

西安电子科技大学

---

硕士学位论文

---

Ka频段雨衰特性研究

---

姓名：郭烜

---

申请学位级别：硕士

---

专业：通信与信息系统

---

指导教师：刘彦明

---

201105

## 摘要

随着低频段资源的日益拥挤,具有干扰少、可用频谱宽等优点的 Ka 频段成为国内外的应用热点。然而由于 Ka 频率高(20-40GHz),Ka 频段通信信号的传播衰减较大,其中降雨的影响最严重,因此本文针对 Ka 频段的降雨衰减特性展开研究。

本文深入分析了电磁波在不同环境下的传播衰减机理,如大气分子、沙尘暴和降雨等因素的影响,其中降雨衰减最大。总结分析了降雨衰减模型和预报模型的特点、相关参数和适用条件,以及降雨衰减模型的修正方法。为了能更精确地评估西安地区降雨衰减特性,需要大量的实测降雨数据和降雨衰减数据。

论文设计并搭建了 Ka 频段降雨衰减测量系统,包括降雨特征测量和衰减特性测量两个子系统,详细介绍了测量系统的工作原理、实验条件、实验数据的检测和记录方法。利用 Ka 频段降雨衰减测量系统收集了一年的降雨数据和降雨衰减数据,采用数据滤波、温差补偿和确定参考电平等处理方法对测量数据进行处理。基于降雨衰减理论和实测降雨数据,提出了西安地区降雨衰减模型,并依据计算结果分析了温度、湿度和降雨率参数对降雨衰减的影响趋势,给出了西安地区真实的降雨特性与降雨衰减特性。

本文通过实测数据研究西安地区的 Ka 降雨衰减模型,为研究我国其它地区的降雨衰减特性提供了有价值的测量方法和降雨衰减计算方法。

**关键词:** Ka 频段 降雨衰减 测量系统 数据处理

## Abstract

Along with the low frequency resource increasingly crowded, the Ka-band, which has advantages of less interference and available bandwidth, becomes the application hot both at home and abroad. However, owing to the high frequency(20~40GHz) of Ka-band, the communication signals in Ka-band has the bigger attenuation, in which the influence of rainfall is the worst, so the paper study the rain attenuation characteristics in Ka-band.

This thesis analysis the attenuation mechanism of the electromagnetic wave passing in different environments deeply, for example the affect of the air molecules, sandstorm and rain and so on, in which the rain attenuation is the biggest. Sum up and analysis the rain attenuation models and forecast models, along with their characteristics, parameters, applicable condition and the correction methods of the rain attenuation models. In order to assess the rain attenuation in Xi'an accurately, it needs a lot of rainfall datas and rain attenuation datas.

Design and built the rain attenuation measuring system in Ka-band, including two subsystems, the rainfall characteristics measuring system and the rain attenuation measuring system, and introduce the principle, experimental data, testing and record of the systems. Collect one whole year's rainfall datas and rain attenuation data by the rain attenuation measuring system in Ka-band, the measured datas was processed with the methods of data filtering, temperature compensation and fixing the standard level. Based on the rain attenuation's theory and measured datas, it gives the rain attenuation model in Xi'an area, and analysiss the parameters of the temperature, humidity and rainfall rate on the effect of the rain attenuation trend from the results, and gives the real rainfall characteristics and the rain attenuation characteristics in Xi'an area.

This thesis study the rain attenuation model in Ka-band in Xi'an area by the measured datas, which provides the valuable methods of measuring and calculating rain attenuation for studying the rain attenuation characteristics in other areas in China.

**Keyword: Ka-band    Rain attenuation    Measurement System    Data processing**

## 第一章 绪论

本章介绍了本文的研究背景和意义,阐述了 Ka 频段雨衰的特性及其国内外的研究现状,从实测数据方面突出本文工作的重要性。重点介绍了论文的内容安排、主要工作与创新点。

### 1.1 研究背景和意义

人类步入信息社会后,无线电作为信息传输和获取的重要手段得到了广泛的开发和应用,无线电已广泛应用于人类生活的各个领域。一般说来,无线电应用的历史是不断开发利用越来越高的频率的历史,在现阶段,微波以下频段已非常拥挤,需不断开发利用更高的频段来满足不断增长的新业务的需求。同时,对于现有的通信频段需要不断维护和更新通信技术,扩大其在军事和民用方面的应用领域。

上个世纪 70 年代后期,由于 L、C、X、Ku 等频段不能满足高速、宽带、小口径终端等应用的需求,当时就已把开发 Ka 频段卫星通信技术列为研究项目。经过 20 多年的研究与试验,Ka 频段卫星通信系统已进入实用化阶段。

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无线通信系统的主流方式。Ka 频段无线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,例如沙尘暴以及云、雨、雪、雾等水凝物产生的衰减效应,其中降雨产生的衰减尤为严重,降雨衰减甚至可以引起高达数十分贝的信号衰减,导致信号中断,全面影响了无线系统工作的有效性和可靠性,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<sup>[1-4]</sup>。

为了进一步开发新的通信系统及充分利用 Ka 频段的资源,那么对 Ka 频段降雨衰减特性和降雨衰减模型的研究就具有相当重要的理论意义和实用价值,因此抓紧 Ka 频段传播试验工作,建立我国自己的 Ka 频段降雨衰减模型迫在眉睫,通过设计并实现一套完整的 Ka 频段雨衰特性测量系统,为分析影响 Ka 频段通信质量的原因提供必要的的数据,为我国的 Ka 频段理论研究提供第一手的数据,结合我国的实际情况,找到适合我国的相应抗雨衰对策,为以后我国的 Ka 频段的发展提供宝贵的资料。

## 1.2 Ka 频段雨衰特性及其研究现状

### 1.2.1 Ka 频段雨衰特性

雨衰,是指电波在雨层中传播引起的衰减。Ka 频段雨衰的特点就是衰减值大,影响高频段通信。雨衰的大小与雨滴直径与波长的比值有着可比性关系,而雨滴的半径则与降雨率有关。实测结果表明雨滴的半径约在 0.025cm~0.3cm。C 波段的电波波长在 7.5cm 左右,与雨滴半径相关较大,因此受降雨影响较小,一般小于 2dB; Ku 波段内电波的波长在 2.5cm 左右,故降雨对电波产生的影响比较明显,最大可达 20dB; 在更高的频段 Ka 频段,那么雨衰的影响会更明显,甚至会造成通信中断。

Ka 频段电波比 Ku 频段、C 频段受更大的降雨衰减、去极化和噪声等的影响。对降雨率为 22.4mm/h 的降雨,在地球站对卫星的仰角为 40° 时,C 频段的雨衰仅为 0.1dB,可忽略; Ku 频段的雨衰为 4.5dB; Ka 频段的下行链路频率为 20GHz 时,雨衰为 12.2dB,而上行链路频率为 30GHz 时的雨衰则高达 23.5dB<sup>[5]</sup>。

为了克服这些影响,C 频段或 Ku 频段常常使用预留备余量的办法,但在 Ka 频段如预留备余量,则需要十几或二十几分贝,故采用预留备余量的办法很不现实;而且为了解决一个小局部的大降水,全部覆盖区域都预留同样大的备余量,这样也很不合理。不同频段的传输损耗和备余量都不同,以下行链路为例,要想补偿这些影响,不同频段卫星的等效全向辐射功率(EIRP)就要不同,而不论什么频段的卫星天线要覆盖相同的服务区,天线的最大增益却是相同的,那就只能改变卫星转发器的输出功率了。C 频段和 Ka 频段的传输损耗差 14dB,降雨备余量差 12.11dB,则一共就要差 26.11dB;假定不考虑其他措施,就需要 Ka 频段卫星转发器的输出功率比 C 频段大 26.11dB,这显然是办不到的。同理,对上行链路要增加发射地球站的 EIRP 近 40dB 也是不现实的。

对降雨信号的衰减是波长在 1~1.5cm 之间的 Ka 频段的典型问题。由于使用 Ka 频段的波长与雨滴直径长度相仿,雨滴使信号发生畸变,目前正在设计 Ka 频段卫星通信系统,因降雨衰减而引起的通信中断平均每月超过 3 小时,这就难以满足一般电信用户和广播电视通信可利用率达 99.9%的要求。目前为了克服雨衰已提出很多种解决方案,例如可增大信号的功率,设立更多的地面终端站使信号沿多路传送、控制功率分配等。Ka 频段卫星通信雨衰问题的解决,在一定程度上是服务质量和费用的折中,要保证 Ka 频段卫星通信的高可靠性和高利用率,就必须在链路设计上有一定的余量来避免暴雨造成的通信中断,这种余量在正常天气下却是一种浪费,会导致整个系统的成本的增加和终端价格的上升。

Ka 频段雨衰的缺点就是衰减严重,想要充分的利用 Ka 频段的宽频谱特性,就应该充分发挥它的优点,避开雨衰大的这个缺点。

## 1.2.2 雨衰的研究现状

有关雨衰的研究,一直以来都被国内、外众多学者所关注。早期的研究一般把雨滴看作球形,根据 Mie 理论计算雨滴的散射截面和吸收截面研究降雨衰减。为了更真实地反映雨滴的形状,一般认为雨滴为扁椭球状或者底部有一凹槽的扁椭球状的 Pruppacher-Pitter 型雨滴,伴随着产生了计算其散射特性的各种计算方法,如点匹配法、T 矩阵法, Fredholm 积分方法等等,在此基础上对不同极化和不同频率电波的降雨衰减和雨致去极化进行了广泛的计算,得到了不同频率雨致特征衰减与降雨率的指数关系,并在大量实验数据的基础上得到了众多的雨衰预报模型和去极化预报模型。

关于雨衰的预报模型有: Assis-Einloft Improved 模型; Australian 模型; Brazil 模型; Bryant 模型; Crane Global 模型; Crane two components 模型; EXCELL 模型; Garcia 模型; ITU-R 618-5 模型; ITU-R 618-6 模型; Karasawa 模型; Leitao-Watson 模型; Matriccioni 模型; Misme-Waldteufel 模型; SAM 模型; Svjatogor 模型; ITU-R 模型, Lin 模型; Stutzman-Dishman 模型和 Fedi 模型等。COST-235 工程的 Final Report 对这些模式进行了详细的对比研究和实验数据检验。Dissanayake 等提出一种改良的预报模型,该模型联合考虑了降雨衰减、气体吸收、云衰减、融化层衰减、对流层闪烁和低仰角衰落,我国中电集团 22 所赵振维、林乐科等在雨衰预报模型方面做了大量的工作,提出了相应的 China 预报模型。

国内自八十年代以来,西安电子科技大学的王一平教授、黄际英教授、肖景明教授等人开展了降雨方面的实验和理论研究,取得了一批理论和实验成果,如雨衰与去极化理论计算及预报、雨滴倾角统计分布等。中国电波研究所、武汉大学等单位也开展了这方面的研究工作,分析了全国零摄氏度等温层高度统计分布、雨介质精细结构、我国雨强统计分布、降雨衰减和去极化效应及对通信系统的影响等,建立了降雨去极化预报模型,对国际上现有的雨衰模型进行了修正。由于降雨特性与雨衰具有较强的地域性,不同的地貌、不同的气候均有很大的差异,因此,各国必需开展独立的研究工作<sup>[2·6·7]</sup>。

国内外的雨衰理论研究已趋于成熟。在实际测量方面,国外通过多年的积累也已获得大量的实验数据,进而对理论模型进行了各种不同方法的修正,使之能针对各地区进行更准确的降雨衰减评估;然而由于测试手段与科技发展的限制,导致国内实测降雨数据的缺乏,特别是长期连续的实验数据,严重影响了我 国依靠实测数据对模型进行修正的工作,所以获得大量的实测降雨数据对目前我国雨

衰的研究工作有很大的帮助。

基于对实测数据的需求,设计了一套 Ka 频段雨衰特性测量系统,该系统包括降雨物理特征测量和衰减特性测量两个子系统,对测量系统记录的实时的数据进行数据处理分析,处理方法包括:温差补偿、数据滤波和确定参考电平等,减少实验数据测量误差和计算误差,为降雨衰减模型的修正提供有力的数据支持,也为我国能更好的提出抗雨衰策略奠定了基础。

## 1.3 论文内容安排及创新点

### 1.3.1 论文的内容安排

本文以 Ka 频段降雨衰减为研究切入点,搭建了 Ka 频段雨衰减测量系统,通过测量系统得到实测的降雨数据,完成了 Ka 频段雨衰测量数据收集和分析,以及计算相应的衰减值的工作。

第一章介绍了本文的研究背景、意义,阐述了 Ka 频段雨衰特性的国内外研究现状,介绍了论文的内容安排、主要工作与创新点。

第二章介绍了本论文依据的各种理论知识,从电磁波传播的特性入手,重点介绍了电磁波在各种环境下传播的衰减特性,然后列举出影响衰减的主要因素并详细的分析各因素对衰减的影响。

第三章介绍了现有的各种降雨模型及特征参数修正的情况,概述了雨衰的机理,然后列举出现有的几种降雨衰减评估模型,并进行简单的比较。重点介绍了目前特征衰减参数的修正方法及修正结果,并提出模型和参数修正工作对实测数据的需求,引出第四章测量系统的介绍。

第四章全面介绍了 Ka 频段雨衰测量实验系统,主要包括雨滴谱和衰减特性测量系统,从需求分析、工作原理、实验结构等方面予以介绍。重点介绍了对实验数据的处理和分析过程。

第五章介绍了该实验的研究结果,基于测量系统给出的实时的降雨数据,在 Matlab 平台上进行仿真计算,得出准确的降雨衰减,并观察不同因素对雨衰的影响,具体分析各因素造成的衰减情况。

第六章是结束语,规划需要进一步研究的内容和方向,以及完善得到的实验结果。

### 1.3.2 论文的主要工作与创新点

本文的主要工作包括以下六点

1. 总结了 Ka 频段降雨衰减的机理,研究了国内外现有的多种降雨衰减预报模型及它们各自的特点,提出修正模型对实测数据的需求。

2. 根据计算雨衰值的方法,统计分析雨衰计算中要用到的数据,提供给测量系统的设计者。

3. 处理测量系统采集到的所有数据,包括气象数据,雨滴谱降雨数据和接收机降雨数据,完成一年所有实验数据的分析和处理。

4. 根据得到的西安地区的降雨实测数据,编写算法计算对应的衰减量。

5. 统计观察得出的衰减量,提出影响雨衰的因素,并给出各因素对雨衰的影响效果。

论文的创新点主要有以下两点:

1. 针对测量系统收集到的一年的降雨数据,采用温差补偿、数据滤波和确定参考电平等方法对数据进行处理和分析,整合成可供仿真系统用的数据。

2. 基于处理后的实验数据,提出针对西安地区计算雨衰的方法,基于 Matlab 平台实现仿真,得出最后的雨衰量,并分析影响衰减的各因素情况。



## 第二章 Ka 频段电磁波衰减特性

### 2.1 电磁波传播特性

无线电波通过多种传输方式从发射天线到接收天线。主要有自由空间波，对流层反射波，电离层波和地波。

表面波传播，就是电波沿着地球表面到达接收点的传播方式。电波在地球表面上传播，以绕射方式可以到达视线范围以外。地面对表面波有吸收作用，吸收的强弱与带电波的频率，地面的性质等因素有关。

天波传播，就是自发射天线发出的电磁波，在高空被电离层反射回来到达接收点的传播方式。电离层对电磁波除了具有反射作用以外，还有吸收能量与引起信号畸变等作用。其作用强弱与电磁波的频率和电离层的变化有关。

散射传播，就是利用大气层对流层和电离层的不均匀性来散射电波，使电波到达视线以外的地方。对流层在地球上约 10 英里处，是异类介质，反射指数随着高度的增加而减小。

外层空间传播，就是无线电在对流层，电离层以外的外层空间中的传播方式。这种传播方式主要用于卫星或以星际为对象的通信中，以及用于空间飞行器的搜索，定位，更踪等。自由空间波又称为直达波，沿直线传播，用于卫星和外部空间的通信，以及陆地上的视距传播。视线距离通常为 50km 左右。

电波传播的实际环境总是涉及各种各样的媒质，在一般情况下，电波传播的过程就是电磁波与媒质相互作用的物理过程。在电磁波的作用下媒质中产生变化、磁化及传到等各种电磁效应，这些效应发过来又对传播中的电磁波施加各种影响。因此，电波传播特性既与媒质特性参数及其时空变化有关，又与电波特征参数（最关键的是频率和极化）有关。

电磁波在各种特性媒质中的传播介质可能涉及吸收、折射、反射、散射、导引和谐振等多径干涉和多普勒（Doppler）频移效应等一系列物理过程。这些过程既取决于媒质的特性，也与波的特性密切相关。同一媒质对于不同频段的电磁波，可表现出极不相同的特性<sup>[8]</sup>。

## 2.2 衰减产生机理

### 2.2.1 对流层晴空大气衰减机理

对流层晴空大气对无线电波的吸收作用,主要影响频率高于 10GHz 的电磁波。晴空大气对无线电波的吸收作用,主要是由于氧气和水蒸气吸收而导致。大气吸收可以用精确的物理模型,例如 Libebe 模型,也可以用近似或者概率统计模型,例如 ITU-R 模型或者 Salonen 模型。

Libebe 模型计算吸收衰减率公式为<sup>[9]</sup>

$$\gamma_a(z, f) = 0.1820 f N''(f) \text{ (dB/km)} \quad (2-1)$$

(2-1) 中  $z$  为高度 (km),  $f$  为频率 (GHz),  $N''(f)$  与频率的有关的吸收项,可以写为<sup>[9]</sup>

$$N''(f) = N_o''(f) + N_n''(f) + N_v''(f) + N_c''(f) \quad (2-2)$$

(2-2) 中  $N_o''(f)$  为与氧气吸收谱线有关的折射指数的虚部,  $N_n''(f)$  为与氧气非共振吸收谱线有关的折射指数的虚部,  $N_v''(f)$  为与水蒸气吸收谱线有关的折射指数的虚部,  $N_c''(f)$  为与水蒸气分布情况有关的折射指数的虚部<sup>[10]</sup>。

ITU-R 模型计算吸收衰减率公式为<sup>[9]</sup>

$$\gamma_a = \gamma_o + \gamma_v \text{ (dB/km)} \quad (2-3)$$

(2-3) 中  $\gamma_o$  和  $\gamma_v$  分别代表氧气吸收衰减率和水蒸气吸收衰减率,可分别表示为<sup>[9]</sup>

$$\gamma_o = \begin{cases} \left[ \frac{7.27}{f^2 + 0.351 r_p^2 r_t^5} + \frac{7.5}{(f-57)^2 + 2.44 r_p^2 r_t^5} \right] f^2 r_p^2 r_t^2 10^{-3} & f \leq 57 \text{GHz} \\ \frac{(f-60)(f-63)}{18} \gamma_o(57) - 1.66 r_p^2 r_t^{8.5} (f-57)(f-63) + \\ \frac{(f-57)(f-60)}{18} & 57 \leq f \leq 63 \text{GHz} \end{cases} \text{ (dB/km)} \quad (2-4)$$

$$\gamma_v = \left[ \begin{aligned} & 3.27 \times 10^{-2} r_t + 1.67 \times 10^{-3} \frac{r_t^7 \rho_v}{r_p} \\ & + 7.7 \times 10^{-4} \sqrt{f} + \frac{3.79}{(f-22.235)^2 + 9.81 r_p^2 r_t} \\ & + \frac{11.73 r_t}{(f-183.31)^2 + 11.85 r_p^2 r_t} + \frac{4.01 r_t}{(f-325.153)^2 + 10.44 r_p^2 r_t} \end{aligned} \right] f^2 r_p r_t 10^{-4} \text{ (dB/km)}$$

(2-5)

(2-4) 和 (2-5) 中  $f$  为频率(GHz),  $r_p = p/1013$  (其中  $p$  为大气压, 单位为 hPa),  $r_t = 288/(t+273)$  (其中  $t$  为温度, 单位为  $^{\circ}\text{C}$ )。 (2-5) 中  $\rho_v$  是水蒸气密度, 单位为  $\text{g}/\text{m}^3$ 。

## 2.2.2 对流层沉降粒子衰减机理

恶劣气象环境对电磁信号的衰减效应, 主要是由于随机分布离散粒子对电磁信号的散射和吸收所导致。如图 2.1, 假设电磁波沿  $z$  方向通过雨、雪等气象环境区域, 在不考虑多重散射的情况下, 波强度可以用以下公式表示<sup>[11]</sup>

$$\frac{dI}{dz} = -(\sum Q_i)I \quad (2-6)$$

(2-6) 的解为

$$I = I_0 e^{-\sum Q_i z} \quad (2-7)$$

其中  $\sum Q_i$  为空间单位体积内所有随机分布粒子的总消光截面,  $I_0$  为  $z=0$  处的波强度。

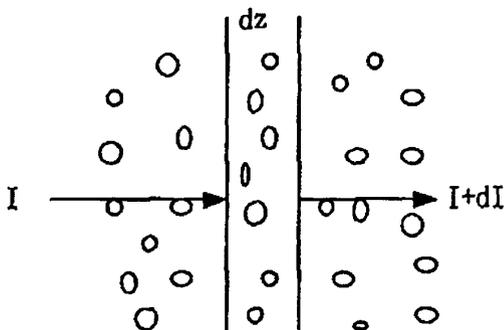


图 2.1 恶劣气象环境衰减示意图

所以降雨、降雪、沙尘等环境引起的特征衰减写为<sup>[12 13]</sup>

$$\gamma = 4.343 \times 10^3 \int Q_i(D) N(D) dD \quad (\text{dB}/\text{km}) \quad (2-8)$$

将 (2-8) 化简为

$$\gamma = -4.343 \times 10^3 \frac{4\pi}{k} \int \text{Im}[f_{H,V}(0)] N(D) dD \quad (\text{dB}/\text{km}) \quad (2-9)$$

$$\gamma = 4.343 \times 10^3 \frac{4\pi}{k^2} \int \text{Re}[S_{H,V}(0)] N(D) dD \quad (\text{dB}/\text{km}) \quad (2-10)$$

(2-8) 和 (2-9) 及 (2-10) 中  $N(D)$  为离散随机介质的粒子谱分布。

恶劣气象环境引起的总衰减等于衰减率乘以穿过恶劣气象环境区域的有效路径  $L_{eff}$  [11], 即

$$A(\text{dB}) = \gamma L_{eff} \quad (2-11)$$

## 2.3 影响衰减的主要因素

毫米波传播拥有一些特殊的性能。与微波、短波相比, 它的频率覆盖宽、传输容量大、天线增益高、方向性强; 与光波相比, 穿透云雾和等离子体的能力更强, 能全天候地工作。因此, 毫米波技术广泛地应用于通信、雷达、电视广播、射电天文、大地测绘及地球资源遥感等领域。但是大气环境对毫米波传播的衰减、相移和去极化等效应也将制约毫米波技术的应用。底层大气中充满了氧气、氮气、二氧化碳等多种气体和水汽, 其固有的吸收频率, 主要位于毫米波范围内, 水汽沉降物(如雨、云、雾、雪片、冰晶体等)和沙尘、烟雾的粒子尺寸在微米至毫米的范围, 从而对毫米波传播产生严重的吸收和散射。毫米波大气传播最突出的效应是气体分子吸收和大气沉降物吸收与散射导致的衰减, 其中特别是降雨衰减[8]。

### 2.3.1 大气分子对衰减的影响

电磁波通过大气时, 大气中的分子, 主要是水汽和氧气分子, 会吸收电波能量而产生能级跃迁, 从而引起电波衰减。大气中的氧气和水蒸气吸收作用会造成传输损耗, 当频率大于 20GHz 时, 这种作用是非常严重的。水汽分子具有的固定的电偶极子, 氧气分子具有固定的磁偶极子, 它们都具有固定的频率, 当电波频率与其固有的谐振频率相同时, 即产生强烈的吸收。氧分子吸收峰为 60GHz 和 118GHz, 水汽分子的吸收峰为 22GHz 和 183GHz。如果把大气吸收最小的频段称为大气传播“窗口”, 在 100GHz 以下共有 3 个“窗口”频率, 分别为 19GHz、35GHz 和 90GHz。气体衰减主要受频率、水蒸汽浓度和天线仰角的影响。

大气吸收是电波传播沿途连续发生的, 而且由于大气物理特性随高度变化而变化, 所以不同部分路径衰减情况也在发生变化。对此, 必须首先确定其衰减率与大气物理特性之间关系, 然后再按衰减率的积分确定整个传播路径上的衰减。在研究过程中形成了许多计算模型, 例如 ITU-R 模型, Salonen 模型, CCIR 模型, Smith 专门研究了 10GHz 以下频段电磁波大气吸收衰减, 当然 ITU-R 等模型也可以用于 10GHz 以下的频段[2]

2008 年的 ITU-R 给出了一个适用于 1-350GHz 频段简化的的大气吸收衰减计算模型, 干空气吸收衰减率表示为<sup>[14 15]</sup>:

$$\gamma_o = \left[ \frac{7.2r_i^{2.8}}{f^2 + 0.34r_p^2 r_i^{1.6}} + \frac{0.62\xi_3}{(54-f)^{1.16\xi_1} + 0.83\xi_2} \right] f^2 r_p^2 \times 10^{-3} \quad f \leq 54\text{GHz} \quad (2-12)$$

(2-12) 中  $f$  表示频率单位为 GHz,  $r_p = P/1013$  表示相对压强,

$r_i = 288/(273+t)$ , 其中  $t$  表示摄氏温度,  $\xi_1$ 、 $\xi_2$ 、 $\xi_3$  分别表示为

$$\xi_1 = \varphi(r_p, r_i, 0.0717, -1.8132, 0.0156, -1.6515) \quad (2-13)$$

$$\xi_2 = \varphi(r_p, r_i, 0.5146, -4.6368, -0.1921, -5.7416) \quad (2-14)$$

$$\xi_3 = \varphi(r_p, r_i, 0.3414, -6.5851, 0.2130, -8.5854) \quad (2-15)$$

(2-13) ~ (2-15) 中  $\varphi(r_p, r_i, a, b, c, d)$  表示一个算法, 表示为

$$\varphi(r_p, r_i, a, b, c, d) = r_p^a r_i^b \exp[c(1-r_p) + d(1-r_i)] \quad (2-16)$$

水汽吸收衰减率  $\gamma_w$  表示为

$$\begin{aligned} \gamma_w = & \left\{ \frac{3.98\eta_1 \exp[2.23(1-r_i)]}{(f-22.235)^2 + 9.42\eta_1^2} g(f, 22) + \frac{11.96\eta_1 \exp[0.7(1-r_i)]}{(f-183.31)^2 + 11.14\eta_1^2} \right. \\ & + \frac{0.081\eta_1 \exp[6.44(1-r_i)]}{(f-321.226)^2 + 6.29\eta_1^2} + \frac{3.66\eta_1 \exp[1.6(1-r_i)]}{(f-325.153)^2 + 9.22\eta_1^2} \\ & + \frac{25.37\eta_1 \exp[1.09(1-r_i)]}{(f-380)^2} + \frac{17.4\eta_1 \exp[1.46(1-r_i)]}{(f-448)^2} \\ & + \frac{844.6\eta_1 \exp[0.17(1-r_i)]}{(f-557)^2} g(f, 557) + \frac{290\eta_1 \exp[0.41(1-r_i)]}{(f-752)^2} g(f, 752) \\ & \left. + \frac{8.3328 \times 10^4 \eta_2 \exp[0.99(1-r_i)]}{(f-1780)^2} g(f, 1780) \right\} f^2 r_i^{2.5} \rho \times 10^{-4} \quad (2-17) \end{aligned}$$

(2-17) 中  $\eta_1$ 、 $\eta_2$  和  $g$  分别表示为

$$\eta_1 = 0.955r_p r_i^{0.68} + 0.006P \quad (2-18)$$

$$\eta_2 = 0.735r_p r_i^{0.5} + 0.0353r_i^4 \rho \quad (2-19)$$

$$g(f, f_i) = 1 + \left( \frac{f-f_i}{f+f_i} \right)^2 \quad (2-20)$$

其中  $\rho$  表示水汽浓度 (密度) 单位为  $\text{g/m}^3$ 。

对于地-空链路而言, 总衰减为

$$A = \gamma_o h_o + \gamma_w h_w \quad (2-21)$$

其中  $h_o$  和  $h_w$  表示干空气和水汽的等效高度, 当  $f < 70\text{GHz}$  时  $h_o < 10.7r_p^{0.3}$ , 当  $f < 350\text{GHz}$  时,  $h_w$  表示为

$$h_w = 1.66 \left( 1 + \frac{1.39\sigma_w}{(f-22.235)^2 + 2.56\sigma_w} + \frac{3.37\sigma_w}{(f-183.31)^2 + 4.69\sigma_w} + \frac{1.58\sigma_w}{(f-325.1)^2 + 2.89\sigma_w} \right) \quad (2-22)$$

其中  $\sigma_w$  表示为

$$\sigma_w = \frac{1.013}{1 + \exp[-8.6(r_p - 0.57)]} \quad (2-23)$$

ITU-R 建议中给出水蒸气密度  $7.5/\text{g}/\text{m}^3$ 、气压  $1013\text{hPa}$ 、温度为  $15^\circ\text{C}$  条件下的干燥空气与水蒸气以及总的衰减系数各自随频率的变化曲线, 如图 2.2 所示观察图 2.2 可得干燥空气的衰减系数在  $20\text{GHz}$  时约为  $0.01\text{dB}$ , 在  $30\text{GHz}$  约为  $0.02\text{dB}$ ; 水蒸气的衰减系数在  $20\text{GHz}$  约为  $0.1\text{dB}$ , 在  $30\text{GHz}$  约为  $0.07\text{dB}$ 。  $30\text{GHz}$  的干燥空气衰减系数略大于  $20\text{GHz}$  的衰减系数, 而  $20\text{GHz}$  的水蒸气的衰减系数要大于  $30\text{GHz}$ , 总的衰减系数为  $20\text{GHz}$  略大于  $30\text{GHz}$ 。从图中可以看出, 氧气的吸收峰值为  $60\text{GHz}$  和  $118\text{GHz}$ , 水汽分子的吸收峰值为  $22\text{GHz}$  和  $183\text{GHz}$ 。图 2.2 中还清晰的表明无论是氧气和水蒸气还是两者总的衰减都是随着频率的增大而逐渐上升。

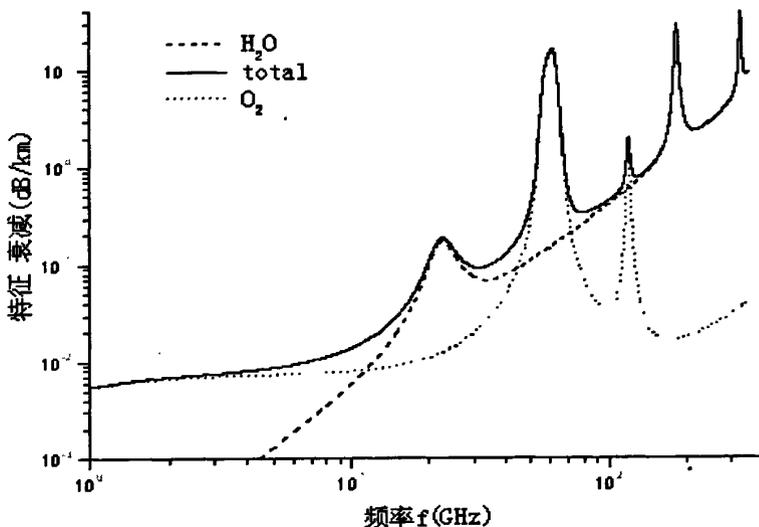


图 2.2 氧气和水蒸气及总的特征衰减率随频率的变化关系

### 2.3.2 大气沉降粒子对衰减的影响

由于 Ka 频段频率较高, 所以此频段的电磁波会受到如云、雨、沙尘暴、冰雪、浓雾等大气沉降粒子对电波产生衰减、去极化、多径效应以及在地球站附近覆盖的这些粒子沉落在收发天线上产生沉积等效应。以上这些效应将会在不同程度上影响 Ka 频段通信的信道特性, 它们会使系统的信噪比降低, 不同极化通道的隔离度变坏, 通信信道的电磁干扰增加, 信号产生时延与衰落, 传输速率减小, 误码率与误比特率上升, 甚至信号中断, 全面影响了 Ka 频段卫星通信系统工作的有效性与可靠性。为了保证 Ka 频段通信系统的正常工作, 必须在深入研究以上传播效应的基础上, 采取相应的措施来克服以上影响。对于 Ka 频段通信系统大气沉降粒子的衰减影响以降雨最为严重, 沙尘暴是典型的非水凝物沉降粒子。

#### 2.3.2.1 沙尘暴衰减特性

据有关文献报道, 国外学者作了有关沙尘暴对微波、毫米波传播影响的理论研究和实际测量工作。这方面最早的工作是 1941 年 J.W.Ryde 作的关于尘暴对微波散射方面的研究。J.W.Ryde 仅考虑了尘暴对雷达的反射率, 发现  $f \leq 30\text{GHz}$  并且浓度比较低的尘暴对雷达信号不产生影响。苏丹记录了十多年来沙尘暴发生的统计数据, 并实地测量了微波在沙尘暴中产生的衰减。Al-Hafid 在伊拉克 Baghoday 附近的纳西里亚至 Darji 之间的 45km、11GHz 的微波电路上进行了沙尘暴直接影响的研究, 观察时采用一种开口谐振器记录下 6 月 1 日-8 月 15 日间伊拉克三个月的接收信号强度, 分析计算了电磁波通过不同沙尘粒子浓度时的衰减, 发现短期(几十分钟)的沙尘暴会对微波信号衰减 10-15dB, 观察到一次 10dB 的衰落持续了 150 分钟, 另一次 26dB 的衰落持续了 40 分钟, 在某些严重的沙尘暴情况下, 信号衰减会导致一连几个小时的完全衰落。对高于 10GHz 的微波信号来说, 沙粒浓度越大衰减越大, 当波长接近沙粒大小时, 衰减达到最大值。美国军方作了爆炸形成的尘土对 35GHz、94GHz 和 140GHz 的雷达毫米波信号传播的实验。国内也有大量学者开始开展这方面的研究, 并且考虑了沙尘暴对毫米波传播的影响<sup>[16-23]</sup>。

地空路径沙尘暴衰减效应计算的理论方法如 2-8~2-10 所示, 其中沙尘粒子可以看作小旋转椭球粒子模型。根据理论计算方法的结果, 工程应用中形成了经验模型, 该模型认为沙尘暴一直延伸至地面以上 2km 左右, 其中 21m 以下沙尘粒子密度与 21m 以上空间粒子浓度差别比较大, 所以模型分为 21m 以下和以上空间描述。

距地面小于  $h(h < 21\text{m})$  处的衰减率表示为

$$\alpha(\text{dB/km}) = -\frac{0.6287f}{V_{b0} \exp[1.25(h-h_0)]} a_{0e} \left(\frac{h}{h_0}\right)^{-\gamma_e} \text{Im} \left[ \frac{\epsilon_m - 1}{\epsilon_m + 2} \right] \quad (2-24)$$

(2-24) 中,  $f$ 、 $V_{b0}$ 、 $a_{0e}$  的单位分别取 GHz、km、mm, 分别表示电波频率、沙尘暴能见度和粒子的等效半径,  $h_0$  为地球站高度,  $\epsilon_m$  为沙尘粒子的辐介电常数。

由于在不同高度沙尘粒子的分布密度不同, 而沙尘在天空的分布又有一定的厚度, 所以对于距地面 1~21m 这段路径上的衰减量和相移量可如下式表示:

$$A_m = \int_{h_0}^{h_m} \alpha \cdot dh / \sin \theta \quad (2-25)$$

式中,  $h_m = 21\text{m}$ ,  $\theta$  为地球站天线仰角。

沙尘暴的厚度可以达到几公里甚至更高, (2-24) 和 (2-25) 表示的衰减经验模型对于高度大于  $h_m$  的地空路径并不适用, 因而对于地空路径上沙尘暴引起的总衰减量的计算利用等效模型。由于高度达到 2km 以上时沙尘粒子的尺寸和密度都比较小, 相应的衰减也很小, 因此假设高度  $h_s$  (一般取 2km 或者根据实际测量结果) 处的衰减和相移趋近于零, 采用求均值的方法, 利用高度  $h_m = 21\text{m}$  处的衰减率  $\alpha_m$  的一半, 计算高度  $h_m$  到  $h_s$  的总衰减量  $A_s$ :

$$A_s = \frac{\alpha_m \cdot (h_s - h_m)}{2 \sin \theta} \quad (2-26)$$

则总衰减可以写为:

$$A = A_m + A_s \quad (2-27)$$

### 2.3.2.2 降雨衰减特性

对于 Ka 频段通信系统大气沉降粒子的衰减影响以降雨最为严重, 降雨衰减的理论计算方法如 (2-8) ~ (2-10) 所示。在工程应用中根据理论模型得出了适用于工程应用的预报模型, 通常是先计算降雨衰减率, 然后求解等效路径来求解总衰减。

由 Olsen 等<sup>[24]</sup>把 Mie 系数进行级数展开, 在负指数雨滴谱尺寸分布下, 得到了雨致特征衰减与降雨率的关系<sup>[1,25]</sup>

$$\gamma = a_r R^{b_r} \quad (\text{dB/km}) \quad (2-28)$$

(2-28) 中  $a_r$  和  $b_r$  是与波极化有关的回归系数, 用下式表示

$$\begin{aligned} a_r &= \frac{1}{2} [a_h + a_v + (a_h - a_v) \cos^2 \theta \cos 2\tau] \\ b_r &= \frac{1}{2a_v} [a_h b_h + a_v b_v + (a_h b_h - a_v b_v) \cos^2 \theta \cos 2\tau] \end{aligned} \quad (2-29)$$

(2-29) 中  $a_h$ 、 $a_v$  和  $b_h$ 、 $b_v$  是水平极化和垂直极化的系数,  $\tau$  为极化倾角,

$\tau = 45^\circ$  表示圆极化波, ITU-R 推荐值见表 2.1<sup>[26]</sup>。

表 2.1 ITU-R 推荐的雨致特征衰减与降雨率指数关系参数

Frequency (GHz)	$a_h$	$a_v$	$b_h$	$b_v$
1	0.000387	0.0009352	0.912	0.880
2	0.00154	0.00139	0.963	0.923
4	0.00650	0.00591	1.121	1.075
6	0.00175	0.00155	1.308	1.265
7	0.00301	0.00265	1.332	1.312
8	0.00454	0.00395	1.327	1.310
10	0.0101	0.00887	1.276	1.264
12	0.0188	0.0168	1.217	1.200
15	0.0367	0.0335	1.154	1.128
20	0.0751	0.0691	1.099	1.066
25	0.124	0.113	1.061	1.030
30	0.187	0.167	1.021	1.000
35	0.263	0.233	0.979	0.963
40	0.350	0.310	0.939	0.929
45	0.442	0.393	0.903	0.897
50	0.536	0.479	0.873	0.868
60	0.707	0.642	0.826	0.824
70	0.851	0.784	0.793	0.793
80	0.975	0.906	0.769	0.769
90	1.06	0.999	0.753	0.754
100	1.12	1.06	0.743	0.744
120	1.18	1.13	0.731	0.732
150	1.31	1.27	0.710	0.711
200	1.45	1.42	0.689	0.690
300	1.36	1.35	0.688	0.689
400	1.32	1.31	0.683	0.684

为了计算其它频率指数关系参数值, 需要用  $a$  和  $f$  的对数插值以及  $b$  和  $f$  线性插值进行计算, 可以用下式表示<sup>[2,14]</sup>

$$\begin{aligned}
 a_r(f) &= \lg^{-1} \left\{ \lg \left( \frac{a_2}{a_1} \right) \left[ \frac{\lg(f/f_1)}{\lg(f_2/f_1)} \right] + \lg(a_1) \right\} \\
 b_r(f) &= \left\{ (b_1 - b_2) \left[ \frac{\lg(f/f_1)}{\lg(f_2/f_1)} \right] + b_1 \right\}
 \end{aligned} \tag{2-30}$$

其中  $a_1$ 、 $a_2$  和  $b_1$ 、 $b_2$  分别为频率  $f_1$ 、 $f_2$  的函数。

## 2.4 小结

本章从电磁波传播特性入手, 详细介绍了电磁波传播过程中衰减机理, 及影响衰减的主要因素, 对于 Ka 频段通信系统来说, 电磁波传播路径上的衰减以降雨的影响最为严重, 所以, 研究降雨引起的通信衰减成为目前的重中之重, 通过研究降雨衰减的变化趋势来提出相应的抗衰减措施。

基于以上研究需求, 并结合现阶段的研究现状, 提出计算雨衰的方法, 设计并搭建了一套 Ka 频段雨衰测量系统, 该系统用于收集 2010 年一年西安地区的降雨数据, 为第三章中降雨衰减模型及参数的修正提供长期的连续的降雨数据。



## 第三章 降雨衰减模型及参数修正

本章总结了国际上流行的 5 种降雨衰减预报模型及其特点、相关参数和计算步骤。阐述了特征衰减参数修正的方法和结果，使用西安的降雨数据对特征参数进行修正，使之能更好地评估降雨衰减特性。

### 3.1 雨衰概述

雨衰，是指电波进入雨层中引起的衰减。它包括雨粒吸收引起的衰减和雨粒散射引起的衰减。雨粒吸收引起的衰减是由于雨粒具有介质损耗引起的，雨粒散射引起的衰减是由于电波碰到雨粒时被雨粒反射而再反射引起的。这种二次发射的电波入与射波方向无关，这是四面八方发射的，这就是所谓的二次散射。由于二次散射，在原来的方向上入射的电波就被衰减了。雨衰的大小与雨滴直径与波长的比值有着可比性关系，而雨滴的半径则与降雨率有关。C 波段的电波波长在 7.5cm 左右，与雨滴半径相关较大，因此受降雨影响较小，一般小于 2dB；Ku 波段内电波的波长在 2.5cm 左右，故降雨对电波产生的影响比较明显，最大可达 20dB；在更高的频段 Ka 频段，那么雨衰的影响会更明显，甚至会造成通信中断。雨衰主要是吸收衰减，大部分表现为热损耗。当电波的波长可以和雨粒的几何尺寸相比拟时，将引起雨粒共振，则产生最大的衰减。

就雨、雪、雾对微波传播的影响来说，其中降雨引起的衰减最为严重。对于 10GHz 以上的频率，由于降雨引起的电波衰减年中相当多的时间内是可观的，因此在设计 Ka 波段无线系统时，需要充分考虑降雨引起的衰减，以便正确评估降雨量对系统通信质量的影响<sup>[27]</sup>。

从图 3.1 给出了雨雾的衰减曲线知，10GHz 以下频段降雨衰减不太严重，在 5.8GHz，16mm/h 的降雨量下衰减仅为 0.18dB/km；而对于 Ka 频段，即使 4mm/h 的降雨率也会引起 0.5db/km 衰减，即降雨是 Ka 频段毫米波通信的主要障碍。

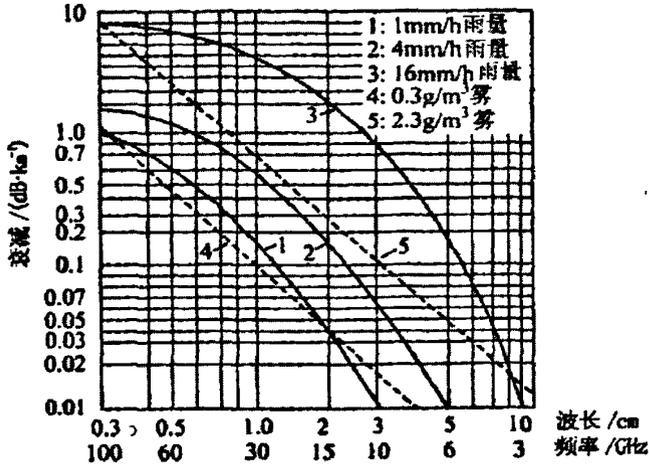


图 3.1 雨雾的衰减曲线、

### 3.2 降雨衰减预报模型

降雨率概率分布的长期统计特性已经被广泛研究，在此基础上产生了大量的降雨衰减的长期统计特性预报模型[87]，其中常用的雨衰长期统计特性预报模型有 Assis-Einloft Improved, Australian, Brazil, Bryant, Crane Global, ITU-R 618-6, 还有其它预报模型，比如 DAH 模型、Manning 模型、UK 模型、Japan 模型，我国赵振维、林乐科等提出的 China 模式等。下面分别介绍 7 种模型的特点、相关参数和计算步骤，并对含有“等效路径”概念的三种模型进行比较分析。

#### 3.2.1 Assis-Einloft Improved 模型

Assis-Einloft 模型最初是适合于陆地链路，后来考虑了卫星链路仰角因素和 ITU-R 的雨顶高度推广至卫星链路的方法，最终形成了 Assis-Einloft Improved 模型。Assis-Einloft Improved 模型引入了“雨胞”的概念，即它评估了无线链路的降雨率轮廓，降雨率轮廓由两个同心圆柱部分组成，如图 3.1 所示，两个圆柱部分发生不同的降雨率<sup>[28,29]</sup>。计算降雨衰减统计分布分为以下五步：

第 1 步：计算路径长度

$$L_s(\text{km}) = \begin{cases} \frac{(h_R - H_s)}{\sin \theta} & \text{链路仰角 } \theta < 5^\circ \\ \frac{2(h_R - H_s)}{[\sin^2 \theta + 2(h_R - H_s)/R_e]^{1/2} + \sin \theta} & \text{链路仰角 } \theta \geq 5^\circ \end{cases} \quad (3-1)$$

式中  $H_s$  表示地面站的海拔高度， $R_e = 8500\text{km}$  表示等效地球半径， $h_R$  表示雨顶

高度，雨顶高度用站点纬度  $Lat$  表示

$$h_r(\text{km}) = \begin{cases} 5 - 0.075(Lat - 23) & Lat > 23 \\ 5 & -21 \leq Lat \leq 23 \\ 5 + 0.1(Lat + 21) & -71 \leq Lat \leq -21 \\ 0 & Lat \leq -71 \end{cases} \quad (3-2)$$

第 2 步：计算路径水平分量：

$$L = L_s \cos \theta \quad (\text{km}) \quad (3-3)$$

第 3 步：对于给定降雨强度  $R_p$ ，计算如图 3.3 所示的雨区参数，内部圆柱的直径可以表示为：

$$D_i = 2.2(100/R_p)^{0.4} \quad (\text{km}) \quad (3-4)$$

外部同轴圆柱的直径为不大于 33km，该区域的降雨率为：

$$R_0 = 10(1 - e^{-0.0105R_p}) \quad (\text{mm/h}) \quad (3-5)$$

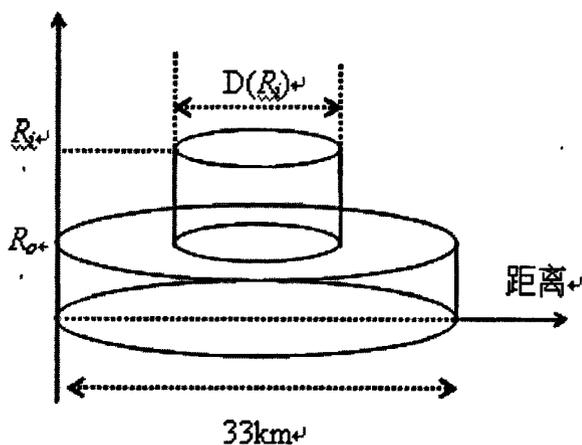


图 3.2 Assis-Einloft Improved 模型降雨率轮廓示意图

第 4 步：计算相应降雨强度下的衰减

$$A_s = \begin{cases} [\gamma(R_p)D_i + \gamma(R_0)(L - D_i)] / \cos \theta & h_r \leq 33 \tan \theta \\ [\gamma(R_p)D_i + \gamma(R_0)(33 - D_i)] / \cos \theta & h_r \geq 33 \tan \theta \end{cases} \quad (\text{dB}) \quad (3-6)$$

其中  $\gamma$  表示降雨衰减率。

第 5 步：计算衰减  $A_s$  超出的时间百分比

$$p(A_s) = p(R_p)L/D_i \quad (\%) \quad (3-7)$$

其中  $p(R_p)$  代表降雨强度  $R_p$  平均一年的发生概率即超的时间百分比。令有效路径  $L_s$  与收发天线之间的距离  $L'$  相等，链路仰角等于 0，则 (3-6) 用 (3-8) 代替

$$A_s = \begin{cases} [\gamma(R_p)D_i + \gamma(R_0)(L - D_i)] / \cos \theta & L \leq 33 \\ [\gamma(R_p)D_i + \gamma(R_0)(33 - D_i)] / \cos \theta & L > 33 \end{cases} \quad (\text{dB}) \quad (3-8)$$

则以上五步可以用来计算陆地链路的衰减统计特点。

### 3.2.2 Crane Global 模型

Crane Global 模型是一种长期统计特性预报模型,它是使用全球点降雨率的统计分布观察资料而形成的预报降雨率统计分布模型,该模型考虑了降雨的水平结构和大气垂直温度结构,可以适用于陆地链路和地-空链路。计算降雨衰减统计分布分为以下五步: [28,30]

第 1 步: 决定降雨率分布  $R_p$  (详细内容请参考文献[37])

第 2 步: 计算水平投射路径长度  $L$ , 对于陆地链路,  $L$  为收发天线之间距离, 对于地-空路径,  $L$  由下式计算:

$$L = \begin{cases} [(H_0(p) - H_s) / \tan \theta] & \theta \geq 10 \\ R_e \psi & \theta < 10 \end{cases} \quad (\text{km}) \quad (3-9)$$

其中  $H_0(p)$  代表  $0^\circ\text{C}$  时等温线在特定空间出现的时间百分比 (详细讨论见文献 [37]),  $R_e$  是地球等效半径 (8500km),  $\psi$  是一个用弧度表示的角, 表示为:

$$\psi = \arcsin \left[ \frac{\cos \theta}{(H_0(p) + R_e)} \sqrt{(H_s + R_e)^2 \sin^2 \theta + 2R_e(H_0(p) - H_s) + H_0(p)^2 - H_s^2} - (H_s + R_e) \sin \theta \right] \quad (3-10)$$

第 3 步: 计算平面投射衰减

$$A(R_p, L) = \begin{cases} \gamma(R_p) \left[ \frac{e^{ubl} - 1}{ub} - \frac{\text{canshu}1^b e^{\text{canshu}2bl}}{\text{cansh}2b} + \frac{\text{canshu}1^b e^{\text{canshu}2bl}}{\text{cansh}2b} \right] & l \leq L \leq L_0 \\ \gamma(R_p) \left[ \frac{e^{ubl} - 1}{ub} \right] & L < l \\ \gamma(R_p)(H_0(R_p) - L_0) & L = 0 (\theta = \pi/2) \end{cases} \quad (3-11)$$

其中  $L_0 = 22.5\text{km}$ , 如果由计算的  $L > L_0$  则平面投射衰减为

$$A(R'_p, L_0) = \gamma(R'_p) \left[ \frac{e^{u'bl'} - 1}{u'b} - \frac{\text{canshu}1^b e^{\text{canshu}2'bl'}}{\text{cansh}2'b} + \frac{\text{canshu}1^b e^{\text{canshu}2'bl'}}{\text{cansh}2'b} \right] \quad (3-12)$$

其中  $R'_p$  代表修正的发生时间概率  $p'$ :

$$p' = p \left( \frac{L_0}{L} \right) \quad (3-13)$$

$u$ 、 $\text{canshu}1$ 、 $\text{canshu}2$  及  $l$  由下式给出:

$$\begin{aligned}
 l &= 3.8 - 0.6 \ln R_p & \text{canshu1} &= 2.3R_p^{-0.17} \\
 \text{canshu2} &= 0.026 - 0.03 \ln R_p & u &= \frac{\ln(\text{canshu1} \cdot e^{\text{canshu2} \cdot l})}{l}
 \end{aligned} \tag{3-14}$$

将上式中  $R_p$  用  $R_p'$  代替即可计算中的  $u'$ 、 $\text{canshu1}'$ 、 $\text{canshu2}'$  及  $l'$ 。  
第 4 步：倾斜路径校正：

$$A_s = \frac{L_s A(L)}{L} \tag{3-15}$$

其中  $L_s$  由下式给出：

$$L_s = \begin{cases} L / \cos \theta & \theta \geq 10^\circ \\ \frac{\sqrt{(R_e + L_0)^2 + (R_e + L)^2 - 2(R_e + L_0)(R_e + L) \cos \psi}}{\cos \psi} & \theta < 10^\circ \end{cases} \tag{3-16}$$

第 5 步：

$$p(A \text{ or } A_s) = p(R_p) \tag{3-17}$$

### 3.2.3 UK 模型（英国模式）

英国提出的地空雨衰预报模式<sup>[31,32]</sup>中特征降雨衰减的计算采用了其同时提交的改进特征降雨衰减计算模式，其计算思路为直接采用各概率点的降雨率计算降雨衰减，因此不需要不同概率降雨衰减与 0.01% 时间概率降雨衰减转换公式，同时其路径调整因子中只有与降雨特征相关的物理量。它比较了多种路径调整因子方案，最终回归得到了  $p\%$  概率的水平路径调整因子  $r(p)$  和垂直路径调整因子  $\nu(p)$ ，UK 模型计算公式如下：

$$r(p) = \frac{1}{0.875 + 0.0255[R(p)^{0.54} - 1.7]L_G^{0.7}} \tag{3-18}$$

$$\nu(p) = \min\{2, 1.67 + [4.47(h_R - h_S)^{-4.6} - 0.46] \log R(p)\} \tag{3-19}$$

其中，

$$R(p) = \begin{cases} R(p) & R(p) \geq 1 \text{ mm/h} \\ 1 & R(p) < 1 \text{ mm/h} \end{cases} \tag{3-20}$$

其中  $R(p)$  为  $p\%$  时间概率的降雨率， $h_R$ ， $h_S$  分别为雨顶高度和地面站海拔高度 (km)，其物理量含义与中国模式相同，相应的降雨衰减计算公式为：

$$A(p) = \gamma_R(p)L_E(p) = \gamma_R(p)L_S(p)r(p)\nu(p) \quad (3-21)$$

### 3.2.4 China 模型（中国模式）

China 模型是由中国电波传播研究所赵振维和林勒科提出的<sup>[32-34]</sup>，该模式是在 ITU-R 模式的基础上改进得到的，仍采用 ITU-R 模型中由 0.01% 时间概率降雨衰减转换为其它时间概率降雨衰减的思路，主要改进了路径调整因子和不同概率衰减与 0.01% 降雨衰减的换算公式，其改进考虑如下：

1. 基于特征雨衰减  $kR^a$  关系，斜路径的降雨衰减可以由路径上每一点的降雨衰减积分获得：

$$A = \int_0^L \gamma_R dl = \int_0^L kR^a dl \quad (3-22)$$

雨胞的降雨率表达式为：

$$R = R_{\max} \exp(-b|l-L_D|) \quad (3-23)$$

其中假设电波传播路径上仅存在一个指数雨胞分布，如图 3.3 所示。雨胞中的最大降雨率  $R_{\max}$  出现在  $L_D$ 。  $R_0$  观测点处的降雨率，  $L_0$  为电波传播链路的长度，  $b$  是降雨率的指数衰减率。将 (3-23) 代入 (3-22) 中得：

$$\begin{aligned} A &= \int_0^{L_0} kR^a dl = \int_0^{L_0} k(R_{\max} e^{-b|l-L_D|})^a dl \\ &= kR_0^a L_0 \left[ \frac{1}{baL_0} (2e^{bL_D-a} - e^{b(sL_D-L_0)a} - 1) \right] \end{aligned} \quad (3-24)$$

$$\text{其中令 } r = \frac{1}{baL_0} (2e^{bL_D-a} - e^{b(sL_D-L_0)a} - 1)$$

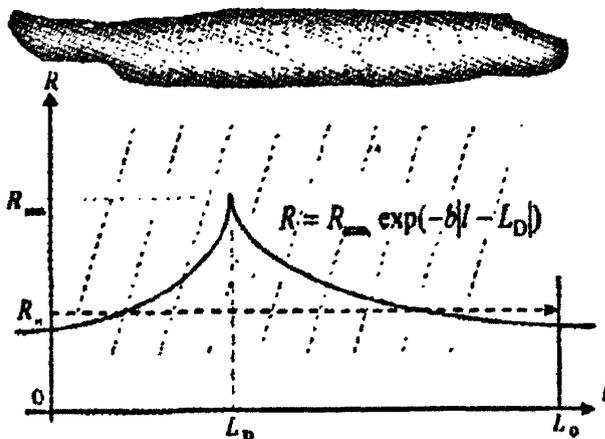


图 3.3 指数雨胞示意图

则  $r$  是路径调整因子，对其进行幂级数展开并开变换<sup>[51]</sup>得：

$$r = \frac{1}{1 + baL_0(e^{-2L_0/L_0} - 0.5)} \quad (3-25)$$

所以 China 模型就是基于以上理论分析, 同时吸取了 ITU-R 模式的部分设计思想, 采用一个新的路径调整因子, 用以代替 ITU-R 模式中的水平缩减因子和垂直调整因子。

2. 为了即使小概率的转换结果取得最小误差, 又要满足大概率时综合衰减的预报性能, 重新设计了不同概率衰减与 0.01% 降雨衰减的换算公式。根据 ITU-R 数据库实验数据, 最终得到路径调整因子公式如下:

$$r_{0.01} = 1 + 0.156L_G^{0.27} R_{0.01}^{0.291} f^{0.329} - 1.75(1 - \exp(-2.34L_G)) \quad (3-26)$$

由 0.01% 时间概率降雨衰减预报其它时间概率降雨衰减的换算公式如下:

$$A_p = A_{0.01} \left( \frac{p}{0.01} \right)^{-[0.528 - 0.0346 \ln(\frac{1+p}{p}) - 0.08 \ln(1 + A_{0.01}) + 0.0454 \ln f + 0.127(1+p) \sin \theta]} \text{ dB} \quad (3-27)$$

由于路径调整因子的改变, 改进模式中的 0.01% 时间概率雨衰公式相应改变为:

$$A_{0.01} = \gamma_R L_s r_{0.01} \quad (3-28)$$

### 3.2.5 ITU-R 模型

ITU-R 降雨衰减预报模式, 是以 Fedi 所提出的模式为基础的<sup>[35]</sup>, 其核心是采用了“等效路径长度”的概念, 即将降雨的非均匀性进行均匀化而引进能起等效作用的缩短因子, 使得缩短了的路径长度乘以单位路径衰减(衰减率)就正好是实际测量的降雨衰减。如今 ITU-R 第三工作会议对地空电路降雨衰减模式进行了重大调整, 既考虑了降雨沿路径的水平变化, 又考虑了降雨沿路径的垂直变化<sup>[43,44,45,46,48]</sup>。ITU-R 雨衰预报模型所需要的参数归结如下:

$R_{0.01}$ : 当地平均年 0.01% 时间概率的降雨率;  $H_s$ : 地面站海拔高度 (km);

$\phi_1$ : 卫星所定点的经度;  $\phi_2$ : 地面站的经度;

$\theta$ : 天线仰角;  $\varphi$ : 地面站纬度;

$f$ : 工作频率 (GHz);  $R_e$ : 地球等效半径 (8500km)。

第 1 步: 计算雨顶高度:

$$h_R(\text{km}) = \begin{cases} 5 - 0.075(\varphi - 23) & \varphi > 23^\circ & \text{北半球} \\ 5 & 0^\circ \leq \varphi \leq 23^\circ & \text{北半球} \\ 5 & 0^\circ \geq \varphi \geq -21^\circ & \text{南半球} \\ 5 + 0.1(\varphi + 21) & -71^\circ \geq \varphi \geq -21^\circ & \text{南半球} \\ 0 & \varphi \leq -71^\circ & \end{cases} \quad (3-29)$$

第 2 步：计算雨顶下斜路径长度，如图 3.4 所示：

$$L_s(\text{km}) = \begin{cases} \frac{h_R - h_s}{\sin \theta} & \theta \geq 5^\circ \\ \frac{2(h_R - h_s)}{(\sin^2 \theta + \frac{2(h_R - h_s)}{R_e})^{1/2} + \sin \theta} & \theta \leq 5^\circ \end{cases} \quad (3-30)$$

第 3 步：计算斜路径的水平投影：

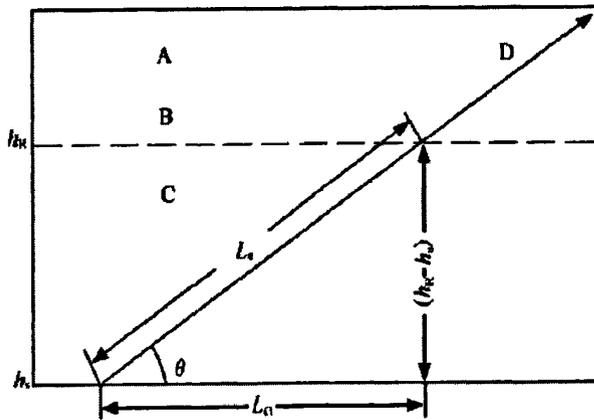
$$L_G = L_s \cos \theta \quad (3-31)$$

第 4 步：获得平均一年超过 0.01% 的降雨率  $R_{0.01}$ ，计算 0.01% 时间概率点降雨率的特征衰减：

$$\gamma_R = k(R_{0.01})^\alpha \quad (\text{dB/km}) \quad (3-32)$$

第 5 步：计算 0.01% 时间概率的水平缩短因子

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + 0.78 \sqrt{\frac{L_G \gamma_R}{f} - 0.38(1 - e^{-2L_G})}} \quad (3-33)$$



A: 冻降水; B: 雨高度; C: 液态降水; D: 地-空路径

图 3.4 地空斜路径降雨衰减计算示意图

第 6 步：计算 0.01% 时间概率的垂直因子

$$\xi = \tan^{-1} \left( \frac{h_R - h_s}{L_G r_{0.01}} \right) \quad (\text{degree}) \quad (3-34)$$

$$L_R = \begin{cases} \frac{L_G r_{0.01}}{\cos \theta} & \xi > \theta \\ \frac{h_R - h_s}{\sin \theta} & \text{else} \end{cases} \quad (\text{km}) \quad (3-35)$$

$$\chi = \begin{cases} 36 - |\varphi| & |\varphi| < 36^\circ \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (\text{degree}) \quad (3-36)$$

最终可得垂直调整因子为:

$$v_{0.01} = \frac{1}{1 + \sqrt{\sin \theta} \left\{ 31 \left[ 1 - e^{-\chi/(1+\chi)} \right] \frac{\sqrt{L_R \gamma_R}}{f} - 0.45 \right\}} \quad (3-37)$$

第 7 步: 计算有效路径长度:

$$L_E = L_R v_{0.01} \quad (\text{km}) \quad (3-38)$$

第 8 步: 计算 0.01% 时间概率降雨衰减:

$$A_{0.01} = \gamma_R L_E \quad (\text{dB}) \quad (3-39)$$

第 9 步: 预测时间概率为 0.001%~10% 的降雨衰减:

如果  $P \geq 1$ , 则  $\beta = 0$ ; 若  $P < 1$ , 则有:

$$\beta = \begin{cases} 0 & |\varphi| \geq 36^\circ \\ -0.005(|\varphi| - 36) & |\varphi| < 36^\circ \text{ 且 } \theta \geq 25^\circ \\ -0.005(|\varphi| - 36) + 1.8 - 4.25 \sin \theta & |\varphi| < 36^\circ \text{ 且 } \theta < 25^\circ \end{cases} \quad (3-40)$$

$p\%$  时间概率的降雨衰减为

$$A_p = A_{0.01} \left( \frac{P}{0.01} \right)^{-1.0655 + 0.033 \ln(P) - 0.045 \ln(A_{0.01}) - \beta(1-P) \sin \theta} \quad (3-41)$$

ITU-R 模式不仅具有较高的预报准确度, 预报方法也符合工程应用习惯, 但同 ITU-R 数据库数据的比较表明, 该模式预报的衰减较实测值平均偏低, 在计算大气综合衰减时, 由于该模式趋零缓慢, 当时间概率较大时, 雨致衰减仍占据综合衰减的主要部分, 明显与实际情况不符合。事实上, 存在一个有雨概率, 当时间概率大于有雨概率时, 不存在雨致衰减现象。当时间概率慢慢增大以致接近有雨概率时, 雨致衰减将快速趋零。此外, 该预报模式采用了 ITU-R 雨顶高度模式、降雨衰减率预报模式、降雨率分布模式, 因此相应模式的改进对该模式的预报精度有一定影响。最后, 建议中也说明该模式是长期降雨衰减的统计, 有可能因为降雨的年际变化而造成较大的预报误差。

### 3.2.6 模式比较及结果分析

按 ITU-R P.311-11 建议进行误差分析, 该建议采用预报的衰减与测量的衰减之比的对数作检验变量, 其误差计算公式为:

$$\varepsilon = \begin{cases} 100 \cdot \left(\frac{A_m}{10}\right)^{0.2} \cdot \ln\left(\frac{A_m}{A_p}\right) & 0 < A_m < 10\text{dB} \\ 100 \cdot \ln\left(\frac{A_m}{A_p}\right) & A_m \geq 10\text{dB} \end{cases} \quad (3-42)$$

式中  $A_m$  表示测量值,  $A_p$  表示预测值。在测量降雨衰减小于 10dB 时, 公式(3-42)中有一个补偿修正因子  $\left(\frac{A_m}{10}\right)^{0.2}$ , 它是为了补偿较低的测量衰减值的精确性以及降雨衰减之外的损耗(如闪烁衰落, 云衰减等)而引进的。该建议推荐选取 9 个概率点(百分比时间: 0.001, 0.002, 0.003, 0.005, 0.01, 0.02, 0.03, 0.05, 0.1)进行比较, 同时考虑全年因素, 即如果测试数据是两年累积结果, 按两组数据计算, 全年数为 2。通过这种检验, 可以得到各种模式不同时间百分数上的平均误差及均方根误差等。通过比较, 均方根误差最小的预报模式, 认为其预报精度最高, 如表 3.1 示。根据以上法则, 计算了两种改进模式的预测误差, 并与 ITU-R P.618-8 的预报模式进行比较, 9 个概率点总的误差结果见表 3.2 所示。在计算过程中, 由于英国模式采用的降雨数据不同, 为确保个模式比较的数据点相同, 要求采用的数据组中有 0.01% 的降雨率统计数据, 同时存在相同概率  $p$  的降雨率数据与降雨衰减测量数据<sup>[36-38]</sup>。

由图 3.5 的比较结果可以看出, 中国模式较 ITU-R 模式和英国模式具有更好的预测精度。

表 3.1 衰减预报误差比较

预测模型	均值 (Mean)	均方根 (RMS)	标准偏差 (STD)	全年
ITU-R P. 618-8	10.39	27.67	25.64	59.99
中国改进模式	-0.24	27.24	27.24	59.99
英国改进模式	-17.05	33.53	28.87	59.99

表 3.2 衰减预报误差具体时间概率点比较

时间百分比	RMS (%)			权年
	ITU-R P.618-8	UK 模式	中国模式	
0.001	31.60	29.58	31.64	170.25
0.002	29.64	29.26	28.34	198.89
0.003	28.78	28.39	27.29	211.89
0.005	27.09	27.51	26.08	228.83
0.01	26.36	25.86	25.93	290.53
0.02	25.19	25.58	24.68	290.32
0.03	24.00	27.78	24.09	297.70
0.05	24.42	28.51	24.73	302.69
0.1	26.97	30.94	27.24	321.51
0.2	30.27	33.07	26.29	280.16
0.3	34.29	37.55	27.81	243.51
0.5	38.26	43.63	28.54	195.04
1	45.02	50.34	33.40	180.18
综合	29.81	32.10	27.07	247.04

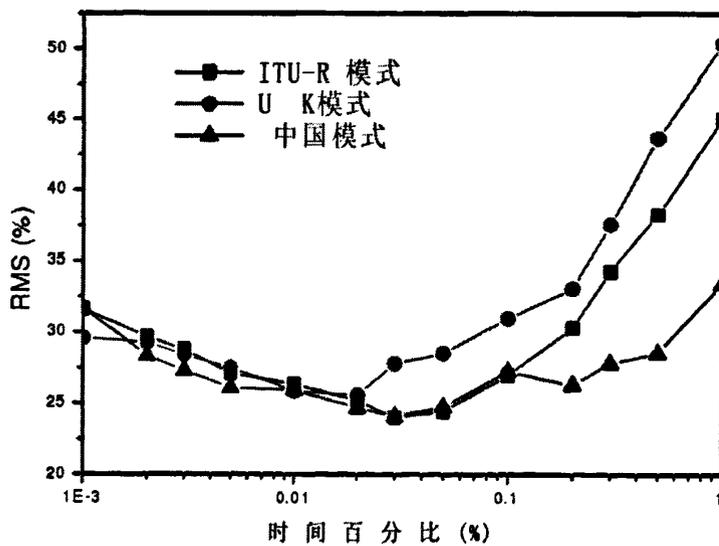


图 3.5 三种模式降雨衰减预报误差比较

### 3.3 降雨特征衰减参数修正

降雨是影响工作在 10GHz 以上频段的无线电系统性能的主要因素，降雨不仅引起信号衰减、去极化，降雨的散射还可以引起不同系统间的干扰。因此，研究降雨对电波在地一空传输中的衰减对于 Ka 频段卫星通信系统的总体设计具有极其重要的意义。

特征衰减（也称衰减率）的计算，在均匀降雨的条件下，是十分简单的。但是在大多数实际的情况下，降雨在时间和空间上一般是不均匀的，降雨的非均匀性使得精确地计算雨衰就大大的复杂化了。而且又因为雨媒质的非均匀性还具有随机性，从而使问题进一步复杂化。因此，在寻找和建立精确计算降雨衰减的模式时，从物理角度而言，关键的问题是要对雨媒质的结构进行精确的数学描述，这是许多学者们感兴趣的问题；从工程的角度而言，则是寻求雨媒质的非均匀结构采取某种等效的简单方法来描述，并在实验基础上建立起方便而且实用的经验公式。而 ITU-R(国际电信联盟)提供的降雨衰减预报模式则是典型的经验公式，它具有使用简单，输入参数少，应用范围比较广泛等特点。

#### 3.3.1 特征衰减计算参数修正方法

降雨特征衰减的计算模型参考 2.3.2.2 节内容。

为了根据测量结果和理论分析结果得到修正后的参数，将(2-28)两边分别取对数得到

$$\log(\gamma) = \log(a_r) + b_r \log(R) \quad (3-43)$$

所以新变量为线性关系，其中  $R$  为测量统计降雨率变量， $\gamma$  为测量或者介电常数计算统计得到的特征衰减率，所以  $b_r$  为拟合直线的斜率， $a_r$  可由下式计算

$$a_r = 10^{a_{r0}} \quad (3-44)$$

(3-44)中  $a_{r0}$  表示拟合直线的截距。图 3.6 是对 ITU-R 给出的 35GHz 参数的验证结果

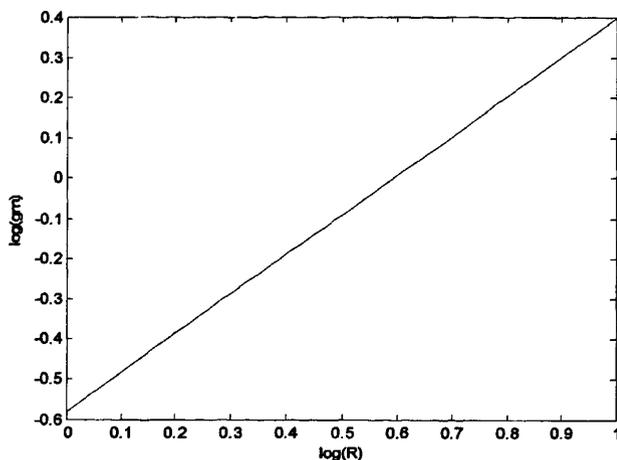


图 3.6 检验修正参数算法

其中

$$\log(R) = [0 \quad 0.3010 \quad 0.4771 \quad 0.6021 \quad \dots \quad 0.9031 \quad 0.9542 \quad 1.0000]$$

$$\log(\gamma) = [-0.5800 \quad -0.2853 \quad -0.1129 \quad \dots \quad 0.3041 \quad 0.3542 \quad 0.3990]$$

所以截距为

$$a_{r,0} = -0.5800 \quad (3-45)$$

可以得到

$$a_h = 10^{(-0.5800)} = 0.2630 \quad (3-46)$$

$$b_h = \frac{-0.2853 - (-0.5800)}{0.3010} = 0.9791 \quad (3-47)$$

计算结果与 ITU-R 给出的结果一致。

雨、雪、沙尘暴等恶劣气象环境发生时，实际是雨滴、冰雹、雪花以及沙尘粒子按照一定的谱分布弥散在空气中，形成一种宏观近似均匀的随机混合物介质，其等效介电常数表示为<sup>[2,39]</sup>

$$\begin{aligned} \epsilon_{eff-i} = & \epsilon_0 + \int_{D_{min}}^{D_y} N(D) 4\pi \frac{\epsilon_0(\epsilon_w - \epsilon_0)}{\epsilon_w + 2\epsilon_0} \left(\frac{D}{2}\right)^3 \frac{3\epsilon_0}{3\epsilon_0 - 4\pi \frac{\epsilon_0(\epsilon_w - \epsilon_0)}{\epsilon_w - 2\epsilon_0} \left(\frac{D}{2}\right)^3} dD \\ & + \int_{D_y}^{D_{max}} N(D_e) \frac{4\pi}{3} \frac{\epsilon_0(\epsilon_w - \epsilon_0)}{\epsilon_w + L_i(\epsilon_w - \epsilon_0)} \left(\frac{D_e}{2}\right)^3 \frac{\epsilon_0}{\epsilon_0 - L_i \frac{4\pi}{3} \frac{\epsilon_0(\epsilon_w - \epsilon_0)}{\epsilon_w + L_i(\epsilon_w - \epsilon_0)} \left(\frac{D_e}{2}\right)^3} dD_e \end{aligned} \quad (3-48)$$

利用等效介电常数计算传输特征衰减(衰减率)的公式为<sup>[2,59]</sup>

$$\gamma_{eff-medium-i} = \frac{20 \times 10^3 \pi f(\text{Hz}) \sqrt{\mu_0}}{\ln(10) \sqrt{\epsilon_0}} (-\text{Im}(\epsilon_{eff-i})) \quad (\text{dB/km}) \quad (3-49)$$

利用在西安地区测得的雨滴谱代入(3-48)和式(3-49)计算得到的垂直极化和水平极化降雨衰减率和对应的降雨率作为(3-43)式的变量,利用前面的理论即可求得  $a_h$ 、 $a_v$  和  $b_h$ 、 $b_v$ 。

### 3.3.2 特征衰减计算参数修正结果

利用等效介电常数和雨滴谱仪测量数据计算抽取降雨率的衰减率代入式(3-43)和(3-45),计算对应斜率和截距,用来修正频率 20~50GHz 的特征衰减参数。使用 2009 年底到 2010 年底的小、中、大雨采集到的数据修正特征衰减参数,并与 ITU-R 推荐参数进行比较,如表 3.3 所示:

表 3.3 西安地区参数结果及 ITU-R 推荐参数比较

F (GHz)	$a_h$		$b_h$		$a_v$		$b_v$	
	Xi'an	ITU-R	Xi'an	ITU-R	Xi'an	ITU-R	Xi'an	ITU-R
20	0.1436	0.0751	0.8517	1.099	0.1396	0.0691	0.8300	1.065
25	0.1995	0.1240	0.8200	1.061	0.1778	0.113	0.8000	1.003
30	0.2672	0.1870	0.7833	1.020	0.2521	0.167	0.7780	1.000
35	0.3890	0.2630	0.7767	0.979	0.3846	0.233	0.7685	0.963
40	0.4898	0.3500	0.7654	0.939	0.4786	0.31	0.7619	0.929
45	0.5623	0.4420	0.7576	0.903	0.5495	0.393	0.7429	0.897
50	0.6607	0.5360	0.7200	0.873	0.6457	0.479	0.7037	0.868

表 3.3 中分别列出了 20GHz-50GHz 对应的参数,其中“Xi'an”代表根据西安地区雨滴谱计算得到的参数,“ITU-R”代表 ITU-R 推荐参数。可以看出西安地区的参数与 ITU-R 推荐的参数计算相同降雨率的降雨衰减率差别较大,而且随着频率和降雨率的增加差别越来越大,50GHz 的信号在降雨率为 50mm/h 是特征衰减率差异可达到约 6dB,25mm/h 降雨率时特征衰减率差别可达 3dB。可以说明用 ITU-R 推荐的参数计算其它地区的降雨衰减误差不可忽略,为了更好地评估降雨衰减特性,非常有必要根据当地降雨特征进行参数修正。

## 3.4 小结

本章对雨衰进行了简单的介绍,总结了国际上流行的 5 种降雨衰减预报模型(Assis-Einloft Improved 模型, Crane Global 模型, UK 模型、China 模型和 ITU-R 模型)及其特点、相关参数和计算步骤,并对其中三种模型进行了比较。详细阐述了特征衰减参数修正的方法和结果,使用西安的降雨数据对特征参数进行修正,使之更好地评估降雨衰减特性。

国内实测数据的缺乏严重影响了对模型及参数的修正情况，因此急需获得大量的实测降雨的数据，西安地区实测降雨数据通过 Ka 频段雨衰测量系统获得，测量系统的具体情况见下一章，对测量系统给出的数据进行合适的数据处理和数据分析，依据处理后的数据对特征参数和模型就行修正。



## 第四章 Ka 频段雨衰测量系统

我国 Ka 频段的衰减实测参数较少,特别是长期连续观测数据缺乏,实验的重点是获取大量的雨衰测量样本,以及连续测量数据,在长期连续的降雨实测数据的获取过程中,分钟降雨率也是 Ka 波段降雨衰减预测研究必不可少的基础性数据。所以, Ka 频段雨衰测量系统首先就是要获取长期连续的降雨数据,我国的气象部门只能提供 10 分钟或 1 小时降雨率,而雨衰的计算和预测需要一分钟降雨。本课题中的降雨参数主要通过激光雨滴谱仪和衰减测量系统进行测量,通过它可以获得实验场地实时的 1 分钟降雨率数据。且 1 分钟的测量时间能够在 1 年得有限时间内获取大量的衰减数据样本。

Ka 频段的衰减不仅包括降雨衰减,还包括晴空大气时的闪烁和散射等衰减,为了能够准确统计降雨衰减量,需要计算晴空大气时的衰减量,就需要我们记录晴空时的温度、湿度、露点等环境参数,进一步计算出大气衰减的统计值。

Ka 频段雨衰测量系统分为两个子系统:降雨物理特征测量系统和衰减特性测量系统。降雨物理特性测量系统通过激光雨滴谱仪来记录实时的降雨率,用于进行不同降雨率下的谱分析;衰减特性测量系统记录电磁波信号从发射机到接收机之间的变化情况,通过接受电平值来计算雨衰。

我们的 Ka 频段衰减实验需要统计整个实验期间的 Ka 信号衰减量,以及引起 Ka 频段信号衰减的变化量,所以有必要设计一套自动化记录系统,对整个衰减实验期间的数据进行记录,在完成了数据采集之后,需要通过无人值守计算机上的软件,完成对 Ka 波段数字接收机、环境参数采集模块的控制,数据跟踪记录,数据初步处理,参数设置,并对实时数据和历史数据按照设置的条件进行绘图显示,在完成了降雨数据和 Ka 波段衰减数据采集及记录之后,我们将计算出对应的雨衰值,并与我们得到的 Ka 频段的理论衰减值进行比较,验证实验测量系统和衰减计算的正确性。

### 4.1 降雨物理特征测量系统

#### 4.1.1 系统结构

降雨物理特征参数测量系统,如图 4.1.所示:采用一台德国 OTT 公司生产的 Parsivel 型激光粒子滴谱仪(雨滴谱仪)对降雨参数进行精确测量,包括实时的雨滴谱、降水量、1 分钟降雨率、降雪量等。再配合温湿度传感器对环境参数进行实

时测量。

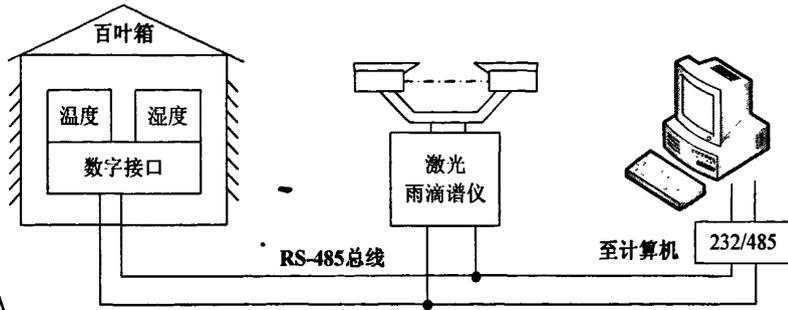
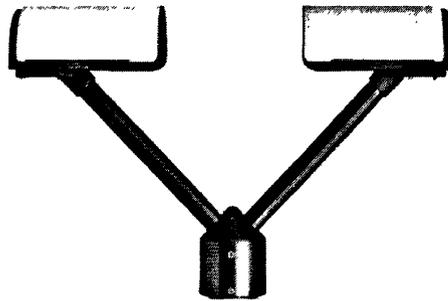


图 4.1 气象参数测量系统

降雨物理特性测量系统采用的是德国 OTT 公司的 Parsivel 激光降水粒子谱仪（如图 4.2 所示），它通过 485 总线转接后连接到无人值守计算机上，通过配套的软件 ASDO 进行参数设置，完成降雨相关数据的自动记录和处理。系统组成主要包括硬件激光雨滴谱仪和配套的软件。



OTT Parsivel® - Enhanced Precipitation Identification Sensor

图 4.2 Parsivel 雨滴谱仪

Parsivel 粒子滴谱分析仪是一种采用现代激光技术的光学遥测系统，它可以测量各种类型的降水，包括毛毛雨、雨、雨夹雪、冰雹、雪和混合降水。数据获取和存储是通过一个快速的数字化信号处理器完成的。测量的基本参数为粒径和速度，由此可以推导出粒径分布、降水量、能见度、降水动能和降水类型等；还可对天气雷达进行校准，实现复杂的降水过程分析，分析监测点的降水影响，建立高性能的洪水早期预警系统。Parsivel 的主要技术指标见表 4.1。

表 4.1 Parsivel 雨滴谱仪的主要技术指标

激光器件	激光二极管
中心波长 /mm	650
输出功率 /mW	3
采样区域尺寸 W ×D/mm	180 ×30
采样区域面积 /cm <sup>2</sup>	54
降水强度测量范围 /(mm/h)	0.001~1200
粒子尺度测量范围 /mm	0.2~25
粒子落速测量范围 /(m/s)	0.2~20
降水时能见度测量范围 /m	100~5000
系统工作电压 /V	DC 10~30
信号传输方式	RS-485
计算显示软件	ASDO V1.1
粒子尺度分级	32 size classes
粒子下落速度分级	32 velocity classes

#### 4.1.2 系统工作原理

Parsivel 雨滴谱仪使用激光散射进行降水与雾的测量，它的传感器由发射机、接收机和控制、运算、存储等电路部分组成。所产生的高稳定度水平平行激光束和稳定的接受光电阵列是传感器的核心部件；高速运算和数据存储是测量的基础；高速响应光学接收光电阵列传感器把遮蔽物图像转化成电子信号，通过即时测量每一个遮挡物的宽度和通过时间来计算降水粒子的尺度和速度，如图 4.3 所示。图 4.3 (A) 是传感器的发送单元产生一束扁平的、和地面水平的激光，接收单元可以及其转换为电信号；图 4.3 (B) 是当一个水汽凝结粒子从激光束的可测范围内降落时，信号的幅值在一定的时间段内会有明显改变，且延续一段时间；从图 4.3 (C) 中可以看出，信号衰减的程度可以表征出水汽凝结粒子的大小，持续的时间可以计算出粒子的速度<sup>[45]</sup>。

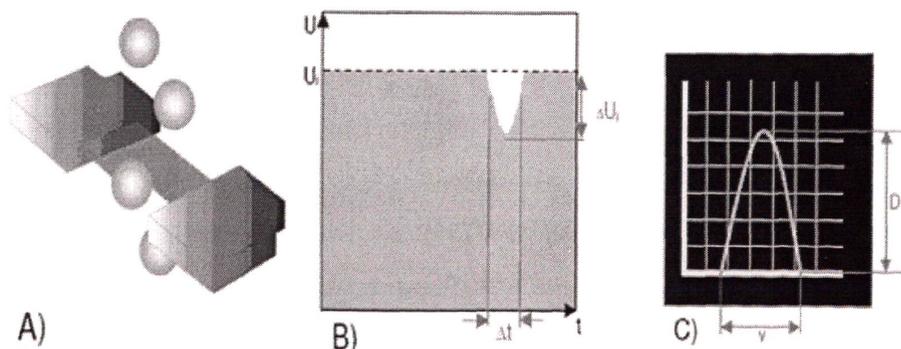


图 4.3 Parsivel 雨滴谱仪的工作原理示意图

降雨特征测量数据是通过 Parsivel 雨滴谱仪配套的软件 ASDO 获得, 其计算统计显示软件的界面如图 4.4 所示。Parsivel 雨滴谱仪可以快速运算记录每一个降水粒子的尺度和速度, 并通过一台装有配套软件 ASDO 的电脑对降水粒子谱进行分析统计, 将结果以图表数据形式进行显示, 进而得出累积参数。同时 ASDO 还能够对室外传感器进行实时监控, 包括激光光束信号强度、环境温度、电源状况、加热电流甚至镜头污染需要维护等信息<sup>[46]</sup>。

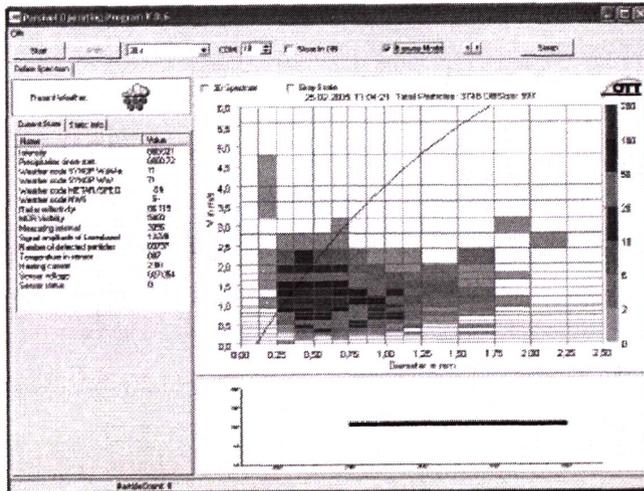


图 4.4 ASDO 计算统计显示软件的界面

ASDO 有两种显示模式: 在线模式用于采集室外传感器数据, 离线模式用于历史数据回放, 两者都能用二维或三维图形表示粒子尺度谱与速度谱分布。在线模式下能够将传感器数据记录并传到电脑上, 数据采集时间间隔可以人为设定, 最短采样周期为 10s, 最长为 2h, 然后保存在数据库中。离线模式下可以回放历史数据, 可同时显示降水粒子尺度谱、速度谱; 同时可显示降水粒子分类, 并且自动生成天气现象代码、气候代码和航空气象代码, 实现自动识别天气现象。另外还能够以数字形式显示瞬时降水强度、粒子总数以及累积降水量, 可代替雨量筒和翻斗式雨量计, 通过粒子谱可以计算降水时的能见度和雷达反射因子。

ASDO 保存数据格式以  $32 \times 32$  顺序排列 1024 个数据形式, 如果需要按照常规的尺度与浓度柱状图关系排列, 需要对原始数据进行格式变换。先从 Parsivel 获得的二维数据, 每个时间对应的都有 1024 个数据, 横坐标是尺度(mm), 纵坐标是速度(m/s), 然后把各个尺度分档对应的一系列速度数据进行累加, 这样纵坐标就成了质粒数浓度, 与横坐标尺度配合就可以初步画出对应的谱分布, 利用 Excel 可做出柱状谱分布图, 见图 4.5。

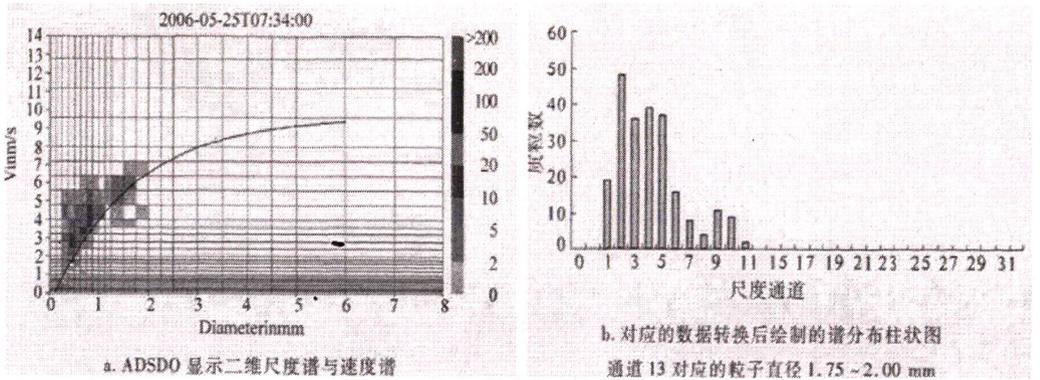


图 4.5 典型的降雨雨滴谱分布

Parsivel 雨滴谱仪记录的测量数据可以分为三类：

1. 降水滴谱：测量各种类型的降水，包括毛毛雨、雨、雨夹雪、冰雹、雪和混合降水。

2. 气象信息：当前的天气和降水类型（雨、小雨、雪、冰雹和雨夹雪）可以根据 WMO 建立的天气代码进行区分。无论在何种天气状况下，Parsivel 都可以确定水气凝结体的类型、数量和组成。

3. 雾与能见度：Parsivel 通过测量空气中的雾粒子的种类、大小、速度指标可以确定当前大气能见度状况，可以应用在交通领域用以预防和避交通事故以及改善交通状况<sup>[23]</sup>。

Parsivel 降水粒子谱仪测量的数据共有 32 个尺度测量通道和 32 个速度测量通道。其中粒子尺度测量 32 个通道对应的数据范围为 0.2~25mm，粒子速度测量通道数据范围对应着 0.2~20m/s，见表 4.2。每一次采样间隔内的粒子谱测量数据都有  $32 \times 32 = 1024$  个。

表 4.2 粒径和速度区间

通道号	直径/mm	直径间隔/mm	速度/m/s	速度间隔/m/s
1	0.062	0.125	0.05	0.1
2	0.187	0.125	0.15	0.1
3	0.312	0.125	0.25	0.1
4	0.437	0.125	0.35	0.1
5	0.562	0.125	0.45	0.1
6	0.687	0.125	0.55	0.1
7	0.812	0.125	0.65	0.1
8	0.937	0.125	0.75	0.1
9	1.062	0.125	0.85	0.1
10	1.187	0.125	0.95	0.1

11	1.375	0.25	1.1	0.2
12	1.625	0.25	1.3	0.2
13	1.875	0.25	1.5	0.2
14	2.125	0.25	1.7	0.2
15	2.375	0.25	1.9	0.2
16	2.75	0.5	2.2	0.4
17	3.25	0.5	2.6	0.4
18	3.75	0.5	3	0.4
19	4.25	0.5	3.4	0.4
20	4.75	0.5	3.8	0.4
21	5.5	1	4.4	0.8
22	6.5	1	5.2	0.8
23	7.5	1	6	0.8
24	8.5	1	6.8	0.8
25	9.5	1	7.6	0.8
26	11	2	8.8	1.6
27	13	2	10.4	1.6
28	15	2	12	1.6
29	17	2	13.6	1.6
30	19	2	15.2	1.6
31	21.5	3	17.6	3.2
32	24.5	3	20.8	3.2

#### 4.1.3 雨滴谱数据解析

降雨物理特性测量系统数据记录存成两份文件，第一份为粒子谱测量数据，用于研究不同降雨率下的谱分析；第二份为实时记录 1 分钟降雨物理特性的 TXT 文档，为雨衰的计算提供降雨率数据。

雨滴谱仪可以实时(1 分钟累积记录一次)记录降雨物理特性，包括降雨率、雨滴谱、粒子降落速度等，测量和分析系统主要处理雨滴谱和降雨率。该实验测量系统的输出结果是 TXT 格式。雨滴谱仪的工作原理是只有当雨滴谱仪的探测面检测到雨滴时才记录数据，采样周期设置为 60s，所以文档包含了该降雨期间每一分钟的数据。记录粒子谱测量数据的 TXT 文档如图 4.6 所示，文件只记录降雨时刻的各粒子的情况。

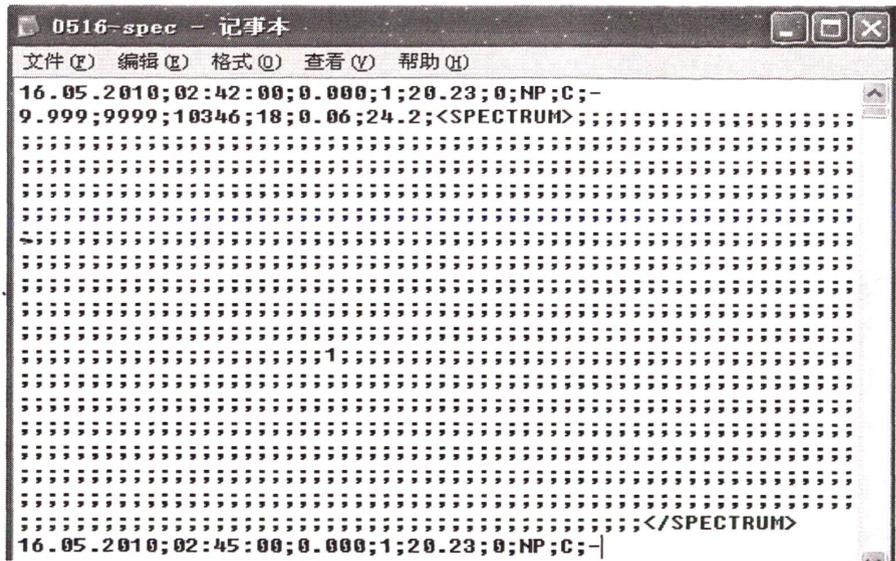


图 4.6 雨滴谱仪记录的 TXT 文件

图 4.6 中每一段记录的是降雨的每一分钟不同直径不同速度下的粒子数。

每一分钟的数据包括两部分：

- 1) 头文件：Date、Time、Intensity (mm/h)、Number of Detected particles、Precipitation since start (mm)、Weather code SYNOP WaWa、Weather code METAR/SPECI、Weather code NWS、Rader reflectivity (dBz)、MOR Visibility (m)、Signal amplitude of Laserband、Temperrature(℃)、Heating current(A)、Sensor voltage (V)。

Intensity: 降雨强度，每小时的降雨量，用来衡量降雨的大小，雨滴谱仪记录数据的形式 0000.000，单位是 mm/h。德国 OTT 公司的 Parsivel 激光降水粒子谱仪测量范围是 0.001-1200m/h。

将 TXT 文档直接导入 EXCEL 文件中，如图 4.7 所示，从文件中提取出降雨率数据可以直接用于计算衰减的过程中。

A1	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
	Date	Time	Intensity	Precipitation since start	Weather code SYNOP	Weather code METAR	Weather code NWS	Radar reflectivity	MOR Visibility	Signal amplitude
2	09.02.2010	0:00:00	0	0	0 NP	C	-9.999	9999	1	
3	09.02.2010	0:01:00	0	0	0 NP	C	-9.999	9999	1	
4	09.02.2010	0:02:00	0	0	0 NP	C	-9.999	9999	1	
5	09.02.2010	0:03:00	0	0	0 NP	C	-9.999	9999	1	
6	09.02.2010	0:04:00	0	0	0 NP	C	-9.999	9999	1	
7	09.02.2010	0:05:00	0	0	0 NP	C	-9.999	9999	1	
8	09.02.2010	0:06:00	0	0	0 NP	C	-9.999	9999	1	
9	09.02.2010	0:07:00	0	0	0 NP	C	-9.999	9999	1	
10	09.02.2010	0:08:00	0	0	0 NP	C	-9.999	9999	1	
11	09.02.2010	0:09:00	0	0	0 NP	C	-9.999	9999	1	
12	09.02.2010	0:10:00	0	0	0 NP	C	-9.999	9999	1	
13	09.02.2010	0:11:00	0	0	0 NP	C	-9.999	9999	1	
14	09.02.2010	0:12:00	0	0	0 NP	C	-9.999	9999	1	
15	09.02.2010	0:13:00	0	0	0 NP	C	-9.999	9999	1	
16	09.02.2010	0:14:00	0	0	0 NP	C	-9.999	9999	1	
17	09.02.2010	0:15:00	0	0	0 NP	C	-9.999	9999	1	
18	09.02.2010	0:16:00	0	0	0 NP	C	-9.999	9999	1	
19	09.02.2010	0:17:00	0	0	0 NP	C	-9.999	9999	1	
20	09.02.2010	0:18:00	0	0	0 NP	C	-9.999	9999	1	
21	09.02.2010	0:19:00	0	0	0 NP	C	-9.999	9999	1	
22	09.02.2010	0:20:00	0	0	0 NP	C	-9.999	9999	1	
23	09.02.2010	0:21:00	0	0	0 NP	C	-9.999	9999	1	
24	09.02.2010	0:22:00	0	0	0 NP	C	-9.999	9999	1	
25	09.02.2010	0:23:00	0	0	0 NP	C	-9.999	9999	1	
26	09.02.2010	0:24:00	0	0	0 NP	C	-9.999	9999	1	
27	09.02.2010	0:25:00	0	0	0 NP	C	-9.999	9999	1	
28	09.02.2010	0:26:00	0	0	0 NP	C	-9.999	9999	1	
29	09.02.2010	0:27:00	0	0	0 NP	C	-9.999	9999	1	
30	09.02.2010	0:28:00	0	0	0 NP	C	-9.999	9999	1	
31	09.02.2010	0:29:00	0	0	0 NP	C	-9.999	9999	1	

图 4.7 转化以后的 xls 文件

2) 两个<SPECTRUM>之间的分号和数字。

它们代表雨滴谱仪记录的 1024 个数据。雨滴谱仪包括 32 个直径通道（对应的粒径范围是 0.2~25mm），32 个速度通道（对应的速度范围是 0.2~20m/s），所以 1024 个数据是由 32×32 矩阵组成，每行对应一个速度通道，每列对应一个直径通道，见表 4.2。

统计出统一直径下不同速度的粒子数，得到激光探测面平面（54 cm<sup>2</sup>）上的所有粒子数目。雨滴谱定义为单位直径间隔内（mm）单位体积（m<sup>3</sup>）中所有雨滴的个数（粒子浓度谱），但是雨滴谱仪 Parsivel 的直径间隔分布不均匀（V-D 谱，并非粒子浓度谱），且根据图 4.5 计算得到的粒子数  $N_1(D)$  不是单位体积内的粒子数，而是 60s 时间内所有落在激光可探测平面（54 cm<sup>2</sup>）上的所有粒子数目，所以需要引入两个转化因子  $\lambda$  和  $\zeta$ ，设  $v$  是直径为  $D$  的粒子末速度，则通过单位距离 1m 的所需时间为：

$$t = \frac{1}{v} \quad (4-1)$$

所以  $\lambda$  可以表示为

$$\lambda = \frac{10^4}{60 \times 54 \times v} \quad (4-2)$$

另外，设雨滴谱仪记录数据直径间隔为  $d$ ，则  $\zeta$  可以表示为

$$\zeta = \frac{1}{d} \quad (4-3)$$

所以根据表 4.2 参数和式(4-3)， $\zeta$  表示为

$$\zeta = \begin{bmatrix} 8 & 8 & 8 & 8 & 8 & 8 & 8 & 8 & 8 & 8 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 2 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.33 & 0.33 \end{bmatrix} \quad (4-4)$$

设雨滴谱仪一分钟记录的给定直径的粒子数为  $N_1(D)$ ，则单位体积里的粒子数  $N_2(D)$  为：

$$N_2(D) = N_1(D)\lambda \quad (4-5)$$

则单位体积单位粒径间隔内的粒子数  $N_3(D)$  为：

$$N_3(D) = N_2(D) \times \zeta \quad (4-6)$$

提取所有数据库中降雨为  $X \pm 0.02$  ( $X$  是降雨率) 降雨率为一族，然后将各降

雨率对应的雨滴谱处理结果取平均, 近似认为是 X 降雨的雨滴谱特征。实验中我们考虑小雨, 中雨等情况, 挑选几个具有代表性的降雨率: 1.5mm/h, 5mm/h, 7.6mm/h, 10.2mm/h (毛毛雨、小雨、中雨、大雨) 做为对象, 分析和绘制谱分布。

根据 2010 年 1 月~2010 年 12 月的记录数据, 利用上面介绍的处理数据方法即可得到西安地区雨滴谱分布结果和表 4.3 的结果。

表 4.3 降雨物理特性参量平均值

降雨率 (mm/h)	1.5	5	7.6	10.2
Dmax (mm)	2.125	4.75	7.5	6.5
Dmin (mm)	0.187	0.187	0.187	0.187
Nmax (m-3)	512.59	330.99	521.2	369.58
Nmin (m-3)	0.3026	0.2518	0.1978	0.0989
N1/N	0.9999	0.9908	0.9612	0.9851
N2/N	0.9226	0.7958	0.6829	0.6585

注: N1、N2 分别表示雨滴直径小于 2mm 和 1mm 的粒子个数, N 表示总的粒子个数

从表 4.3 中可以看出, 随着降雨率的增大, 雨滴的最大直径也在增大, 但当降雨率大于 7.6mm 时, 最大直径反而减小, 这是因为当雨滴直径大于 8mm 时是不稳定的, 将发生破裂; 降雨率  $R=1.5\text{mm}$  时雨滴直径小于 1mm 占 92.6%,  $R=10.2$  时, 雨滴直径小于 1mm 的占 65.85%, 由此可知, 随着降雨率的增大, 小雨滴对降雨的贡献越来越小。由于这些参量的不同, 必然造成谱型的不同。

## 4.2 衰减特性测量系统

### 4.2.1 系统结构

由于我国目前可用的 Ka 中继卫星的信标信号余量较小, 在大雨时会因衰减无法跟踪接收, 因此采用地面试验的方法进行。地面试验可以精确地修正衰减率, 再利用等效路径和修正后的路径伸缩因子推算地空链路衰减。

Ka 频段传播衰减测量子系统包括两个主要功能: 1. 地面 Ka 频段通信衰减测量; 2. 环境参数测量。其中地面 Ka 频段通信衰减测量主要由发射机、接收机、下变频器以及数字化接收机完成。环境参数测量主要由温湿度传感器完成。通过计算机 (无人值守记录系统) 对环境参数及 Ka 频段雨衰特性进行一年的连续测量, 获取实验统计数据。Ka 频段传播衰减测量系统如图 4.8 所示

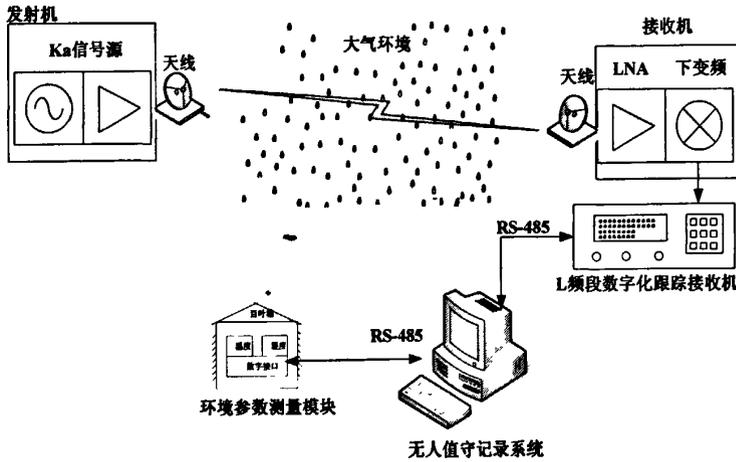


图 4.8 Ka 频段传播衰减测量系统

地面 Ka 频段通信衰减测量模块的收发机分别位于两座相 1050m 的楼顶上，高度差约 10 米左右，从而构成低仰角，以及 1km 左右的雨区路径。在卫星地-空链路中，只有位于对流层底端 3~5km 的降雨层才对信号造成衰减，实验具有一定的代表性。同时 1000 米以上的距离已经足够保证不会产生近场效应。环境参数测量模块放置在接收机附近（1 米左右），可以实时测量接收端的环境温度、相对湿度。

### 4.2.2 系统工作原理

#### 4.2.2.1 工作原理

Ka 频段衰减特性测量系统主要由发射机和数字化接收机组成，信号从发射机天线出发，经过 1.07km 的距离，在传播过程中会受到大气引起的衰减和降雨引起的衰减，到底接收机天线，由数字化接收机来记录下接收到的电平值。

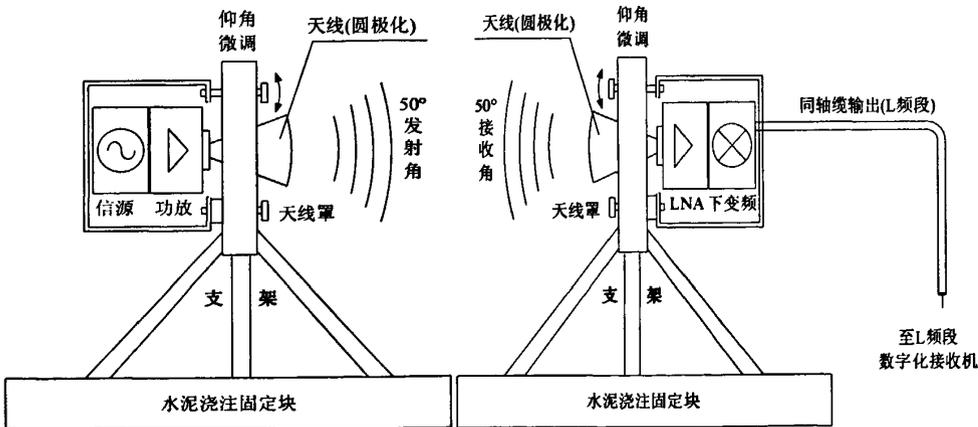


图 4.9a 发射机结构示意图

图 4.9b 接收机结构示意图

如图 4.9a 所示，发射机由一部 35.2GHz 高精度点频源，配接功放及圆极化喇叭

喇叭天线构成, 其中信号源经功放输出 10dBm 的 Ka 频段信号, 通过一只 50mm 口径圆极化喇叭天线定向发射, 能量相对集中。整机体积较小, 便于装入防水外壳中并固定在支架上。支架与发射机的连接处可通过微调装置进行仰角调整, 采用 50° 的宽波束发射和接收, 免去了定位和对准。

如图 4.9b 所示, 接收机由圆极化喇叭口天线、LNA、下变频器构成。接收机采用 10dB 的增益喇叭口天线, 场放和下变频器总增益 -59.6dB 左右, 1km 米衰减 (包括扩散衰减、损耗等) 约 138dB 左右。接收信号经过下变频后变为 L 频段, 可以通过同轴缆传输至位于实验室内的 L 频段数字化接收机, 测量信号电平值并可被计算机读出。

发射总能量  $P_{\text{发}}=10\text{dBm}$  (包括发射功率和发射增益), 接受增益  $G_T=10\text{dB}$ , 场放和下变频总增益  $P_{\text{下变频}}=-59.6\text{B}$ , 1.07km 的衰减  $G_{\text{衰减}}=138\text{dB}$ 。

那么接受功率的最大值  $P_{\text{接受}}=P_{\text{发}}-P_{\text{衰减}}+G_T+G_{\text{下变频}}=-58.4\text{dB}$ 。

选择干燥、无风的晴天, 穿透 1.07km 左右的清空大气, 进行 24 小时的连续测量, 记录接收机的输出信号电平值。结果如图 4.10 所示, 可以得到稳定的接受基准电平, 平均为 -58.4dB, 基准电平浮动不超过  $\pm 1.5\text{dB}$ 。

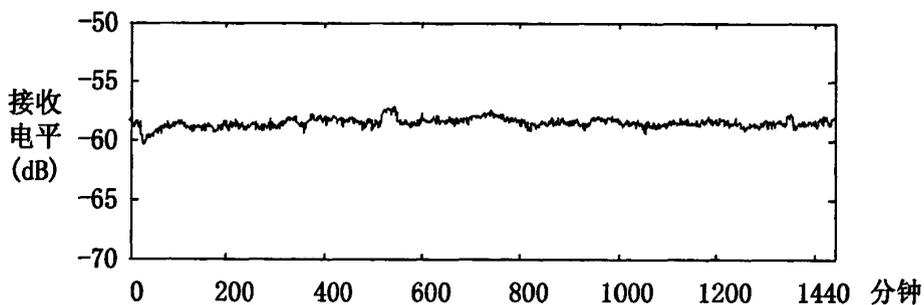


图 4.10 晴天接受频谱

在计算最大接受功率的公式中, 发射增益和接受增益容易受到温度的影响, 通过对发射增益和接受增益进行高低温试验, 测量出温度引起的变化趋势, 再根据实际的温度值进行温差补偿以减少实验误差。场放和下变频增益在系统内部, 容易受到和器件连接处损耗和系统老化的影响; 发射机和接收机之间的信号锁定时才能最大功率的接受信号, 为避免天线角度变化而引起的信号强度的变化, 具体的硬件误差参考硬件系统误差控制方法, 见 4.2.2.2 节。

数字化接收机的接收动态范围 -105dBm ~ -55dBm, 即 50dB 的动态范围。参考 8mm 雷达 (37GHz) 的雨衰数据, 最大可能的暴雨 (100mm/h 降雨量) 在 1000m 距离上产生的衰减约 25dB, 接收机具有足够的动态范围。同时, 4mm/h 的降雨 (小雨) 即可产生 1dB 以上的衰减, 接收机具有足够的精度和分辨率对各类降雨的衰减进行测量, 数字化接收机将 L 波段信号下变频至 70MHz 中频后, 直接进行数字

化采样及通过软件分心接受电平值，分辨率可达 0.1dB，精度优于 1dB。

#### 4.2.2.2 实验误差控制

该测量方案中，导致测量误差主要有两类因素：首先，为了测量大气传播衰减，通信链路中除了传输路径外，各项系统参数若不能保持恒定，将导致误差，即所谓的温差效应。其次，接收机对不同幅度信号的飞行时间也将导致测量误差。

在硬件系统方面，注意以下几项：

1) 信号源、接收机内部各个微波模块之间尽可能采用直接连接，或者采用一节波导，降低插入损耗，同时避免同轴缆随时间老化带来线损的变化。

2) 避免高频信号长距离传输。由于收发机都位于楼顶，其中发射机信源与天线一体，只需电源馈线，不存在额外损耗。接收机将接收信号下变频到 L 频段后再传输，对同轴缆带宽的要求大为降低，同时降低因同轴缆老化、受潮、位置变化带来的信号传输损耗变化。

3) 为避免因为暴风、地质变化等引起天线相对位置的变化而导致的信号强度变化，每周检查一次天线的对准情况。

在后期实验数据误差方面，从温差补偿、数据滤波等方面进行处理，这 4.3.3 节实验数据处理节详细介绍。

### 4.2.3 实验数据记录

#### 4.2.3.1 数据记录

Ka 频段数字接收机挂通过数字处理模块之后，将处理过的 L 波段数据按照设定的频率向写入输出端口，接接收机载在一条 RS485 总线上，通过一个 RS485 转 RS232 的转换模块接到数据监控程序所在的 PC 机上。

数据监控、存储软件 DigitalReceiver 使用 ModBus 工业通信协议与 Ka 频段数字接收机进行通信；使用 GDI+ 技术将采集到数据实时的更新到现实界面上；使用 Access 数据库对数据进行存储，并提供了查看历史数据曲线趋势功能，可以方便用户查看 1 小时~14 天内的数据趋势。

考虑到每秒数据变化量不大和用户界面的更新速率，我们使用每分钟平均后的数据画出实时的数据变化曲线。在画图时我们使用了微软最新的 GDI+ 技术，绘制了坐标空间、各种采集数据的实时变化曲线、历史记录的变化曲线等。

用户主界面如图 4.11。

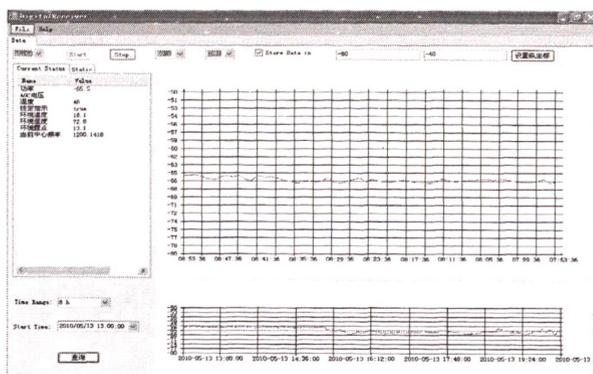


图 4.11 数据监控软件主界面

我们使用了两个数据库 DigitalReceiverPerSecond.mdb 和 DigitalReceiver.mdb 分别存储每秒的原始数据和每分钟平均后的数据。在后期数据处理时，由于原始数据库中记录的每 1 秒的接收功率值，但是实际处理时的时间间隔是 1 分钟，所以要求连续 60 秒内的功率算术平均值，作为某 1 分钟的实测接收功率值。这样处理方法计算简便，可以剔除奇异点，滤除了一部分的随机干扰。首先我们将每秒的数据放入到内存队列和 DigitalReceiverPerSecond.mdb 中；然后，当完成 60 秒的记录之后，对这 60 个数据进行数据平均，获取每分钟的平均后数据；将每分钟的平均值写入 DigitalReceiver.mdb 数据库中。

实验计算用到的数据主要是 1 分钟记录数据，处理过程中以一天的数据为单位，所以存储软件记录的数据分两份保存。一份就是数据库文件 DigitalReceiver.mdb，里面记录了实验系统从正常工作起记录的每一分钟的数据；另一份包含了每天数据记录的文件按，文件以当天的日期单独命名，在数据库文件 DigitalReceiver.mdb 记录的过程中，通过对时间参数进行判断，当完成一整天的实验数据记录是，自动截取出这一天的数据，单独存放起来，以当天的日期命名，这一份数据则以天为单位记录了每天实时的数据，方便后期的数据处理。

使用 Microsoft Access 2003 打开数据库文件 DigitalReceiver.mdb，如图 4.12 所示：

图 4.12 DigitalReceiver.mdb 数据库

### 4.2.3.2 实验数据解析

双击打开数据库文件 DigitalReceiver.mdb, 如图 4.12 所示。

数据库文件 DigitalReceiver.mdb 记录了测量系统从正常工作起的每一分钟的实验数据, 随着时间的积累, 文件记录的数据过于繁多, 不方便后期的数据分析, 在后期的数据处理中, 以一天的数据为单位进行数据处理和分析, 所以通过判断数据库中时间参数, 将一天的数据截取出来完整保存到 Excel 文件中, 在保存数据的过程中, 邻近点相互比较, 剔除奇异点, 滤除一部分的随机干扰。

数据库文件的第一行是 13 个头文件, 依次为: Id, Frequency, Local Frequency, UAGC, AGCCoefficient, Power, Temperature, Lock, Time, EvnTemperature, EvnHumidity, EvnDewPoint, CurrentFrequency。

其中的头文件内容为:

**Id:** 编号, 从系统正常工作起开始记录, 以 1 为起点, 逐步增加。

**Frequency:** 不计入数据监控内, 无数据记录。

**LocalFrequency:** 实验系统工作频率, 单位为 GHz。

**UAGC:** 不计入数据监控内, 无数据记录。

**AGCCoefficient:** 不计入数据监控内, 无数据记录。

**Power:** 接收机的接受功率, 单位为 dBmW。

**Temperature:** 接受机内部温度, 单位为度。

**Lock:** 判断发射机和接受机是否锁定, 只有在锁定情况下实验数据才可作为计算衰减的样本, 如有异常需现场调整发射机和接收机的角度。TURE 表示正常, -1 表示异常。

**Time:** 记录数据的具体时间, 数据形式是 0000-00-00 00:00。

**EvnTemperature:** 表征环境冷热程度的物理量, 这里指的是接收机的环境温度, 单位为度。

**EvnHumidity:** 表征大气干燥程度的物理量, 在湿蒸汽中液态水分的重量占蒸汽总重量的百分比, 单位为%。

**EvnDewPoint:** 环境相对露点, 空气湿度达到饱和时的温度, 单位为度。

**CurrentFrequency:** 不计入数据监控内, 无数据记录。

## 4.3 数据处理

### 4.3.1 衰减计算参数需求

衰减计算包括两部分: 大气衰减和总衰减, 降雨衰减值由总衰减减去大气衰

减值得到。

#### 4.3.1.1 大气衰减参数

大气衰减的主要指温度、湿度和大气分子造成的衰减，计算步骤如下。

第一步：计算开尔文温度：

$$T=t+273.16 \quad (4-7)$$

其中 T 为开尔文温度；t 为环境温度，单位为 °。

第二步：利用温度计算出饱和水汽压：

$$E=\exp(\log(611.2)+(17.62)*t)/(243.12+t)*0.01 \quad (4-8)$$

其中 E 为当前温度下的饱和水汽压，单位为 hpa。

第三步：利用相对湿度导出水含量密度：

$$ro=216.7*E*h*0.01/T \quad (4-9)$$

其中 ro 为水含量密度，单位为  $g/m^3$ ；h 为环境相对湿度，单位为 %。

第四步：调用代码 itu676a (f, ph, T, ro) 得出大气衰减率  $\gamma_R$ ，单位为 dB/km。其中代入的参数有工作频率 f，单位为 GHz；大气压 ph，单位为 hpa（百帕）；开尔文温度 T；水含量密度 ro，单位为  $g/m^3$ 。

itu676a (f, ph, T, ro) 是 ITU-R 提供的专门用于计算大气衰减的代码，输入为四个参数：频率、气压、开尔文温度和水含量密度，输出为大气衰减值，单位为 dB。

第五步：大气衰减等于衰减率乘以实验距离：

$$A_{\text{大气}}=\gamma_R*L \quad (4-10)$$

其中 L 为发射机和接收机之间的实验距离，单位为 km。

在计算大气衰减过程中，需要用到原始参数：工作频率 f，大气压 ph，实验距离 L，环境温度 t，环境湿度 h。其中工作频率 f 为 35.2GHz，西安大气压为 965pha，实验距离为 1.07km。环境温度 t 和环境湿度 h 由衰减系统测量得到，因此计算大气衰减需从测量数据中提取出环境温度和湿度两个参数。

#### 4.3.1.2 总衰减参数

总衰减是包括降雨衰减和大气衰减的所有衰减值，可以通过接受电平计算得到，计算总衰减的步骤如下：

第一步：参考 4.4.1.1 计算降雨前晴天时的大气衰减值  $A_{\text{晴}}$ 。

第二步：确定基准电平值， $P_{\text{晴}}$ 。具体基准电平的确定见 4.4.3.3。

第三步：计算发射功率  $P_t$ ：

$$Pr=10^{P_{\text{晴}}/10}/\exp(-A_{\text{晴}}*L/4.343)(\text{dBmw}) \quad (4-11)$$

其中  $L$  是发射机和接收机之间的距离，单位为  $\text{km}$ 。

这里不采用发射机给定的发射功率，而是用记录的临近的数据来计算实时发射功率，是为了减小信号传输过程中引起的各种误差。

第四步：计算总衰减值：

$$A_{\text{总}} = 10^{P_{\text{晴}}/10} / P_r \quad (\text{dB}) \quad (4-12)$$

其中， $P_{\text{雨}}$  是雨天的接受功率。

第五步：计算雨衰减值  $A_{\text{雨}}$ ：

$$A_{\text{雨}} = -10 \log(A_{\text{总}} - A_{\text{大气}}) \quad (4-13)$$

在计算总衰减过程中，需要用的参数：晴天大气衰减  $A_{\text{晴}}$ ，参考电平  $P_{\text{晴}}$ ，实验距离  $L$ ，雨天的接收功率  $P_{\text{雨}}$ 。其中晴天大气衰减  $A_{\text{晴}}$  由 4.3.1.1 得到，参考电平  $P_{\text{晴}}$  由平均晴天的接收功率得到，实验距离  $L$  为  $1.07\text{km}$ 。接受功率由衰减测量系统测量得到，因此计算总衰减需从测量数据中提取出接受功率参数。

所有的计算都是针对实时的记录数据来进行的，所以时间参数也需要从测量数据中提取出。计算出降雨衰减值时需要和实时的降雨情况进行对比，实时的降雨率数据也需要从雨滴谱数据中提取出。

总结衰减计算中的各种需求，需要从雨滴谱数据中提取降雨率参数；需要从衰减测量数据中提取时间、接受电平、温度、相对湿度 4 个参数。

### 4.3.2 实验数据整理

降雨物理特性测量系统提供实时的降雨率数据；衰减特性测量系统根据需求提供接收电平、温度、相对湿度等参数，以时间作为统一提取数据的标准，以一天的数据为单位。

降雨率数据是 1 分钟的数据记录结果，由雨滴谱数据处理人员提供，并伴有实时的时间记录，一天为 1440 个数据，单位为  $\text{mm/h}$ 。

衰减计算需要用的参数由存储软件 DigitalReceiver 记录，数据库文件 DigitalReceiver.mdb 提供每分钟平均后的数据，如图 4.12 所示，4.2.3.1 节提到存储软件工作时，除了保存数据库文件以外，还将每天的分钟降雨数据单独保存一份，这个工作由存储软件自动完成，方便了现在进行的数据提取工作。

双击打开当天的数据库文件，里面完整的记录了一天内的实验数据，为方便后期数据处理，数据库文件以天为单位统一导入 EXCEL 表格中，如图 4.13 是 2010-3-29 原始记录数据。

Id	Frequency	LocalFrequency	WACC	AGC Coefficient	Power	Temperature	Lock	Time	EnvTemperature	EnvHumidity	EvalvePoint	Current/Frequency
2	21067	0	34000	0	-58.255	38.83333	TRUE	2010-3-29 0:00	18.8	42.84664	5.899996	0
3	21068	0	34000	0	-58.30166	38.38334	TRUE	2010-3-29 0:01	18.8	42.85667	5.956666	0
4	21069	0	34000	0	-58.685	38.41667	TRUE	2010-3-29 0:02	18.8	42.88	5.941666	0
5	21070	0	34000	0	-58.35334	38.53333	TRUE	2010-3-29 0:03	18.8	42.98836	5.921663	0
6	21071	0	34000	0	-58.305	38.8	TRUE	2010-3-29 0:04	18.8	42.82503	5.899996	0
7	21072	0	34000	0	-58.31333	38.48333	TRUE	2010-3-29 0:05	18.79833	42.88333	5.899996	0
8	21073	0	34000	0	-58.43666	38.41667	TRUE	2010-3-29 0:06	18.75667	43.21833	6.003334	0
9	21074	0	34000	0	-58.34667	38.3	TRUE	2010-3-29 0:07	18.77666	43.09001	5.976665	0
10	21075	0	34000	0	-58.485	38.5	TRUE	2010-3-29 0:08	18.70667	43.39001	6.041687	0

图 4.13 2010-3-29 衰减测量系统数原始记录数据

按照衰减计算参数需求分析中的要求,从以上文件中提取实时时间、降雨率、衰减电平、环境温度和环境相对湿度等 5 个参数。以时间为指标,整理出初步的实验数据,如图 4.14 所示,供后期 Matlab 仿真直接调用。

Time	EnvTemperature	EnvHumidity	Intensity	Power
2010-3-29 0:00	18.8	42.84664	0	-58.255
2010-3-29 0:01	18.8	42.85667	0.007	-58.30166
2010-3-29 0:02	18.8	42.88	0	-58.685
2010-3-29 0:03	18.8	42.86836	0	-58.35334
2010-3-29 0:04	18.8	42.82503	0	-58.305
2010-3-29 0:05	18.79833	42.88333	0	-58.31333
2010-3-29 0:06	18.75667	43.21833	0	-58.43666
2010-3-29 0:07	18.77666	43.09001	0	-58.34667
2010-3-29 0:08	18.70667	43.39001	0	-58.485

图 4.14 整合后 2010-3-29 的实验数据

### 4.3.3 实验数据处理

Ka 频段衰减特性测量系统是用来测量 2010 年一年的降雨数据,由于仪器的精密密度、实验者调解仪器时感官的限度和实验的长期性等各方面的现实,使得实验的测量结果带有一定的误差,为了最大程度地尽量降低系统实验的误差,除了在实验系统测试期应尽可能完善系统以外,在后期在对实验数据进行合适的处理也是有必要的。

针对实验误差控制中提出的测量数据随机误差的问题,通过在数据滤波、温差补偿和确定参考电平三个方法来进行后期数据的处理。

#### 4.3.3.1 数据滤波

计算衰减过程中的主要用到的参数有温度、相对湿度和接受电平三个变量,Ka 频段衰减特性测量系统记录 2010 年一年大量的实验数据,其中肯定存在一些随机的误差数据,应采用合适的方法对曲线进行平滑性修正。温度、相对湿度和接受电平等变化量是连续的变化过程,然而由于系统记录的 1 分钟数值是根据 60 秒的数据平均得到的,所以相邻数据存在一定的间隔,那么采用对比相邻斜率值的方法来进行滤波。

针对实验数据记录中出现的随机误差,对实验数据进行滤波。数据滤波的方

法：设定一个斜率值，用前后数据的斜率值与基准斜率值进行比较，如超出斜率变化范围则按前后两个实验数据的平均值来替代，减少连续变化中的随机误差。该方法主要针对记录过程出现的随即误差，系统正常记录情况下无影响。

以温度的变化为例，对比图 4.15 中 2010-4-13 滤波前后的温度变化曲线。

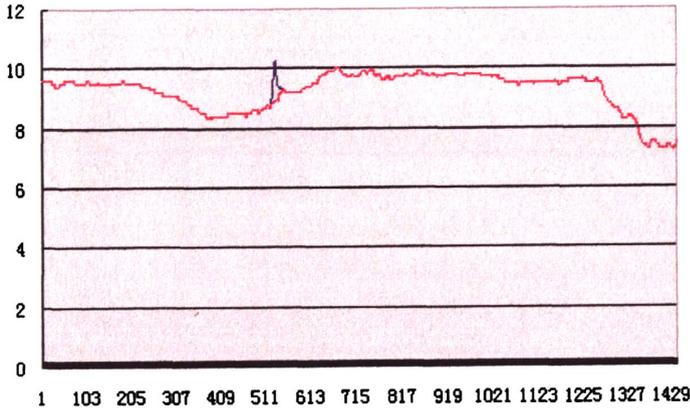


图 4.15 2010-4-13 温度数据滤波前后对比

图 4.15 中，蓝色曲线为原温度记录数据，在早上 8 点左右有 15 分钟的温度小幅度攀升现象，有外界高温物体影响接收机记录温度的迹象，观察一年的降雨数据，类似情况很少情况，作为随机误差处理；红色曲线为温度滤波后曲线，使温度曲线趋于平滑，通过实验数据滤波减少实验随机误差。

#### 4.3.3.2 温差补偿

在通信链路中，环境温度对发射功率和接受增益都有很大的影响，而在计算衰减时采用的发射功率是根据实际接收电平计算出来的，所以环境对发射功率的影响不考虑，对接收机进行增益测试，在  $-15^{\circ}\text{C}\sim 45^{\circ}\text{C}$  高低温试验箱内进行标定，Ka 接收机温度特性测试连线图如图 4.16 所示。

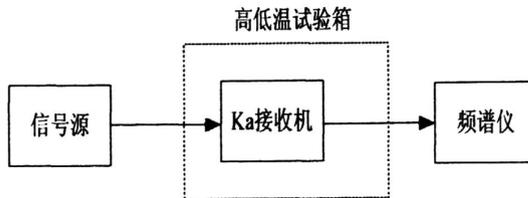


图 4.16 Ka 接收机温度特性测试连接图

通过测试，获得接收机增益温度特性曲线，如表 4.4 所示。

表 4.4 接收机增益温度特性变化值

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
温度(度)	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
输出电平 (dBm)	-8.8	-9.1	-9.5	-10.1	-10.5	-11	-11.4	-12.1	-12.7	-13	-13.4	-13.8	-14.2

以上面 13 个点为基准点进行 2 次多项式曲线拟合，得到输出电平  $P_{\text{out}}$  与温度  $t$

的变化函数:

$$P_{\text{out}} = 0.0001t^2 - 0.0964t - 10.1043 \quad (4-14)$$

温度补偿方法: 以接收机第一天正常工作时的温度为基准, 当时温度  $15^{\circ}\text{C}$ , 代入拟合函数 (4-14) 中得到  $15^{\circ}\text{C}$  对应的输出电平  $P_{\text{基准}}$ , 以  $t_1$  为例, 将  $t_1$  代入曲线拟合函数 (4-14) 中得到  $P_1$ , 用  $P_{\text{基准}}$  减去  $P_1$ , 得到的差值加到对应温度实时的接收电平上。

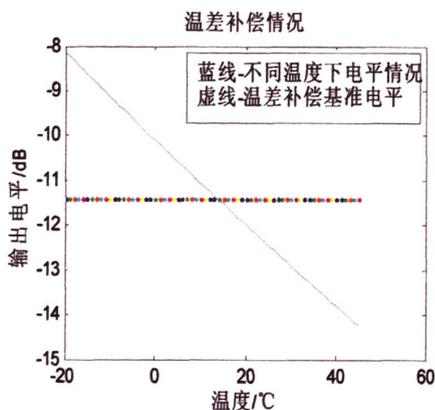


图 4.17 不同温度下输出电平情况

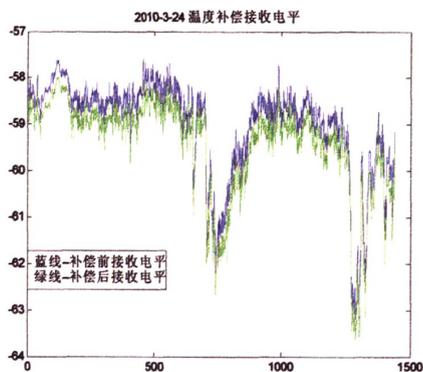


图 4.18 2010-3-24 电平补偿前后情况

设定西安地区可能达到的最低温为  $-15^{\circ}\text{C}$ , 最高温为  $45^{\circ}\text{C}$ , 由测试结果得到可能引起的最大的差值为  $5.4\text{dB}$ , 在补偿原则中选取  $15^{\circ}\text{C}$  为基准, 那么最低温最高温所引起的最大误差为  $2.7\text{dB}$  左右, 如图 4.17 所示, 蓝线是输出电平随温度的变化情况, 虚线是  $15^{\circ}\text{C}$  基准电平。

以 2010-3-24 日为例, 按图 4.17 中各温度与基准电平的差值进行补偿, 前后对比结果如图 4.18。

由图 4.18 看出, 蓝线为补偿前接收电平, 绿线为补偿后接收电平。补偿后的接受电平较补偿前偏小, 说明当天气温低于基准值, 对比当天的实际温度, 低于  $15^{\circ}\text{C}$ , 与实验推测的温度情况相符, 温度的偏低使测试数据值偏大, 接收电平与温度的变化关系见 4.4.4 节。从原有接受电平中除去因温度变化引起电平的值, 得到更准确的电平值, 在计算衰减时更利于减少实验测量中温度引起的测量误差。

### 4.3.3.3 参考电平

由于实验测量持续一年时间, 随着器件的老化, 各种参数都会发生漂移, 然后系统的老化一般是缓变量, 涉及到 4.4.1.2 中计算总衰减第二步中基准电平得选取, 基准电平作为计算衰减的一个基准条件, 对于计算衰减至关重要。

发射机的设计肯定有精准的发射功率, 然而随着系统的老化, 发射功率肯定有漂移, 这将影响到实验的准确性, 所以采用 4.4.1.2 中第三步中用实验数据计算实时的发射功率的方法, 公式中需要基准电平这个参数, 合理的选取基准电平将

进一步的减少实验误差。

选取基准电平方法：考虑系统参数随时间的漂移，以一天为例，以降雨前最近一次晴天为参考，将一天内降雨前的所有晴天电平值的平均值作为基准电平：如果全天时降雨，则将晴天的选取往前推一天，直至找到最近的一段连续的晴天为止，算出平均值作为基准电平。

针对选取基准电平的情况，可以将降雨分成两种情况，如图 4.19 所示。

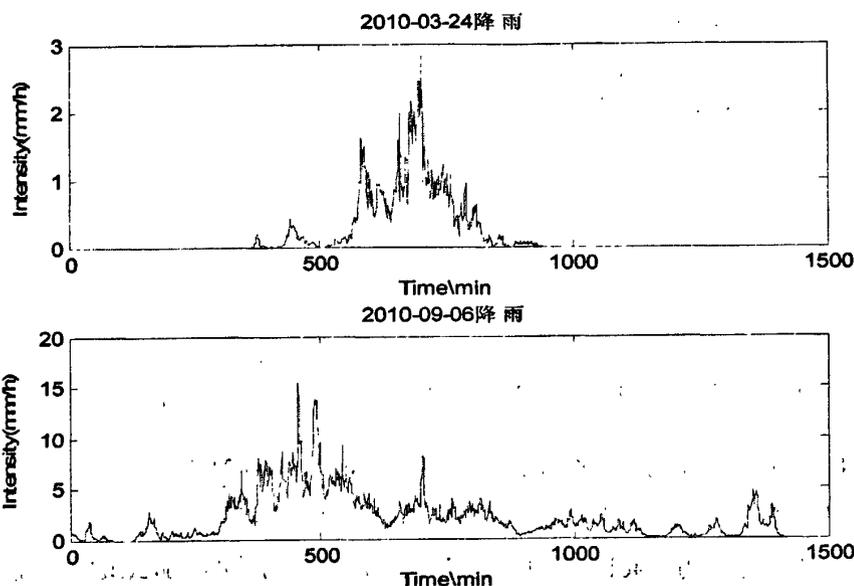


图 4.19 2010-03-24 和 2010-09-06 降雨

图 4.19 中 2010-03-24 降雨中，降雨前有一段时间是晴天，那么基准电平就采用降雨前一段时间（从当天开始到有降雨前）内晴空电平值的平均值。

图 4.19 中 2010-09-06 降雨中，全天时降雨，无晴空电平值可用来做基准电平，那么采用前一天的晴空电平的平均值作为基准值，如前一天仍为全天候降雨，则依次往前推算，直到确定基准电平为止，因为相邻若干日之间的温度变化一般不会超过  $10^{\circ}\text{C}$ ，所以实际计算中采用这种方法确定基准电平。

通过确定基准电平，进而在计算发射功率时减少一定的误差，使最后衰减的计算更加准确。

#### 4.3.4 实验数据分析

由 Ka 频段特性测量系统的实验数据分析，影响衰减特性的主要因素有三方面：降雨率，温度和湿度。其中降雨率起到主要作用，也是实验研究的主要对象，温度和湿度的影响相对较小，根据测量系统给出的实时的实验数据，得出温度和湿度对衰减特性的影响趋势。

选出 2010 年 3 月 24 日、3 月 31 日这两天的实测数据作为参考，比较温度和

湿度对接受电平的影响，如图 4.20 和图 4.21。

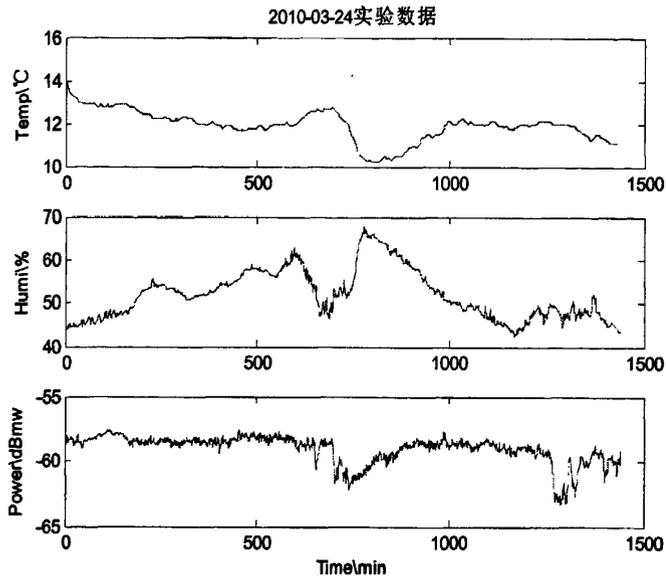


图 4.20 2010-03-24 接受电平随温度湿度变化趋势

图 4.20 是 2010 年 3 月 24 日降雨情况，图中给出了温度、湿度、接收电平随时间变化的趋势。观察图中三条曲线的走势，温度呈先快速下降后缓缓上升的趋势，湿度呈先快速上升后缓缓下降趋势，接收电平呈先快速下降后上升的趋势。对比湿度和接收电平曲线的整体趋势，可看出湿度和接受电平的曲线走势相反，粗略的得出：湿度与接收电平成反比关系，比例系数有待确定；对比温度和接收电平曲线的整体趋势，可看出温度和接收电平的曲线走势有相符的趋势，粗略的得出：温度与接收电平成正比关系，比例系数有待确定。

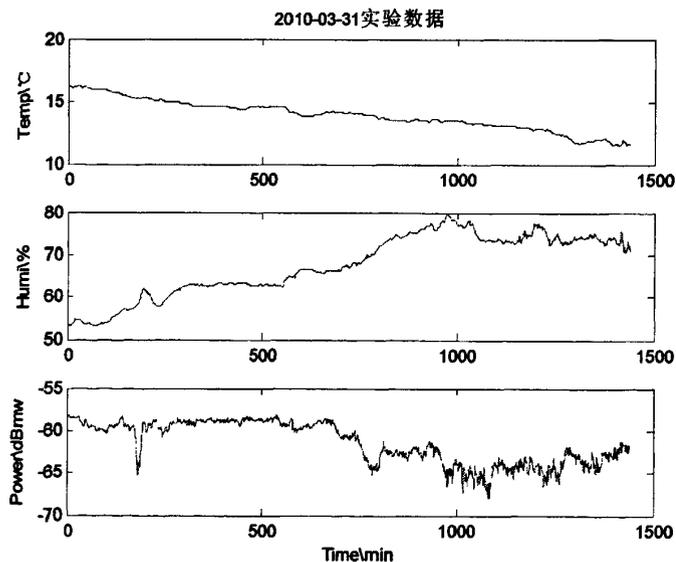


图 4.21 2010-03-31 接受电平随温度湿度变化图

图 4.21 是 2010 年 3 月 31 日降雨情况，图中给出了温度、湿度、接收电平值

随时间变化的趋势。观察图中三条曲线的趋势。温度在逐渐变小，湿度在逐渐增大，接收电平值呈下降趋势，后期有较小上升。对比温度和接收电平的曲线趋势，图 4.21 的情况，得出：温度与接收电平成正比关系，但相符程度不是很吻合，判断这种正比关系还存在其他因素的变化。对比湿度和接收电平的曲线趋势，再结合图 4.15 的情况，得出：湿度与接收电平几乎完全成反比趋势，有待对比其他降雨图来做更进一步的确定。

综合图 4.20 和图 4.21 的情况，可大致得出接收电平与环境温度成正比关系，和环境湿度成反比关系，从图中也发现应该还存在其他影响接收电平的因素，有待观察其他降雨图来做进一步的确定，而湿度和接收电平、温度和接收电平的比例系数需要通过更详细的数据对比来得出，因为接收电平时负值，在计算出衰减时，衰减与温度成反比关系，衰减与湿度成正比关系。

#### 4.4 小结

基于对实测数据的需求，引出了实验系统的设计，概述了 Ka 频段雨衰特性测量系统的结构，详细介绍了降雨特征测量子系统和衰减特性测量子系统的结构，以及各个子系统的实验参数，工作原理，实验数据的检测、记录方法。通过了解分析衰减计算过程中的需求，从大量数据中提取有用的参数进行统一整理，然后通过温差补偿、数据滤波和确定参考电平等数据处理方法来减小计算衰减中的数据误差。对整理后的数据进行简单的数据分析，研究影响接收电平的因素，整理后的数据为西安地区模型的修正提供了有力的数据支持。

## 第五章 雨衰特性计算结果

Ka 频段雨衰测量系统记录下西安地区 2010 年一年的实时的降雨数据,以处理过的实验数据为依据,从降雨衰减理论出发,基于 Matlab 平台编写代码来实验衰减的计算。

### 5.1 衰减计算过程

Ka 频段雨衰测量系统给出 2010 年的实验数据,大量的实验数据以矩阵的形式进行保存,考虑数据处理和计算的方便性,基于 Matlab 平台来进行计算衰减,因此计算该论文中涉及到的所有数据处理与分析,以及最后衰减值的计算,都是基于该平台上来进行处理的。

在课题组老师的指导下,独立完成衰减测量系统实验数据的处理和分析,基于 Matlab 平台上完成计算降雨衰减代码的编写工作,基础算法以实时的温度、湿度、降雨率为前提条件计算出对应的衰减值,再除去其他因素引起的衰减,包括大气衰减、闪烁、温差补偿、闪烁等,最后得到实时的降雨引起的衰减。

借助于二、三章中涉及到计算衰减理论的基础,针对经过数据处理后的全部的降雨数据,提炼出计算雨衰的思路:

1. 大气衰减计算,只要把对应时刻的环境温度、环境相对湿度、气压等参数代入大气衰减的 ITU-R 模型计算,就可以得到降雨时的大气衰减  $A_{\text{大气}}$ , 具体计算公式见 4.3.1.1 章节。

2. 实测的降雨衰减  $A = -10 \log(A_{\text{总}} - A_{\text{大气}})$  (dB), 其中  $A_{\text{大气}}$  就是降雨时的大气衰减,  $A_{\text{总}} = 10^{P_{\text{雨}}/10} / P_r$  为降雨时刻的全部衰减, 其中  $P_{\text{雨}}$  是雨天的接收功率,  $P_r$  是发射功率, 而发射功率  $P_r = 10^{P_{\text{晴}}/10} / \exp(-A_{\text{晴}} \times L / 4.343)$  (dBmW), 其中  $P_{\text{晴}}$  是晴天的接收功率,  $A_{\text{晴}}$  晴天的大气衰减由第一部计算大气衰减得到,  $L$  是发射机和接收机之间的距离, 实测的特征衰减  $\gamma = A/L$  (dB/km), 详细步骤见 4.3.1.2 章节。可以看出,  $A_{\text{总}}$  并不是简单的雨天的发射与接收功率的差值, 而是有一定的函数关系, 最后计算出的雨衰值与理论值相比较来验证计算雨衰思路的正确性。

## 5.2 雨衰仿真结果

依据测量系统提供的 2010 年的实时降雨数据, 结合二、三章中提到的衰减理论, 基于 Matlab 平台来实现代码的编写, 最后计算出实时降雨值对应的衰减值。

### 5.2.1 雨衰实验结果

下面以图表列举的形式列出该实验的研究结果, 2010 年部分雨天对应的降雨衰减情况。图中给出了四项数值曲线: 温度、湿度、降雨率和雨衰值。如图 5.1~5.12。

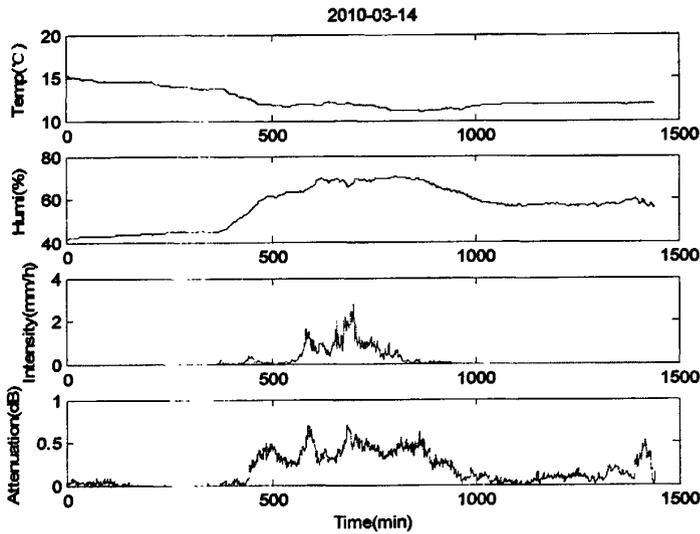


图 5.1 2010 年 3 月 14 日衰减及相关参数

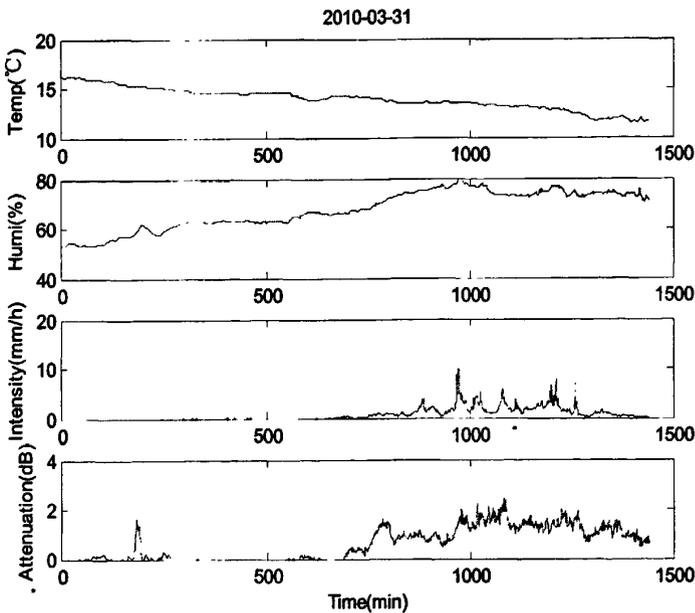


图 5.2 2010 年 3 月 31 日衰减及相关参数

图 5.1 和图 5.2 是 2010-3-14 和 2010-3-31 的降雨情况, 观察两幅图中四条曲线的趋势, 发现衰减的大小与降雨率之间存在直接的关系。14 号小雨, 在最大降雨率 2mm/h 的情况下, 雨衰减大概就在 0.5dB 左右; 31 号中雨, 在最大降雨率 10mm/h 的情况下, 雨衰减大概在 1.7dB 左右。两幅图中均存在降雨率为零的情况下有小的衰减存在, 分析原因可能是在信号路径上出现的漂浮颗粒影响接收机接收到的信号功率。

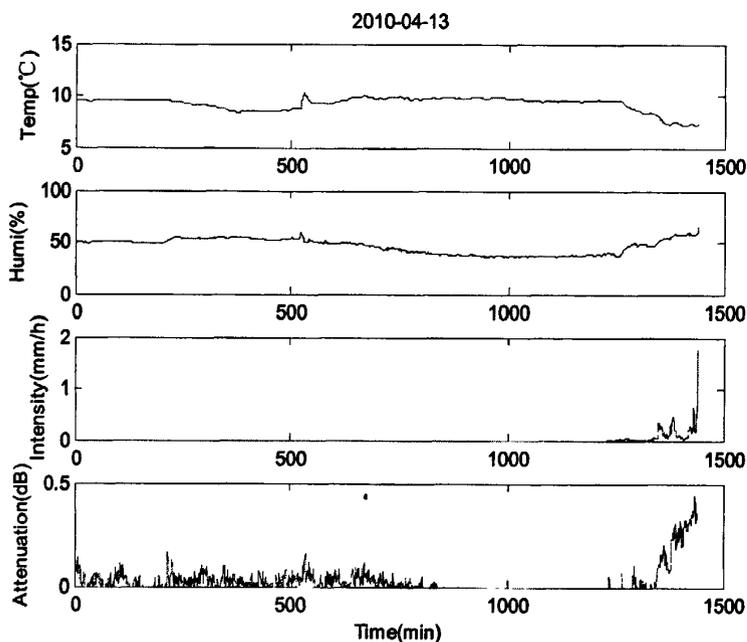


图 5.3 2010 年 4 月 13 日衰减及相关参数

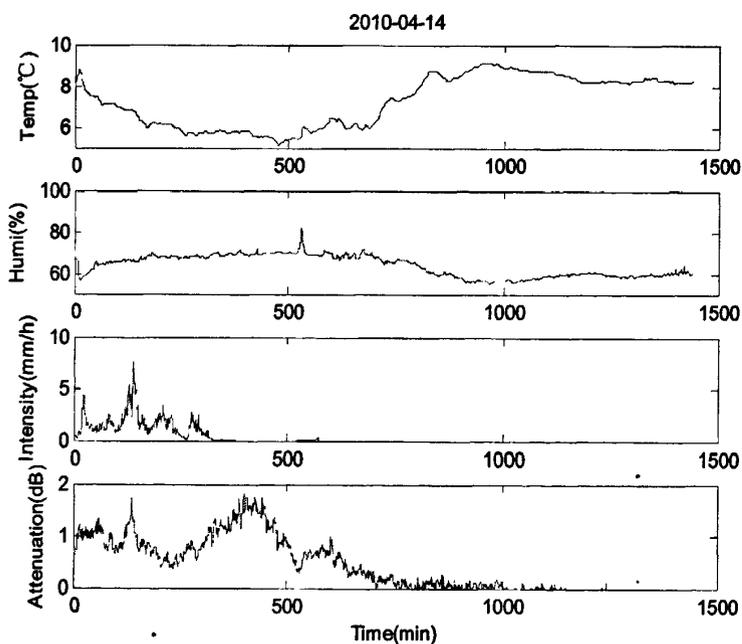


图 5.4 2010 年 4 月 14 日衰减及相关参数

图 5.3 和图 5.4 是 2010 年 4 月 13 号和 4 月 14 号的降雨情况, 这次降雨从 13 号晚上 9 点左右开始, 截止到 14 号上午。观察 13 号降雨图, 降雨初期在降雨率为  $1\text{mm/h}$  时衰减值大概为  $0.2\text{dB}$ , 在 14 号凌晨降雨率达到最大  $8\text{mm/h}$  时衰减值大概为  $1\text{dB}$  左右。在 13 号白天无降雨的情况下, 衰减值出现频繁的抖动, 幅度在  $0.02\text{dB}$  左右, 数值在接收功率误差范围之内。在 14 号降雨停止后, 衰减值由大缓缓减小, 是因为雨后空气中存在大量的水晶体和水汽, 导致空气的湿度大幅度上升, 如图 5.4 所示, 所以仍会产生较大的衰减, 该衰减随着空气的变化逐渐减小至零。

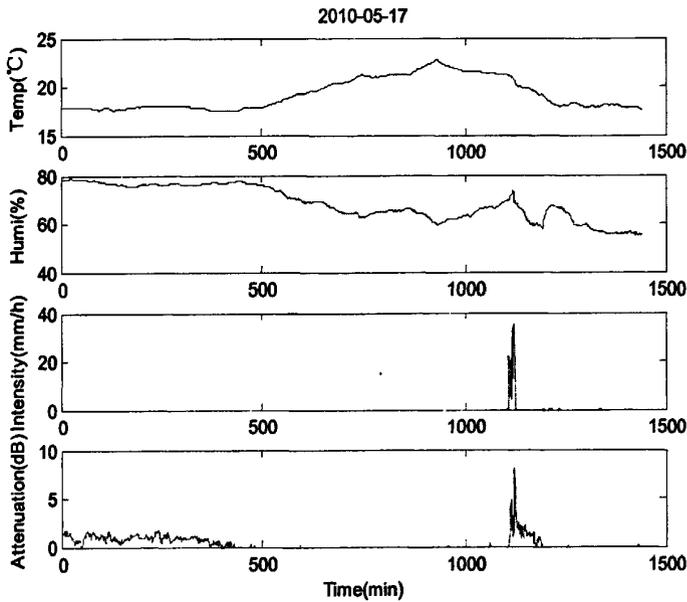


图 5.5 2010 年 5 月 17 日衰减及相关参数

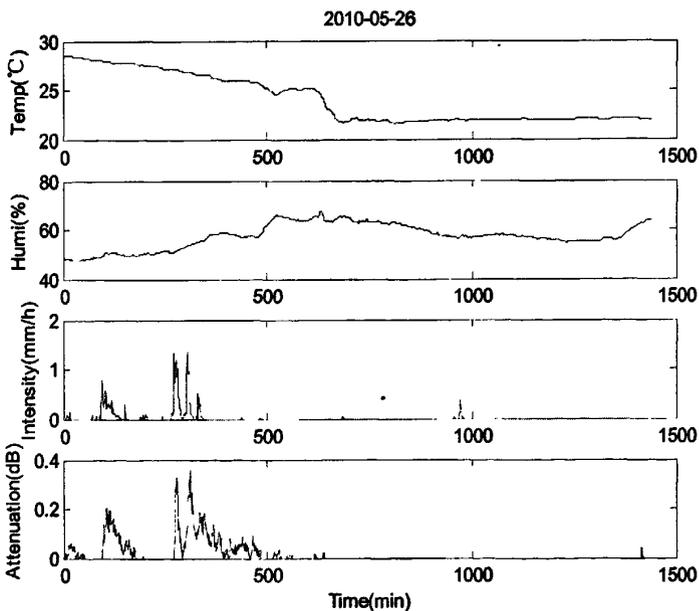


图 5.6 2010 年 5 月 26 日衰减及相关参数

图 5.5 和图 5.6 是 2010-5-17 和 2010-5-26 日得降雨情况。17 号下午七点左右出现了迄今最大的一次降雨，降雨率达 35mm/h，造成 8dB 左右的降雨衰减，相对湿度达到 70%左右。26 号小雨，最大降雨率为 1.5mm/h，衰减值为 0.3dB 左右。

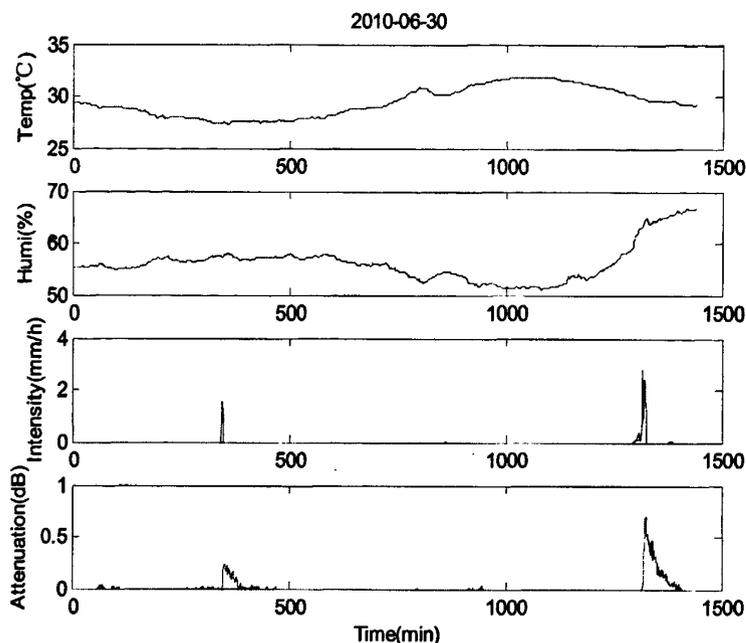


图 5.7 2010 年 6 月 30 日衰减及相关参数

图 5.7 是 2010-6-30 的降雨情况，测量系统在六月初出现故障，导致六月份前期的降雨无实验数据，该系统于六月下旬重新开始正常工作，六月份温度逐渐升高，有影响衰减偏小的趋势。在降雨率为 3mm/h 的情况下，衰减值为 0.7dB。

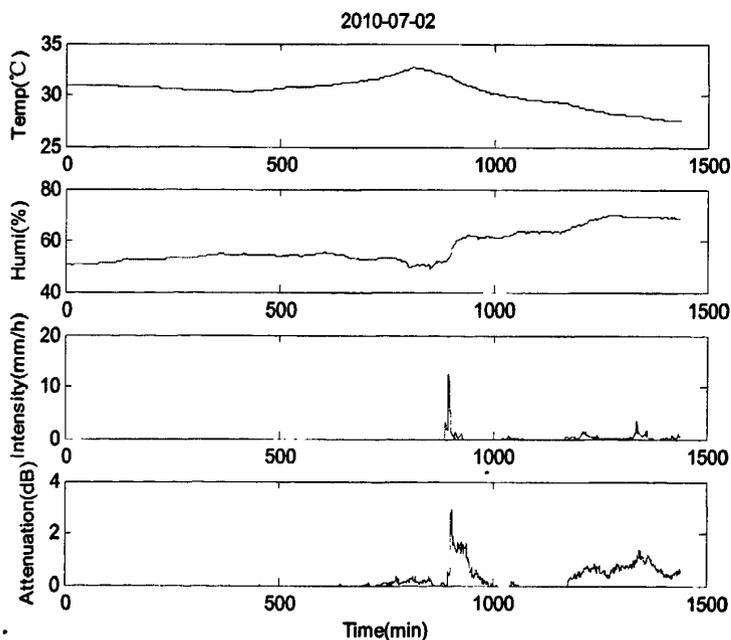


图 5.8 2010 年 7 月 2 日衰减及相关参数

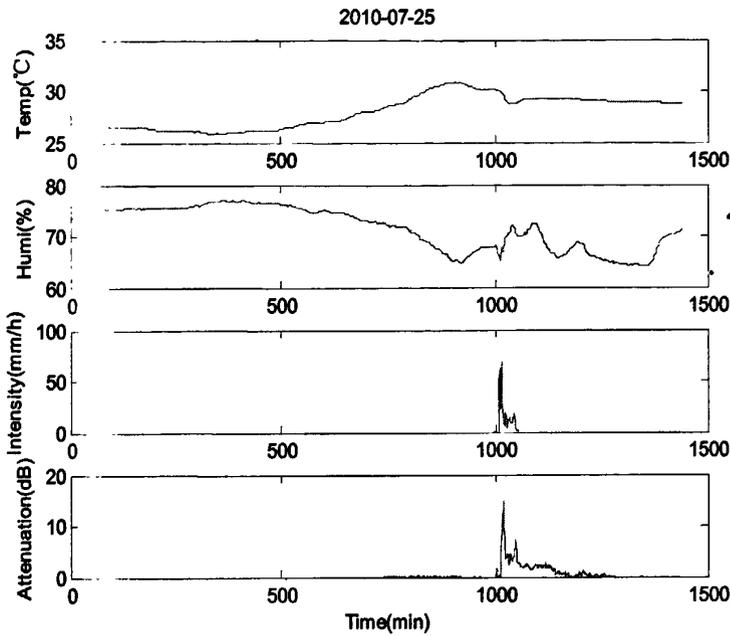


图 5.9 2010 年 7 月 25 日衰减及相关参数

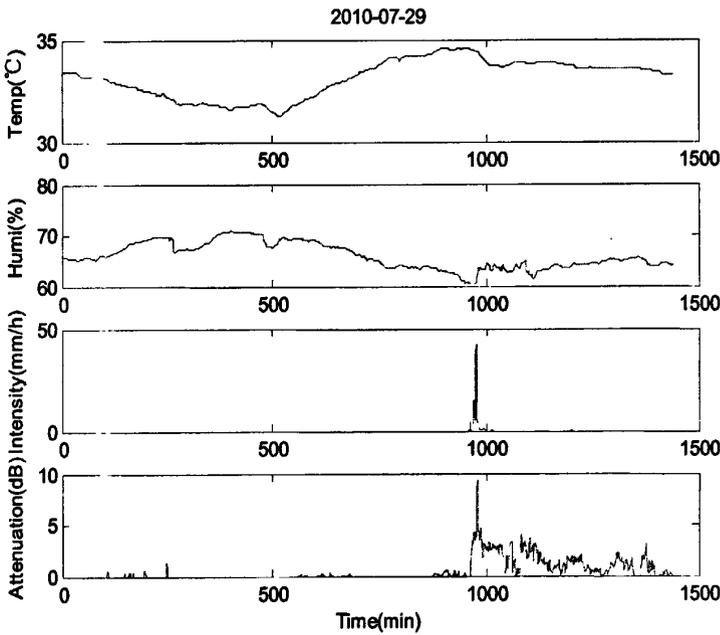


图 5.10 2010 年 7 月 29 日衰减及相关参数

图 5.8~5.10 是 2010-7-2、2010-7-25 和 2010-7-29 的降雨情况。三幅图中当降雨达最大值时，环境参数温度湿度都会有有较大变化趋势，2 号最大降雨率为 12mm/h 时，衰减值为 2.8dB；该月下旬降雨量较大，在大雨等级以上，25 号最大降雨率 67mm/h 对应的衰减值大约为 14dB，29 号最大降雨率 42mm/h 对应的衰减值大约为 9dB。

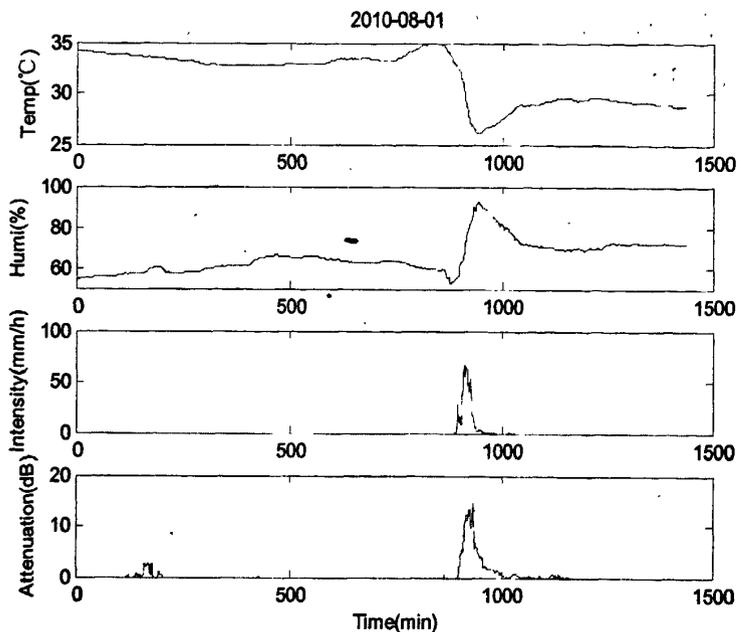


图 5.11 2010 年 8 月 1 日衰减及相关参数

图 5.11 是 2010-8-1 的降雨情况。该月只有 8-1 和 8-23 两天降雨，观察图中曲线走势，在降雨率较大期间，温度陡然下降，湿度陡然上升，相互促使衰减值的变化趋势，在最大降雨率为 66mm/h 时，衰减值大约为 14dB。

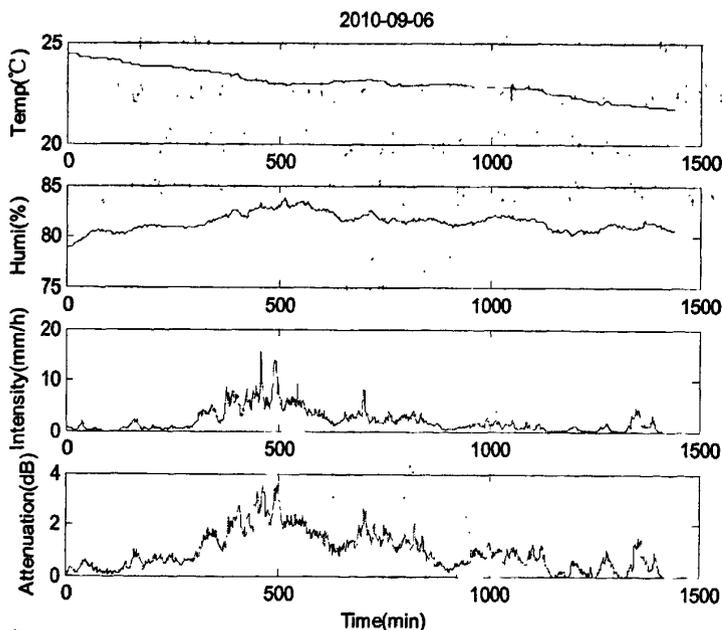


图 5.12 2010 年 9 月 6 日衰减及相关参数

图 5.12 是 2010-9-6 的降雨情况。这是一场典型的全天时降雨，在处理接受电平时需要有一个参考值，如图 5.11 中参考值定为在降雨率为零时的接收电平（降雨前），图 5.12 中为全天时降雨，那么参考值定位前一天无降雨时的接收电平值，

如果仍然没有合适的参考值，则依次往前类推。图中最大降雨率为 15mm/h，对应的衰减值大约为 3.5dB。

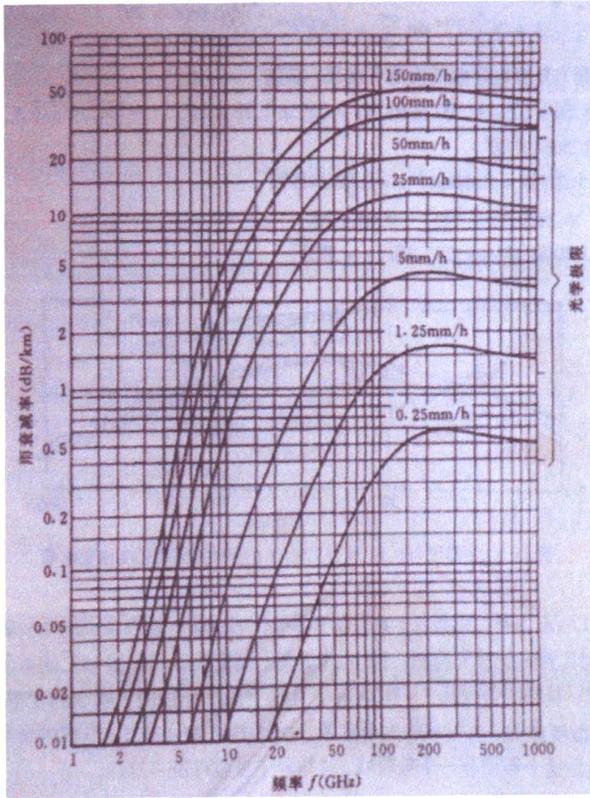


图 5.13a 不同降雨率条件下雨衰减率与频率 (1~1000GHz) 的关系<sup>[1]</sup>

通过 Matlab 仿真，得到不同降雨率下对应的衰减量，为验证实验结果的正确性，需要和国际上认证的衰减理论值相比较，如图 5.13a 所以，给出了不同降雨率条件下雨衰减率与频率的关系，通过对比实验的仿真结果和理论值，如图 5.13b。

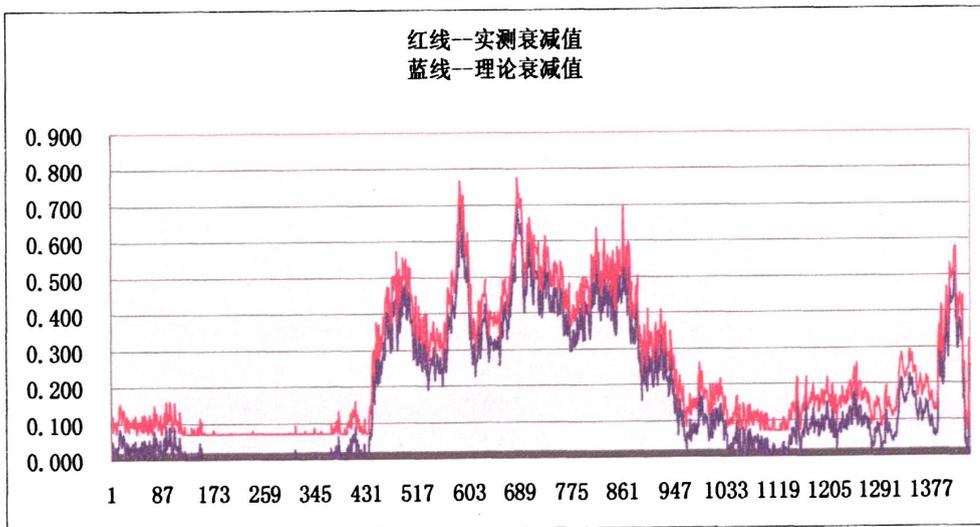


图 5.13b 2010-3-14 理论与实测衰减比较图

如图 5.13b 为 2010-3-14 理论与实际衰减对比图，得出在对应的降雨率和频率

下衰减相符合的结果，红线为实际衰减值，蓝线为理论衰减值，理论与实际存在微小的差异性，既验证了实验结果的正确性，也证实了在西安地区开展研究雨衰工作的必要，同时实测值比理论值偏大，说明实际测量中仍存在其他影响衰减的因素，所以应扩大研究影响衰减因素的范围，使之能得到更精确的降雨衰减。

### 5.2.2 衰减变化趋势

Ka 频段雨衰特性测量系统通过一年的实验记录提供了珍贵的连续的降雨数据，课题组在此基础上研究影响衰减的因素，因此研究的对象主要是温度、湿度对衰减的影响，以及降雨本身造成的衰减情况。

将空气湿度设为定值 50%，降雨率设为为定值 2mm/h，那么衰减与温度的关系如图 5.14 所示。

在 4.3.4 节中分析降雨数据时提到衰减与温度的关系，衰减随温度的升高而下降，现在在图 5.14 中直观的表现出来。图中环境温度的范围设为 0℃~40℃，横跨 40℃ 的区间造成的衰减为 0.2dB，在影响雨衰减的结果上起较小作用。

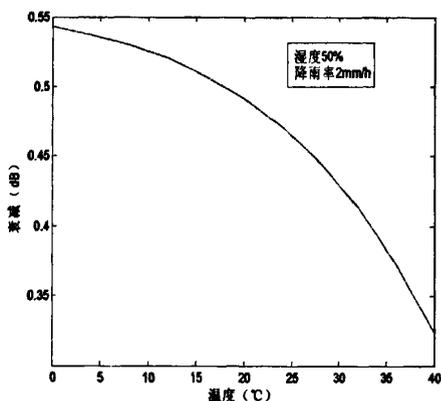


图 5.14 衰减随温度变化的趋势

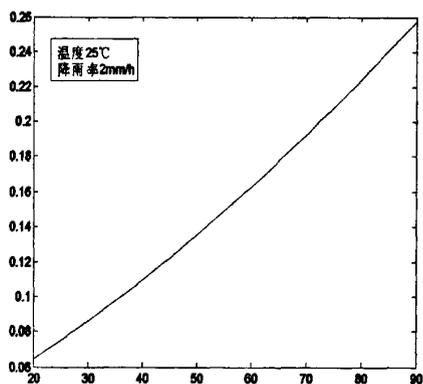


图 5.15 衰减随湿度变化的趋势

将空气温度设为定值 25℃，降雨率设为为定值 2mm/h，那么衰减与湿度的关系如图 5.15 所示。

在 4.3.4 节中分析降雨数据时提到衰减与湿度的关系，衰减随湿度的升高而增加，在图 5.15 中可以直观的表现出来。图中环境湿度的范围设为 20%~90%，横跨 70% 的湿度区间的最大的衰减差值为 0.2dB，对雨衰减的影响起较小作用。

### 5.2.3 西安地区雨衰分析

结合 3.2.5 中介绍的 ITU-R 模型，以日本定点于 136°E N—STAR 通信卫星为例，并结合西安地理参数、0.01% 时间概率的 1 分钟积分时间降雨率数据，计算工作频率  $f=35\text{GHz}$  的地球站到卫星的地空斜路径上的降雨衰减，采用参数如下：

查表 3.3 知, 西安地区 0.01% 时间概率的 1 分钟降雨率  $R_{0.01}=19.2\text{mm/h}$ ; 已知西安地区海拔高度  $H_s=0.3969\text{km}$ ; 卫星所定点的经度  $\phi_1=136^\circ\text{E}$ ; 取地面站的经度  $\phi_2=108^\circ 56' \text{E}$ , 取地面站纬度  $\varphi=34.3^\circ \text{N}$ ; 地球等效半径  $R_e=8500\text{km}$ 。

第 1 步: 计算雨顶高度, 由公式(3-29)得:  $h_R=4.1525 \text{ km}$ 。

第 2 步: 计算雨顶下斜路径长度, 其中先计算地球站天线主波束对准静止卫星时的仰角  $\theta$ 。

对准卫星时, 地球站天线主波束的仰角  $\theta$  有如下关系:

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{\cos\varphi \cos(\phi_1 - \phi_2) - \frac{R_e}{R_e + h_e}}{\sqrt{1 - [\cos\varphi \cos(\phi_1 - \phi_2)]^2}} \quad (5-1)$$

$$\text{且对于静止卫星而言, 又有 } \frac{R_e}{R_e + h_e} = \frac{6378}{6378 + 35785.6} \approx 1.151 \quad (5-2)$$

$$\text{所以有: } \theta = \operatorname{tg}^{-1} \left[ \frac{\cos\varphi \cos(\phi_1 - \phi_2) - \frac{R_e}{R_e + h_e}}{\sqrt{1 - [\cos\varphi \cos(\phi_1 - \phi_2)]^2}} \right] \quad (5-3)$$

由 (5-3) 可计算得到天线仰角  $\theta=40.7955^\circ$ ;

然后再计算  $L_s$ , 利用公式(3-30), 并带入  $\theta$  值可得到  $L_s=5.7495 \text{ (km)}$ 。

第 3 步: 计算斜路径的水平投影  $L_G = L_s \cos\theta=4.3526 \text{ (km)}$ 。

第 4 步: 计算 0.01% 时间概率点降雨率的特征衰减, 以水平极化波为例 (即极化角为  $\zeta=0$ ), 由式 (2-29) 计算得:  $k \approx 0.2566$ ,  $\gamma \approx 0.9760$ ; 由式 (3-32) 计算特征衰减:  $\gamma_R=4.5880 \text{ (dB/km)}$ 。

第 5 步: 把  $L_G$  和  $\gamma_R$  的值带入公式(3-33), 计算 0.01% 时间概率的水平缩短因子:  $r_{0.01} \approx 0.7459$ 。

第 6 步: 计算 0.01% 时间概率的垂直因子, 由式(3-34)、(3-35)得到:  $\zeta \approx 46.1619 \text{ (degree)}$ ,  $L_R \approx 4.2889 \text{ (km)}$ ; 代入式 (3-37) 得:  $v_{0.01} \approx 1.3755$ 。

第 7 步: 计算有效路径长度:  $L_E \approx 5.8994 \text{ (km)}$ 。

第 8 步: 由公式(3-39)计算超过 0.01% 时间概率降雨率的降雨衰减量:

$$A_{0.01} = \gamma_R L_E = 27.0666 \text{ (dB)}$$

p% 时间概率的降雨衰减为

$$A_p = A_{0.01} \left( \frac{P}{0.01} \right)^{-[0.655 + 0.033 \ln(P) - 0.045 \ln(A_{0.01}) - \beta(1-P) \sin\theta]} \quad (5-4)$$

第 9 步: 计算时间概率为 0.6% 的降雨衰减:  $A_{0.006} = 32.0729 \text{ (dB)}$ 。

根据相同的算法步骤，改变工作频率  $f$ ，将得到相关结果列入表 5.1 中，可以看出西安地区超过 0.01% 时间概率降雨率的降雨衰减  $A_{0.01}$ ，随着频率  $f$  的增加而逐渐增大。

表 5.1 西安地区不同频率下降雨衰减的结果

频率 $f(\text{GHz})$	$k$	$\alpha$	$\gamma_R$ (dB/km)	$r_{0.01}$	$\nu_{0.01}$	$L_R$ (km)	$L_E$ (km)	$A_{0.01}$ (dB)
25	0.1217	1.0549	2.7467	0.8035	1.2836	4.6198	5.9299	16.288
30	0.1827	1.0169	3.6881	0.7650	1.3362	4.3982	5.8768	21.674
35	0.2566	0.9760	4.5880	0.7459	1.3755	4.2889	5.8994	27.067
40	0.3415	0.9371	5.4435	0.7356	1.4057	4.2292	5.9449	32.361

下面分析的是基于 ITU-R 雨衰模型，模拟了 Ka 频段地-空路径通信时，特征衰减  $\gamma_R$ 、雨区等效路径  $L_E$  和降雨衰减  $A_{0.01}$  分别随频率  $f$ 、降雨率  $R$  和天线仰角  $\theta$  的变化情况，以水平极化为主要研究条件。

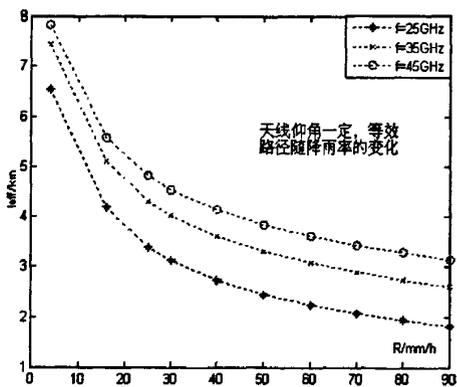


图 5.16a 水平极化下  $L_E$  随  $R$  的变化

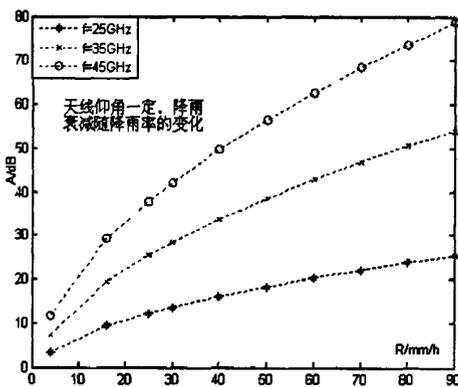


图 5.16b 水平极化下  $A_{0.01}$  随  $R$  的变化

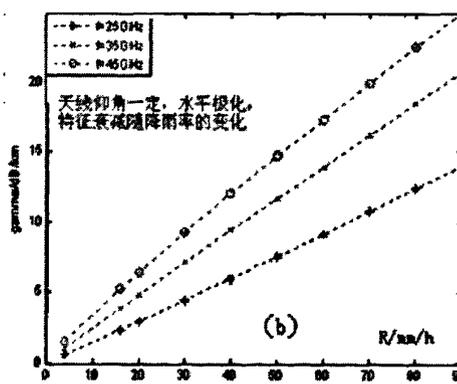


图 5.16c 水平极化下  $\gamma_R$  随  $R$  的变化

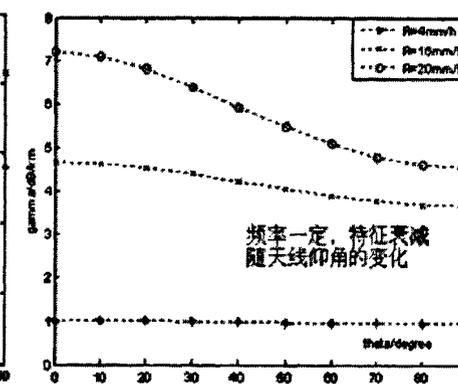


图 5.17a 水平极化下  $\gamma_R$  随  $\theta$  的变化

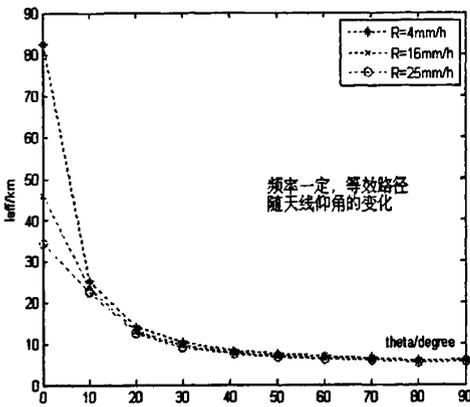


图 5.17b 水平极化下  $L_E$  随  $\theta$  的变化

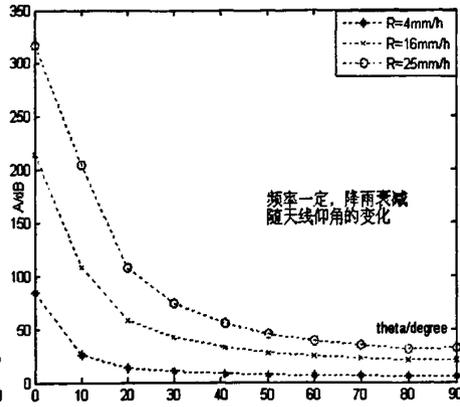


图 5.17c 水平极化下  $A_{0.01}$  随  $\theta$  的变化

图 5.16a、图 5.16b 和图 5.16c 分别描述了在  $\theta$  为定值和水平极化条件下，雨区等效路径  $L_E$ 、降雨衰减  $A_{0.01}$  和特征衰减率  $\gamma_R$  随降雨率  $R$ 、频率  $f$  的变化关系。从图中可以看出，在同一频率  $f$  的条件下，特征衰减  $\gamma_R$  和降雨衰减  $A_{0.01}$  随着降雨率  $R$  的增大而增大，雨区等效路径  $L_E$  随着降雨率  $R$  的增加而缩短；在同一降雨率  $R$  的条件下，特征衰减  $\gamma_R$ 、雨区等效路径  $L_E$  和降雨衰减  $A_{0.01}$  随着频率  $f$  的增大而增大。

图 5.17a、图 5.17b 与图 5.17c 分别描述了在  $f$  为定值和水平极化条件下，特征衰减率  $\gamma_R$ 、雨区等效路径  $L_E$ 、降雨衰减  $A_{0.01}$  和特征衰减率  $\gamma_R$  随降雨率  $R$ 、频率  $f$  的变化关系。从图中可以看出，在同一降雨率  $R$  的条件下，特征衰减率  $\gamma_R$ 、雨区等效路径  $L_E$  和降雨衰减  $A_{0.01}$  随频率  $\theta$  的增加而减小；在同一天线仰角  $\theta$  的条件下，特征衰减率  $\gamma_R$  和降雨衰减  $A_{0.01}$  随着降雨率的增加而增大，雨区等效路径  $L_E$  随着降雨率的增加而减小。

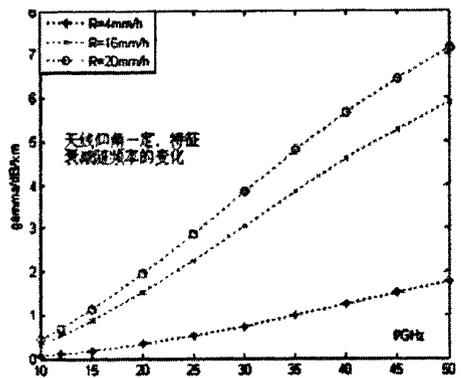


图 5.18a 水平极化下  $\gamma_R$  随  $f$  的变化

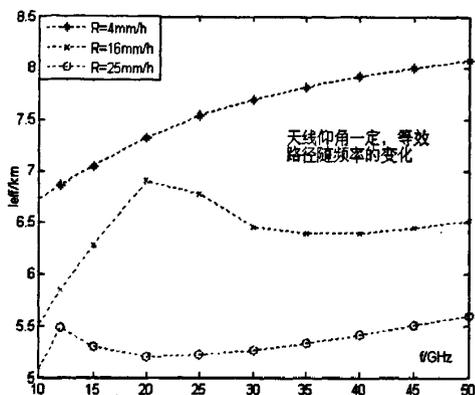
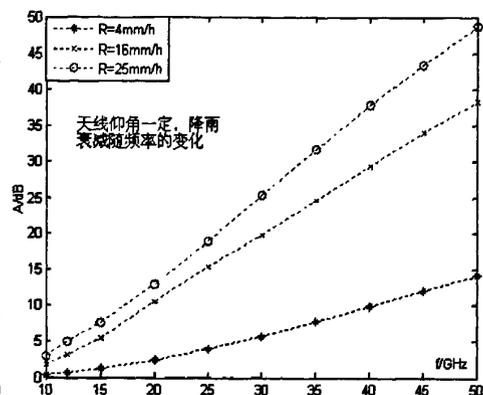
图 5.18b 水平极化下  $L_E$  随  $f$  的变化图 5.18c 水平极化下  $A_{0.01}$  随  $f$  的变化

图 5.18a、图 5.18b 与图 5.18c 分别描述了在  $\theta$  为定值和水平极化条件下, 特征衰减率  $\gamma_R$ 、雨区等效路径  $L_E$  和降雨衰减  $A_{0.01}$  随降雨率  $R$ 、频率  $f$  的变化关系。从图中可以看出, 在同一降雨率  $R$  的条件下, 特征衰减率  $\gamma_R$ 、雨区等效路径  $L_E$  和降雨衰减  $A_{0.01}$  随频率  $f$  的增加而增大; 在同一频率  $f$  下, 特征衰减率  $\gamma_R$  和降雨衰减  $A_{0.01}$  随着降雨率的增加而增大, 雨区等效路径  $L_E$  随着降雨率的增加而减小。

### 5.3 小结

本章详细介绍了基于 Matlab 平台实现计算雨衰减的过程, 列出 2010 的部分降雨情况并加以分析, 得出温度、湿度对衰减的影响趋势, 以及降雨引起的衰减情况。通过和现有的国际认证的雨衰减数据相比较, 验证了我们实验测量系统和计算过程的正确性, 同时微小的误差也说明了西安的地区差异性, 证实了在西安地区开展雨衰特性研究工作的必要, 为制定西安地区通信链路的抗衰减策略的研究提供了详细准确的数据。



## 第六章 结束语

Ka 频段雨衰测量系统的实现, 主要针对我国 Ka 频段的衰减实测参数较少的情况, 特别是长期连续观察数据缺乏, 通过该系统收集到西安地区 2010 年一年的降雨数据, 为我国 Ka 频段通信理论研究提供第一手实验数据, 结合我国地区差异性的实际情况, 为我国在 Ka 频段通信中的抗雨衰技术提供参考和依据。实

在对大量测量数据处理和分析过程中, 研究了大量关于电磁波衰减特性的理论, 包括降雨的物理特性、电磁波传播特性、不同环境下的衰减特性以及影响衰减的各因素。进而研究了国际上流行的几种将于衰减评估模型和特征衰减参数修正的理论, 然后在测量系统给出的实验数据的基础上, 总结出计算针对计算雨衰减的方法, 通过 Matlab 仿真得到结果, 并于理论值相比较以确保其正确性。

在整个项目实现过程中, 我从研究雨衰特性和实验数据处理方面入手, 辅助项目组成员完成对雨滴谱数据的分析和衰减计算软件的编写, 最终完整的处理了 2010 年一年的降雨数据, 通过 Matlab 得到衰减仿真结果。系统的学习了雨衰的基础理论, 实验测量系统从设计到搭建的完整流程, 以及处理大量数据的处理工作, 在积累、完善了项目经验的同时, 也深刻的体会到处理大量数据的一致性和项目组成员的团队性。这种难得的过程对将来不论是新的研发工作, 还是产品创新, 乃至系统测试, 都起到了不可估量的作用, 是难得的宝贵经验。

虽然在项目过程中取得了一些成绩, 但由于时间有限, 大量降雨数据处理过程中仍有不足, 目前还不够完善, 下一步的工作可以在以下方面进行:

1. 衰减测量系统收集了 2010 年一年的降雨数据, 但在雨衰模型修正的过程需要更多的实验数据, 所以下一步的工作就是要长期维持该系统的运行, 甚至扩大测量的区域, 进而搜集更多更全的实测数据。

2. 测量系统给出的实验数据中对衰减有影响的包括: 温度、湿度和降雨, 还应存在其他造成衰减的因素, 比如闪烁、折射等因素, 在有更全面实验数据的情况下, 应进一步来研究影响衰减的其他因素。

3. 在实验数据处理的过程中, 由于数据的局限性, 所以数据处理过程中的一些方法难以做到全面性, 需要通过更多的实验数据来进一步的修正和完善数据处理的方法。



## 致谢

两年的硕士研究生生活弹指一挥间，入学时的情景还仍历历在目，而我却已即将与给予我热情指导的老师，帮助和关爱过我的同学们告别。在这篇代表我研究生学习生活总结的论文的结尾，我要向这两年来关心我，影响我，帮助我的人表示我由衷的谢意。

感谢我的导师刘彦明教授，本论文从选题到最后的撰写，无不凝聚着导师的辛勤汗水和大量心血；没有刘老师的悉心指导，就没有本文的顺利完成。两年以来，刘老师严谨负责的学术精神和以身作则的生活态度，以及那种碰到问题绝不逃避，认真钻研直到解决的工作作风深深的影响着我、激励着我。刘老师将是我今后事业上学习的榜样，他的教诲和关怀将使我铭记终生。

还要特别感谢李小平老师，她对学术研究的严谨态度和高要求是我受益良多；还要特别感谢谢楷老师，我在实验室成长的每一步，都离不开他的指导和帮助，本论文得到了谢楷老师的悉心指导。特别感谢弓树宏老师，感谢他对我工作和学习的帮助。他对学术研究的执着追求和淡泊名利的精神，将是我一生享用不尽的精神财富，弓老师在电波传播和雨衰建模领域的开创性工作使我的论文受益良多。

感谢雨衰项目小组的成员肖璐、杨江骅和张丽娜同学，团队的分工与合作是我进步的动力；感谢测试新技术实验室所有的同学和老师，我的研究生的生活得益于他们的关心和帮助，离不开他们的支持与鼓励。

最后感谢我的父母和亲人，是他们支持着我走到今天，他们默默的支持是我背后宽阔的高山，是我脚下平稳的大地，是他们的含辛茹苦才让我能成就学业，在这里，我衷心的感谢他们！

感谢西安电子科技大学通信工程学院的所有老师和辅导员！

感谢所有给予我关心、支持和帮助的人们！

特别感谢为评阅本论文而付出辛勤劳动的专家和老师们！



## 参考文献

- [1]熊皓. 无线电波传播. 第一版. 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. 西安电子科技大学学位论文. 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. 西安电子科技大学硕士学位论文. 2003。
- [4]谢益溪等. 电波传播—超短波·微波·毫米波. 第一版. 北京: 电子工业出版社. 1990. 1-385。
- [5]陈道明. 新一代 Ka 频段通信卫星[J]. 国际太空. 2002 年 5 月. P8-11。
- [6]赵彬. 王俊毅. Ka 频段卫星通信研究[J]. 科技信息. 2008 年第 30 期.P25。
- [7]郑进宝. 我国 Ka 频段卫星通信雨衰分心及抗雨衰技术. 2007 年 4 月 24 日.P4-5。
- [8]熊皓. 电磁波传播与空间环境. 北京: 电子工业出版社. 2003. P20. P152。
- [9]Ana Benarroch, Laurent Blanchard et.al. Chapter 3.1: Clear air (Refractivity part)[M]. COST Project 255, Final Report, Office for official publications of the European Community, Luxembourg. 2002. 3.1-2-37.
- [10]Warren L. Flock, Propagation Effects on Satellite Systems as Frequencies Below 10 GHz [M]. NASA Reference Publication1102(02).
- [11]Oguchi,T. Eletromagnetic wave propagation and scatering in rain and other hydrometerors[C]. Proc. IEEE. 1983, 71(9). 1029-1078.
- [12]Gong Shuhong, Huang Jiying, Accurate analytical model of equivalent dielectric constant for rain medium,Journal of Electromagnetic Waves And Applications, 2006, 20(13), 1775-1783. (SCI:UT ISI:000243100800006; EI:065110320608).
- [13]Gong Shuhong, Huang Jiying, Zhao Xiaolong, Rain-induced effects on the envelope probability density functions in multipath channels, *Radio Sci.*, 43, RS2001, doi:10.1029/2007RS003759. (SCI: UT ISI:000254169400001).
- [14]ITU-R P.676-7, Attenuation by atmospheric gases[S]. 2008.
- [15]Ana Benarroch, Laurent Blanchard et.al. Chapter 3.1:Clear air (Refractivity part ) [M] COST Project 255.Final Report.Office for official publications of the European Community.Luxembourg. 2002. 3.1-2-37.
- [16] S.O.Bashir and N.J.Mxewan. Microwave propagation in dust storms: a review[J]. IEE Proceedings-H. 1986, 133(3). 241-247.
- [17]陈祥占. 从海湾战争看沙尘暴对无线电通信的影响[J]. 电波与天线. 1991, 6. 1-4.
- [18] A.J.Ansari, B.G.Evans. Microwave propagation in sand and dust storms[J]. IEE

- Proceedings-F. 1982, 129(5). 315-322.
- [19] S.I.Ghobrial and S.M.Sharief. Microwave attenuation and cross polarization in dust storms[J]. IEEE Trans.on AP. 1987, 35(4). 418-427.
- [20] S.I.Ghobrial. Effect of sandstorms on microwave propagation[C]. IEEE National Telecommunication Conference. 1980, 2. 43.5.1-43.5.4.
- [21] 赵树宗. 沙尘暴及烟雾对微波毫米波传播的影响[J]. 电波与天线. 1985, 2. 36-53.
- [22] 尹文言, 肖景明. 沙尘暴对微波通信线路的影响[J]. 通信学报. 1991, 12(5). 91-96.
- [23] 董庆生. 沙尘烟雾对毫米波传播的影响[C]. 目标特性与传输特性“八五”技术成果论文集. 1996. 716-736.
- [24] Olsen, R. L., D. V. Rogers and D. B. Hodge. The  $aR^b$  relation in calculation of rain attenuation[J]. IEEE Trans. Antennas Propag.. 1978, 26(2). 318-329.
- [25] 赵振维. 水凝物的电波传播特性与遥感研究[D]. 西安电子科技大学博士学位论文, 2001. 1-114.
- [26] Roger L. Freeman. Radio System Design for Telecommunications[M]. Third Edition. New York: IEEE-Wiley, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2007. 305-380.
- [27] 蒋耘晨, 李富. 26GHz 波段本地多点分配业务无线系统雨衰特性分析[J]. 重庆邮电学院学报(自然科学版). 2006年6月增刊. P90-93.
- [28] Max van de Kamp, Antonio Martellucci and Aldo Paraboni. Chapter 2.2: Rain Attenuation[M]. COST Project 255. Final Report. Office for official publications of the European Community, Luxembourg. 2002. 2.2-2-26.
- [29] Ondrej FISER. Site Diversity Gain Estimated from Rain Rate Record[J]. Radio engineering. 2003. 12(1). P8-11.
- [30] Misme P., Waldteufel P.. A model for attenuation by precipitation on a microwave earth-spacelink [J]. Ra.Sci..1980.15. P655-666.
- [31] Proposed modification to Recommendation ITU-R P.618-8: Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication system[S]. 2003.
- [32] 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年8月. 第24卷第4期. P627-631.
- [33] ITU-R Doc.3J/96-E. An improved prediction method of rain attenuation for terrestrial light-of sight path[S]. September. 2005.
- [34] 卢昌胜. 降雨衰减的预报模式研究[D]. 电子科技大学硕士学位论文. 2008年. P1-72.
- [35] Fedi, F.. Atenuation due to rain on terrestrial path. Alta Frequenza[J]. 1979, 66(4). P167-184.
- [36] 吴春雨. 微波、毫米波雨衰减特性研究[D]. 西安电子科技大学硕士研究生学位论文. 2006年.
- [37] 林乐科, 赵振维, 刘玉梅. 地空雨衰减预报新模式比较[J]. 电波科学学报. 2004年10月. 第19卷增刊.

- [38]卢昌盛, 赵振维, 林乐科等. 基于雨胞分布的雨衰减预报模型[J]. 电波科学学报. 2007年9月. 第22卷增刊。
- [39]M.Z.Gao, T.S.Yeo, P.S.Kooi and M.S.Leong. Rain Attenuation Calculation Using Dielectric Mixturewith Deformed Rain Drops[C], Geoscience and Remote Sensing Symposium. 1993, IGARSS '93. Better Understanding of Earth Environment., International. 1250-1252.
- [40]ITU-R.Propagation data and prediction methods for the design of terrestrial line-of-sight systems[S].Rec.P530-8.International Telecommunication Union.Geneva.1999.
- [41]ITU-R.Specific attenuation model for rain for use in prediction methods[S]. ITU-R. Rec.P.838.International Telecommunication Union.Geneva.1994.
- [42]ITU-R.Propagation data and prediction methods required for the design of earth-space telecommunication systems[S]. ITU-R.Rec. P618-1.P Series Volume, Radio wave propagation, Geneva,1996.
- [43]ITU-R.Document 2/36-E. Draft revision to Recommendation[S]. ITU-R.P 618-5 .ITU-R.study group 3 meeting. Geneva.1999.
- [44]ITU-R Doc.3J/96-E.An improved prediction method of rain attenuation for terrestrial light-of sight path[S]. Setember.2005.
- [45]OTT Operating Instructions: Present Weather Sensor Parsivel.
- [46]OTT Operating Instructions: Parsivel Application Software ASDO.