极化失配因子统计特性

从图 3~图 5 可以看出,圆极化波极化失配相对水平、垂直极化波极化失配要严重。三亚、北京、西安地区圆极化极化情况下 0.01%时间概率极化失配因子分别约为 0.3、0.6 和 0.8。西安、北京、三亚地区水平、垂直极化情况下极化失配几乎可以忽略,极化失配因子接近 0.9。如果保证 99.99%的通信可靠度,水平、垂直极化情况下则由于极化失配损失功率接近 10%,圆极化情况下则由于极化失配损失功率可高达近 70%,如果在链路性能分析和链路功率储备预算中不考虑极化失配因子,则会严重影响系统性能。

5. 结论

去极化问题通常在频率复用链路中才受到足够重视,但是对于非频率复用链路,去极化问题可以带来极化失配损耗,从文中研究结果可以看出,极化失配功率损耗可高达 70%甚至更高,所以极化失配问题在 Ka 频段链路性能分析和链路功率储备预算中不可忽略。文中推导得出的公式对于 Ka 频段链路性能分析和链路预算具有重要的理论意义和参考价值,该公式可以适用于其它地区及其它环境,例如降雪、沙尘等环境。由于现有的雨致去极化评估模型最高使用频段为 V 波段,但是根据雨致去极化与雨致衰减具有一定的相关关系的规律,可以推断毫米波段更高波段的去极化及极化失配问题更为严重,所以电波传播工作者应该根据本文给出的结果,致力于研究毫米波段其它波段在各种传播环境中的去极化及极化失配规律特性。

6. 致谢

本论文的工作得到以下资金资助:国家自然科学基金资助项目(61001065);中央高校基本科研业务费专项资金资助。论文作者还要感谢参与降雨特性测量工作的所有老师和学生。

参考文献 (References)

- [1] 熊皓. 无线电波传播[M]. 北京: 电子工业出版社, 2000: 487-531.
- [2] 弓树宏. 电磁波在对流层中传输与散射若干问题研究[D]. 西安电子科技大学, 2008.
- [3] 徐英霞. 沙尘暴与降雨对 Ka 频段地空路径传输效应研究[D]. 西安电子科技大学, 2003.
- [4] 谢益溪等. 电波传播——超短波·微波·毫米波[M]. 北京: 电

Ka 频段雨致极化失配特性研究

- 子工业出版社, 1990: 1-385.
- [5] 弓树宏, 谢楷, 李小平. Ka 频段电磁波大气衰减特性研究进展[A]. 临近空间飞行器技术论坛论文集(上)[C], 北京: 2009, 206-216.
- [6] 吕海寰, 蔡剑铭, 甘仲民等. 卫星通信系统(第二版)[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2001: 45-73.
- [7] L. J. Ippolito. Propagation effects handbook for satellite systems design—A summary of propagation impairments on 10 - 100 GHz satellite links with techniques for system design. Fourth Edition. Baltimore: Westinghouse Electric Corporation, 1989.
- [8] H. Sizun. Radio wave propagation for telecommunication applications. New York: Springer Berlin Heidelberg, 2003: 13-254.
- [9] ITU-R P.618-9. Propagation data and prediction methods required for the design of earth-space telecommunication systems, 2008.