

文章编号: 1007 4619(2006)04 0568 05

利用 Ku 波段卫星通信雨衰探测 大气降水的初步研究

李 黄

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘 要: 在研究 Ku 波段卫星通信雨衰问题的基础上, 大胆设想反过来从这种大气干扰中提取气象信息, 利用 Ku 波段卫星通信的雨衰来定量测定大气降水。其技术思路是, 把解决 Ku 波段雨衰的正问题逆向处理, 利用实测的 Ku 电波雨衰量和解决雨衰问题的计算模型, 来计算雨强、降水量以及电波传播路径上的大气液态水累计量。提出了一种从其他电磁波应用技术在大气中传播的干扰误差中提取大气海洋空间信息, 发展对地遥感探测技术, 广开地球空间信息获取资源的全新思路 and 重要途径; 与全球定位系统气象学 (GPS MET) 有异曲同工之妙, 甚至可以发展为卫星通信系统气象学 (SaTS MET)。

关键词: 卫星通信; 雨衰; 探测; 大气降水; 遥感

中图分类号: P407 **文献标识码:** A

Preliminary Study on Detecting Atmospheric Rainfall by Rain Attenuation from Ku-band Satellite Telecommunication System

LI Huang

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract This paper on the basis of studying rain attenuation of Ku band microwave for satellite telecommunication systems bravely envisages in an inverse way, to collect the weather information from this kind of atmospheric interference by making use of rain attenuation to detect rainfall in the atmosphere. The way is turn over the processing to the positive problem that resolves the Ku wave rain attenuation, make use of the amount of Ku wave rain attenuation measured actually and the method to predict rain attenuation calculate the rainfall rate and obtain the total amount of liquid water through the electric wave propagation slant path in atmosphere.

On basis of this research, Ku wave band Satellite Telecommunication Systems (SaTS) will become a Ku-band passive bistatic Radar system at the same time to detect Atmospheric rainfall and even develop the role of "the kill two birds with one stone".

It has important practical meaning. Just like GPS MET, this research would develop as SaTS MET.

Collecting the information of atmosphere-ocean space from the interference error of other electromagnetic waves applied technique could find a new way thinking of and important paths for developing the remote sensing techniques and opening up the Earth space information resources widely.

Key words satellite telecommunication; rain attenuation; detecting atmospheric rainfall; remote sensing

收稿日期: 2005-08-15; 修订日期: 2005-10-25

基金项目: 中国气象局 2005 年度技术开发研究项目资助。

作者简介: 李 黄 (1942—) 男, 研究员。1966 年北京大学地球物理系天气动力学专业毕业。长期从事气象科技研究和业务服务实践, 现从事的研究领域为: 大气中水、风分布变化高分辨探测技术, 特别是多普勒天气雷达、风廓线雷达、激光雷达和 GPS MET、Ku 波段雨衰等主动遥感技术。发表论文 40 多篇, 与他人合著专著 3 部。

1 引言

由于水在地球生态环境系统中的特殊地位,对大气中三种相态水含量的探测越来越受到人们的密切关注。目前常规水探测的时空密度和精度远远不能满足各方面的需要。近年来微波遥感技术的迅速发展,各种地基、星载设备包括微波辐射计、测雨雷达等发挥了重要作用;尤其是通过 GPS MET 遥感可以得到很高时空分辨率的水汽资料,显示了巨大潜力,但仍多偏重于水汽含量探测。

本研究提出了一种全新的思路,利用 Ku 波段卫星通信的雨衰来定量测定大气降水,与 GPS/MET 遥感水汽探测技术有异曲同工之妙,都是利用电磁波在大气中的传播特性,但是其波段、原理及探测目标又有所不同。GPS MET 利用的是:全球定位系统卫星星座发射的 L 波段电磁波在大气中的折射造成的信号延迟来反演大气中的水汽含量;而本研究利用的是通信卫星发射的 Ku 波段电磁波在大气中的吸收、散射、衰减来反演大气中的液态水含量。

由于无线电通信发展的需要,国外早就开始研究电磁波雨衰问题^[1-3]。Ryde 等发表了《雨、雪、雾、云引起的厘米波和毫米波的衰减》^[1]。以后几十年,在微波散射理论和雨衰雨强的同步观测实验方面有大量的工作,对于雨衰的机理,与电波频率、雨强以及其他因素的关系逐步有了比较系统的认识,在此基础上探索了多种雨滴谱分布函数和雨衰计算模型,与测量值进行了比较;提出了简化计算公式,其中最著名的是 Olsen 等在 1978 年总结提出的《雨衰计算中的 aR^b 关系》^[1],成为微波雨衰问题最经典的文献。在此基础上,国际电信联盟 (ITU-R) 针对卫星通信与广播的链路工程计算问题提出了一系列的建议书^[6],并不断提出修改本。

国内的工作在二十世纪八、九十年代,为适应高速发展的卫星通信广播电视事业迅速展开^[7-11]。赵柏林院士 (1991 年,1998 年)对 1—300GHz 频段微波在大气和云雨中的传播特性、中国地区微波雨衰的特点、降水率分布模型、适用的计算公式和中国地区无线电气象降雨气候区都有系统的研究,对中国卫星通信工程设计以至通信卫星的空间合理位置提出积极建议。高校、科研机构及电信、广播电视、有关部门科技人员都作了大量工作。主要集中在:Ku 波段卫星广播通信雨衰分布,雨滴尺寸分布模型

及雨衰截面模型参数估计,雨衰减计算预报以及雨衰的防护等方面。

气象部门也很早涉及此项工作,1985 年开始与武汉大学空间物理系合作,进行了《中国降雨衰减气候图》的研究,其成果被 (ITU-R) Rec 837 建议书《全球雨气候图》中采纳。中国气象局建设全国气象部门卫星通信系统,十多年来,加强了这方面的研究,积累了关于 Ku 波段卫星通信雨衰问题丰富的实践经验,出版了《中国主要城市降雨雨强分布和 Ku 波段的降雨衰减》^[12]。

但国内外对于此问题的研究都是从降雨入手,计算大气对无线电波传播的干扰和衰减的影响。而本研究逆向思维,反过来从这种大气干扰中提取气象信息,利用雨衰来测定大气降水!这就提出了一种从其他电磁波应用技术在大气中传播的干扰误差中提取大气海洋空间信息、发展对地遥感探测技术、广开地球空间信息获取资源的全新思路和重要途径。

2 技术方法及实例分析

2.1 研究基础

首先从 Ku 波段雨衰的正问题出发,通常的做法是:利用实测的降水量、雨强资料 R 和国际电联 (ITU-R) 建议的计算模型来计算雨衰量 A ,建立起一种地面降雨率 R_p 与衰减率 γ 的对应关系。

利用电磁波在大气中的传播理论,采用相关 Mie 散射模型简化后,衰减率可简捷地表示为

$$\gamma = aR_p^b \quad (\text{dB km}) \quad (1)$$

式中, a 和 b 为待定系数,它们主要由电波的工作频率、极化方式、雨滴的模型、电波接收地点的位置来决定,很多学者给出了系数 a 和 b 的不同计算方法。

(ITU-R) Rec 838 中建议给出的标准计算方法如下:

$$a = [a_H + a_V + (a_H - a_V) \cos 2\theta \cos(2\tau)] / 2 \quad (2)$$

$$b = [a_H b_H + a_V b_V + (a_H b_H - a_V b_V) \cos 2\theta \cos(2\tau)] / (2a) \quad (3)$$

式中, a_H, b_H, a_V, b_V 分别为水平极化、垂直极化在水平路径时的 a, b 系数值,它们与频率相关; θ 为接收天线仰角; τ 为接收点电波的极化角。

在 Ku 波段 (12—18GHz), 9210 通信卫星的用户工作频率为 14.160GHz 上行为 14.1536—14.1688GHz 下行为 12.3536—12.4688GHz。根据 (2)、(3) 式可计算出系数 a 和 b 。也可通过查表内插求出。显然系数 a 和 b 与天线仰角 θ 和电波的极

化方式 τ 密切相关, 因此在全国范围内不同的接收地点, 它们存在明显差异, 在计算雨衰的过程中必须予以考虑。

2.2 技术方法

作为雨衰逆问题的解决就是: 利用实测的雨衰量 A 和国际电联 (ITU) 建议的计算模型来计算雨强 R 和降水量, 更准确一点说是电波传输路径上的液态水累积量。

其基本方程式仍然是:

$$A = aR^b \quad (4)$$

$$\ln A = \ln a + b \ln R \quad (5)$$

$$R = \exp(1/b * \ln A / a) = (A/a)^{1/b} \quad (6)$$

式中, A 是雨衰量, 由实测的信噪比得到。系数 a 、 b 可以利用前面的结果, 更可用当地同步实测的降雨量资料 R , 通过统计回归方法求得。

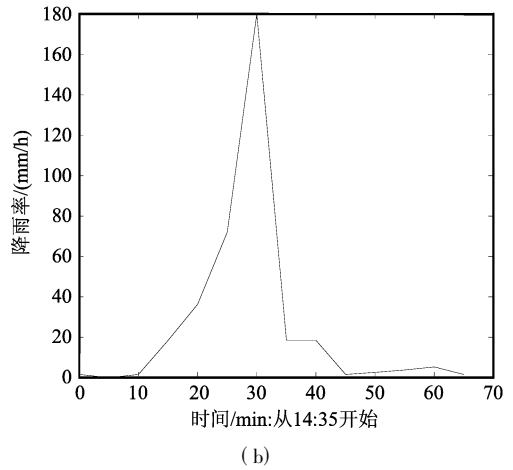
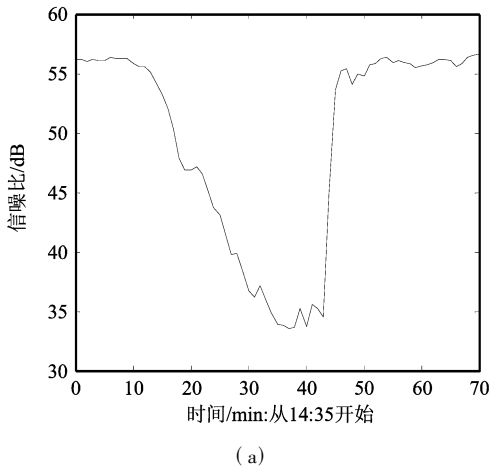


图 1 1998 年 4 月 26 日 14:35—15:45 降雨过程^[12]

(a) 雨衰曲线图; (b) 雨强曲线图

Fig 1 Rain attenuation and rainfall rate time synchronous curves

(a) Rain attenuation curve (b) Rainfall rate curve time synchronously

2.3.2 实例二

广电部北京地球站的实测资料也显示了雨衰和降雨量有很清楚的幂指数函数关系^[9] (表 1 及图 2)。

利用最小二乘法, 根据 (5)、(6) 式可计算出 a 和 b 系数。见图 3

得到 $\ln a = -1.7927$

$$a = 0.1665, \quad b = 0.9025$$

即: $A = 0.1665R^{0.9025}$

$$R = (A/0.1665)^{1/0.9025}$$

则 $R = 7.2894A^{1.108}$

且相关系数 correl 达到 0.9617。

2.3 实例分析

2.3.1 实例一

1998 年 2—11 月; 中国气象局信息中心通信台在广东清远开展过雨强和雨衰的对比测试实验。接收天线放在距气象观测场雨量计不足 50m 的地方, 保证了雨强测量与雨衰测量的真实一致性。雨衰的测量是以测试接收亚洲卫星 2 号 Ku 转发器信标的信噪比为依据, 接收频率 12504MHz (水平极化) 和 12503MHz (垂直极化)。天线口径 1.2m, 方位角 208.9°, 仰角 58.9°。

对 1998 年典型的四场降水过程 4 月 26 日 14:35—15:45; 4 月 27 日 9:35—17:00; 7 月 3 日 12:30—17:00; 7 月 12 日 17:05—19:20 进行分析: 其接收信噪比曲线 (雨衰) 信噪比 (dB) 和降雨特性曲线 (雨强) 降雨率 (mm/h) 之间具有非常好的反相关关系 (图 1)。

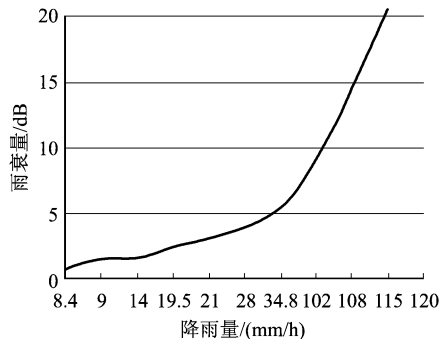


图 2 实测的链路雨衰曲线 (频率为 13.45GHz)

Fig 2 Chain rain attenuation curve measured

actually (frequency for 13.45GHz)

表 1 1996 年夏季雨衰情况记录 (摘录)

Table 1 Rain attenuation Records in summer 1996

日期 (月, 日)	时间 (时, 分)	雨衰变 化 Δ (dB)	平均雨 衰 $\bar{\Delta}$ (dB)	平均降雨 量 \bar{R} (mm/h)
7 30	1: 24- 1: 54	0.36-0.94	0.785	8.4
7 28	2: 04- 2: 56	1.34-1.68	1.51	9.0
7 30	18: 23- 18: 53	1.41-1.75	1.58	14.0
7 28	2: 03- 2: 43	2.21-2.75	2.48	19.5
8 05	8: 30- 8: 40	2.84-3.31	3.075	21.0
8 19	21: 14- 21: 20	3.65-4.27	3.96	28.0
8 19	21: 54- 21: 59	4.27-5.41	4.84	34.8
8 19	12: 43- 12: 47	5.50-7.58	6.54	102.0
7 27	4: 14- 4: 17	9.38-13.9	11.64	108.0
6 19	13: 24- 13: 27	16.53->20*	>16*	>120.0*

* 测量仅只显示到 20dB

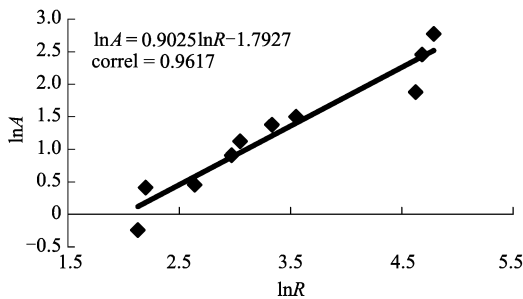
图 3 雨衰量 (A) 与降雨量 (R) 取对数后线性相关图

Fig. 3 Linear relation between the rain attenuation and rainfalls after logarithmic transformation

3 进一步要解决的关键问题

虽然 Ku 电波雨衰正问题的解决, 有大量的方法。但是逆问题的求解, 并不是那么简单, 主要的困难是引起电波衰减的因素是非常复杂的。而正问题的解决又主要是概率极值的计算, 属于气候统计领域; 现在要求的是雨衰雨强的瞬时关系, 属于天气变化领域, 可见其难度。关键在于如何从实测电波衰减中, 剔除其他的影响因素, 达到定量测雨的精度。

进一步的研究集中在电磁波在大气空间传播领域, 要吸纳大气辐射传输和云雾物理方面新的研究成果, 进一步充实微波散射理论, 在微波 Ku 波段雨衰计算上, 争取有新的进展。

3.1 理论分析

逐一分析影响 Ku 波段雨衰的各种因素。综合各种新的雨滴谱分布函数模型, 尤其是非球型雨滴的具体特征, 力求 Ku 波段电磁波的传播, 更接近大气真实状态。

3.2 同步观测实验

针对 Ku 波段电磁波开展充分的雨衰和雨强的同步观测实验。研制更大动态范围、高精度的卫星信标接收机, 获取更多的实际数据, 对理论分析进行验证改进。对卫星接收站的信噪比测量进行定标, 提高测量雨衰的灵敏度和精度。

3.3 数值模拟和同化

利用有更好的云雾物理过程的中小尺度模式, 并耦合电磁波传输过程, 特别是微波散射过程, 建立模拟更完善的大气状态的数值模型, 开展同化试验; 并把雨衰值直接同化到模式中去。

目标是: 利用实测的 Ku 电波雨衰量和建立的解决雨衰问题的计算模型, 来定量计算雨强、降水量以及电波传播路径上的大气液态水累积量。利用现有的 Ku 波段卫星通信实时业务系统, 建立适用于全国不同地区的实测降水系统。

4 小 结

本研究利用 Ku 波段卫星通信雨衰定量测定大气降水, 不仅仅使用单站的降水资料, 而且用各种手段全方位描述大气降水过程, 通过详细描述大气云雾物理过程的中小尺度同化系统和数值模式来计算雨强和降水量, 特别是电波传播路径上的大气液态水累积量。用微观和动态变化过程的研究突破以往雨衰问题静态统计计算的传统做法, 将有可能取得更好的进展。类比于全球定位系统气象学 (GPS/MET), 甚至可以发展为卫星通信系统气象学 (SaFS MET)。

从实用方面, 本研究利用已有的 Ku 波段通信卫星电磁波信号源、卫星地面接收站和连续的电波信号发射接收运行, 就可构成一个 Ku 波段无源分布式雷达系统, 进行大气主动遥感探测, 不需要另外增加设施和消耗。相对其他雷达、辐射计等主、被动遥感设施具有成本低、效率高、综合作用效益大等优点。

全国气象部门 9210 卫星通信网(近 3000 个 VSAT 小站)就可同时成为一个快速测雨网,实现对全国降水实况的及时准确探测。综合其他观测资料(如雷达、卫星、GPS 等),对于监测灾害性天气的产生和发展,提高气象预报的准确率,更好地解决水循环,开展全球气候研究等有着重要的应用价值,并有良好的推广前景,对其他 K 波卫星-地面系统,可实现信号传输和大气探测一举两得,充分发挥卫星系统设备效益。还可实现雨衰预报,提高通信广播电视系统可用度,在经济和社会发展中起更大作用。

致 谢 感谢中国气象局气象信息中心对本研究的全力支持。

参 考 文 献 (References)

- [1] Ryde J W, Ryde D. Attenuation of Centimetre and Millimetre Waves by Rain, Hail, Fog and Clouds [A]. Res. Labs. of the General Electric Company [C]. Wembley, England, Rep. 8670, 1945.
- [2] Medhurst R. C. Rainfall Attenuation of Centimeter Waves: Comparison of Theory and Measurement [A]. IEEE Trans. Antennas Propag. [C], July 1965, AP 13, 550-564.
- [3] Crane R. K. Propagation Phenomena Affecting Satellite Communication Systems Operating in the Centimeter and Millimeter Wavelength Bands [A]. Proc. IEEE [C], 1971, 59, 173-188.
- [4] Olsen R. L., Rodgers D. V., Hodge D. B. The aR^b Relation in the Calculation of Rain Attenuation [A]. IEEE Trans. [C], 1978, AP 26, 318-329.
- [5] Zhang W. Power Law Parameters of Rain Specific Attenuation [A]. IEEE [C], 1999, 802, 16cc-99/24.
- [6] ITU-R Recommendations P. 618-7, PN. 837-1, 2, 3, 4, P. 838-1, 2, P. 839-3 [S], 1992-2003.
- [7] Zhao B. L., Liu J. Q. The Attenuation Effects of Cloud and Rain on Satellite Earth Microwave Communication [J]. Acta Meteorologica Sinica, 1991, 49(4): 494-503. [赵柏林, 刘建强. 卫星微波通信中云雨衰减的预测 [J]. 气象学报, 1991, 49(4): 494-503.]
- [8] Li L., Zhu Y. J., Zhao B. L. Rain Rate Distributions for China from Hourly Rain Gauge Data [J]. Radio Science, 1998, 33(3): 553-564.
- [9] Zeng Z. S., Xie D. H. Talk about the Rain Attenuation and Protection Measures of the Ku Wave Band [J]. Broadcast and Television Techniques, 1997, 2, 65-68. [曾昭生, 谢东晖. 浅谈 Ku 波段的雨衰及防护措施 [J]. 广播与电视技术, 1997, 2, 65-68.]
- [10] Che J. M., Mao Z. The Research of Rain Attenuation Phenomenon in the Ku Wave Band Satellite Broadcast [J]. Journal of the Electric Wave Science, 1999, 14(2): 196-201. [车晴, 毛志. Ku 波段卫星广播中雨衰现象的研究 [J]. 电波科学学报, 1999, 14(2): 196-201.]
- [11] Wang X. Q., Zeng Z. S. The Influence of Rain Attenuation Upon the Ku Wave Band Signal and Estimate [J]. Broadcast and Television Techniques, 2000, 27(1): 85-89. [王秀琦, 曾昭生. 雨衰对 Ku 波段信号的影响及估算 [J]. 广播与电视技术, 2000, 27(1): 85-89.]
- [12] Sun X. G. The Rainfall Rate Distribution of Chinese Main Cities and the Rain Attenuation of the Ku Wave Band [M]. Beijing Meteorological Press, 2004. [孙修贵. 中国主要城市降雨雨强分布和 Ku 波段的降雨雨强衰减 [M]. 北京: 气象出版社, 2004.]