

雨衰估算方法的演变与问题

吴波洋

在卫星通信的链路估算中,传输损耗是一个重要参数。除了自由空间损耗外,传输损耗还包括降雨衰耗、大气中凝水和沙尘等的吸收、电离层和对流层的闪烁和折射以及天线轴向偏离等因素。就10 GHz以上的Ku和Ka等高频段电波传输而言,降雨衰耗具有很大的影响。由于降雨这一自然现象在发生时间和地域上的不确定性,对降雨衰耗的精确量化计算是不可能的。ITU-R及其前身CCIR经过数十年的观测和研究,总结出按不同的时间概率估算可能发生的雨衰量的方法。我国的有关部门也据此制定了相应的通信行业标准。本文拟对雨衰估算方法、其发展和演变过程以及尚存的问题作一简要介绍。

1 降雨衰耗及其估算方法

降雨衰耗是在平均年度的统计时间中将要超过的预测衰减量。统计时间用百分数表示。0.1%时间的雨衰量为5dB,意味着平均每年有0.1%时间(大约526分钟)的降雨衰耗可能超过5dB。与此相对应的是雨衰可用率的概念。等效于0.1%雨衰量的可用率为99.9%,99.9%时间的5dB雨衰可用率的意义为,平均年度中99.9%时间的降雨衰耗将不高于5dB。

降雨衰耗为电波在穿过雨区时所受到的衰减量。ITU-R建议P.618-5和我国的通信行业标准YD/T 984-1998(后文简称行业标准)所建议使用的雨衰量估算步骤大致为:估算降雨高度并求出电波穿越雨区的斜距,查出当地的降雨强度并据此求得单位路程的雨衰率,由电波穿越雨区的水平距离(和降雨强度)算出路程缩短因子,雨衰率、斜距和缩短因子的乘积即为所求的雨衰量。

由于估算和预测雨衰量时所用的统计数据 and 计算模型并不是放之四海而皆准的,估算结果难免会有偏差。ITU-R建议P.618-5指出,建议中所用方法的预测结果可被接受,但与测试结果相比,纬度高于30°地区的标准偏差约为35%。一般而言,低纬度地区的预测偏差将更大。

2 雨衰估算方法的发展和演变

对雨衰及其估算方法的报告和建议被收录在原CCIR文件全集(Plenary assembly)的第五卷、以及ITU-R的建议中。跟踪比较雨衰估算方法的前后版本可发现,部分计算模型和公式在二十多年中经过反复修改,前后差别相当大。由于雨衰量是几个因数的乘积,每个因数的错误都会对估算结果的准确性产生很大的影响。

2.1 降雨高度

降雨高度的估算公式是以所在地纬度为变量的分段函数。在1974年的CCIR

报告563中只列举了一些测试数据,并没有提出计算公式。1978年以后,前后出现过五种公式。表1为按不同公式算出的北纬0到70度的降雨高度。其中,方法一至现行标准取自CCIR报告563的前后版本,现行标准已为我国的通信行业所采用,最后一种取自1997年的ITU-R建议P.839-1。对比表中的计算结果可发现,从赤道到北纬35度的计算结果出入较大,其雨高变化趋势也各不相同。前几种雨高模型的轻易被推翻似乎预示着现行的方法也未必合理。

雨高公式所求的是大气冰点的高度,或液态雨滴可能存在的最大高度。实际上,降雨高度未必与大气冰点的高度相等。一方面,有证据表明,超冰雨滴可能存在于冰点高度之上,雷达测试结果也显示暴雨的最大降雨高度相对较高。有专家建议,以大气冰点高度作为雨高的条件为降雨量时间概率高于1%的情况,而0.001%时间概率的雨高应改为温度相当于-5°C的大气高度。大气温度随高度上升而降低的变化率约为6°C/km。这也许按建议P.839-1公式算出的低纬度雨高比以前的数据高1公里以上的原因之一。另一方面,雨滴未必都从其可能存在的最大高度开始降落。气象学专著介绍,短时间的暴雨多出于纵向高而横向窄的积雨云,雨量中到大的持续降雨则多出于距地面数百米至二千米的雨层云。因此,实际的降雨高度往往远低于大气冰点的高度。雨高的初始定义为夏季的平均降雨高度,计算模型却为降雨高度的最大值。倘若始终按最大可能的降雨高

表1 不同雨高公式的计算结果对照表

北 纬 (度)	降雨高度(公里)				
	方法一	方法二	方法三	现行标准	Rec. P.839
70	1.4	1.4	1.5	1.5	1.5
60	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
50	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
45	3.4	3.4	3.3	3.3	3.4
40	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7
35	4.0	3.6	4.0	4.0	4.1
30	4.3	3.5	4.0	3.8	4.5
25	4.5	3.2	4.0	3.7	4.9
20	4.7	2.8	4.0	3.6	5.0
15	4.8	2.9	4.0	3.4	5.0
10	4.9	3.0	4.0	3.3	5.0
0	5.0	3.0	4.0	3.0	5.0

度计算雨衰,有可能使计算结果超出实际水平。此外,平均冰点高度的模型也不尽合理。在表1中,我国青藏高原所在的北纬30度附近的计算结果在4.5公里以下。从降雨高度不应普遍低于当地的海拔高度考虑,或许有必要将海拔高度的因素加入雨高计算公式中。

2.2 降雨强度和雨衰率

降雨强度是时间统计量,它表示某地在平均年度的特定时间百分数中将要超过的降雨率。降雨强度的单位为mm/h,其量度为以特定强度持续降雨一小时的雨量。大雨和暴雨的持续时间相对较短,降雨强度在短时间内变化频繁。在相同的时间段中,以小时为单位和以分钟为单位测得的最大降雨强度是不同的。统计降雨强度时所用的雨量数据应以分钟为单位。由于气象部门测量降雨数据的时间单位通常为十分钟甚至更长,为此,在利用气象数据统计降雨强度时,需用特定的公式将十分钟或更长时间的降雨数据转换为分钟降雨数据。在降雨强度的测量和统计方面,原电子部的电波传播研究所作了大量的工作。

估算雨衰时应尽可能利用当地现有的降雨强度数据。在得不到相关数据时,可从雨区划分图中查出当地所属的雨区类别,再从降雨强度表中查出相应时间百分数的该雨区降雨强度。ITU-R建议中的雨区划分图比较粗糙,而且在以后的20多年中,仅对中国的雨区分布作过修改。行业标准还提供了更为详细的中国雨区分布图。ITU-R建议对中国雨区图中的修改,以及稍晚在行业标准中公布的中国雨区分布图应该出自我国的同一个部门。但不知为何,两图在中国东南部的N区分布上差别很大,使用中令人难作取舍。

雨衰率是单位路程上的降雨衰减量,其单位为dB/km,它由降雨强度和电波的

频率极化所决定。雨衰率的计算公式以及降雨强度与雨衰率关系图最早出现在1974年的CCIR报告233-3中。CCIR报告721补充了用于雨衰率计算的频率相关系数表,报告721-2完善了雨衰率关系图。不知为何原因,ITU-R建议P.838将方便而实用的雨衰率关系图排斥在外。

2.3 电波穿越斜距和路程缩短因子

电波在雨区中的倾斜穿越距离可由当地的实际雨高(降雨高度与海拔高度的差值)通过三角关系式求得。应该注意的是,降雨衰耗并不等于雨衰率与穿越斜距的乘积。这是因为穿越斜距为电波穿过雨区的最大可能长度,其间未必全程降雨,而部分降雨区间的降雨强度也可能低于计算值,为此,雨衰的计算因式中引入了一个路程缩短因子。

路程缩短因子的计算公式也经过多次修改。早期的公式中只考虑电波穿越斜距在水平方向上的投影距离。降雨高度越高,天线仰角越低,水平投影距离就越长,相应的路程缩短因子也就越小。其物理解释为,水平投影距离越长,穿越斜距中落在雨团外的比例就越大。最新的计算公式还考虑了降雨强度的影响。降雨强度越高,路程缩短因子就越小。其解释为,降雨强度越高,雨区在水平方向上的分布就越窄,整段穿越斜距中被该强度雨区所笼罩部分的比例也就越小。表2用于比较按不同公式和参数算出的缩短因子和雨衰路程(穿越斜距与缩短因子的乘积)。表中的天线仰角均设为20°。方法一和三取自80年代的CCIR报告564,标有雨区D、K和N的一系列数据的计算公式为行业标准和ITU-R建议P.618-5所采用。由表中数据可发现,水平投影短且降雨强度低时的缩短因子约为0.9,而水平投影长且降雨强度高时的缩短因

子可小至0.4,其变化趋势符合上文的介绍。

3 降雨衰耗的估算

本节介绍降雨衰耗的估算步骤和计算公式。为缩短篇幅,本文未收入估算时需要用到的雨区划分图和雨衰率关系图。读者可在3.2节的注1~4中所列的相关文件中找到有关图表,或从笔者的个人网页<http://cttesatcomm.at.china.com>中下载。

3.1 降雨高度及其相关数据

降雨高度 h_R 可用下列二式计算:

$$h_R(\text{km}) = \begin{cases} 3.0 + 0.028\varphi & 0 \leq \varphi \leq 36^\circ \\ 4.0 - 0.075(\varphi - 36) & \varphi > 36^\circ \end{cases} \quad (1)$$

$$h_R(\text{km}) = \begin{cases} 5 & 0 \leq \varphi \leq 23^\circ \\ 5 - 0.075(\varphi - 23) & \varphi > 23^\circ \end{cases} \quad (2)$$

式1和式2分别为行业标准和ITU-R建议P.839-1所建议使用的公式,式中的 φ 为地球站纬度。

天线仰角 $\theta > 5^\circ$ 时,雨区中电波穿越斜距 L_s 的计算公式为:

$$L_s = (h_R - h_s) / \sin\theta \quad (\text{km}) \quad (3)$$

式中的 h_s 为地球站的海拔高度。

在路程缩短因子的计算中需要用到穿越斜距的水平投影距离 L_G ,其算式为

$$L_G = L_s \cos\theta \quad (\text{km}) \quad (4)$$

3.2 降雨强度与雨衰率

通过计算或图上作业,可根据地球站所在地的降雨强度求出相应的雨衰率。如果当地不能提供降雨强度数据,则可

表2 用不同公式求得的缩短因子与雨衰路程对照表

实际雨高 (公里)	缩短因子					雨衰路程(公里)				
	方法一	方法三	D区	K区	N区	方法一	方法三	D区	K区	N区
1.0	0.89	0.89	0.91	0.87	0.75	2.6	2.6	2.6	2.5	2.2
2.0	0.80	0.80	0.83	0.77	0.61	4.7	4.7	4.8	4.5	3.5
3.0	0.73	0.73	0.76	0.69	0.51	6.4	6.4	6.7	6.1	4.4
4.0	0.67	0.67	0.71	0.63	0.43	7.9	7.8	8.3	7.4	5.1
5.0	0.62	0.62	0.66	0.58	0.38	9.1	9.0	9.6	8.4	5.6

表3 降雨强度表

P(%)	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P	Q
1	<0.1	0.5	0.7	2.1	0.6	1.7	3	2	8	1.5	2	4	5	12	24
0.3	0.8	2	2.8	4.5	2.4	4.5	7	4	13	4.2	7	11	15	34	49
0.1	2	3	5	8	6	8	12	10	20	12	15	22	35	65	72
0.03	5	6	9	13	12	15	20	18	28	23	33	40	65	105	96
0.01	8	12	15	19	22	28	30	32	35	42	60	63	95	145	115
0.003	14	21	26	29	41	54	45	55	45	70	105	95	140	200	142
0.001	22	32	42	42	70	78	65	83	55	100	150	120	180	250	170

从雨区划分图^[1]查出当地所属雨区,再从降雨强度表^[2]中查出p%时间的降雨强度R_p。降雨强度表收录了各雨区在时间百分数p从1到0.001的七套降雨强度数据。

雨衰率γ_r可按下式由降雨强度R_p求得:

$$\gamma_r = k(R_p)^\alpha \quad (\text{dB/km}) \quad (5)$$

式中k和α可用频率相关系数表^[3]中的相应数据,按式6和式7计算得到。

$$k = [k_H + k_V + (k_H - k_V)\cos^2\theta\cos 2\tau] / 2 \quad (6)$$

$$\alpha = (k_H\alpha_H + k_V\alpha_V + (k_H\alpha_H - k_V\alpha_V)\cos^2\theta\cos 2\tau) / 2k \quad (7)$$

式6和式7中的θ为天线仰角,τ为相关于水平面的极化倾角。τ可按ITU-R建议791的附录1计算,圆极化时的τ值为45度。式6和式7中,有关cos²θcos2τ一项的三角运算操作性差,对计算结果的影响也很小。因此在实际计算中可以忽略该项cos算式,线极化系数可以直接选用表中的k_H和α_H(水平极化),或k_V和α_V(垂直极化);圆极化的系数因cos2τ=0而只需按前两项计算。

4GHz到150GHz频率范围内的雨衰

表4 频率相关系数表

(GHz)	kH	kV	aH	aV
4	0.000650	0.000591	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	0.01010	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	1.065
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	0.35	0.31	0.939	0.929

率也可直接在雨衰率关系图^[4]中查到。其方法为,在关系图的左列直线上找到降雨强度R_p的所在点,并在右列曲线上找到工作频率和极化的相关点,用直线连接这两点,所作直线与关系图中央线段的交点数据即为待求的雨衰率γ_r。

通过计算和查图方法得到的结果是相同的。频率相关系数表中的数据量较少,如在Ku频段只包含频率为10GHz、12GHz和15GHz的三组数据,其他工作频率的数据需用对数刻度插入法求得。当所需计算的工作频率未列于系数表中时,用插入法计算系数k和α的难度高,不如采用可以直接查出任意频率的雨衰率的图上作业法。

[注1] 雨区划分图见行业标准中的附图9与附图10,或ITU-R建议PN.837-1中的图3。

[注2] 降雨强度表见行业标准中的表2,或ITU-R建议PN.837-1中的表1。

[注3] 频率相关系数表见行业标准中的表3,或ITU-R建议838中的表1。本文中的表四略去了45GHz到400GHz频段的有关数据。

[注4] 雨衰率关系图见CCIR报告721-2中的图2。

3.3 路程缩短因子与雨衰计算结果

路程缩短因子r_p的计算公式如下:

$$r_p = 1 / (1 + L_G / L_0) \quad (8)$$

式中的L₀ = 35exp(-0.015 R_p)。当R_p大于100时,取其值为100,这时的L₀ = 35e^{-1.5}。

平均年度中p%时间可能达到的雨衰量A_p的计算公式为:

$$A_p = \gamma_r L_s r_p \quad (\text{dB}) \quad (9)$$

3.4 不同时间百分数之间的雨衰量换算

由0.01%时间的雨衰量A_{0.01}换算为p%时间的雨衰量A_p的公式为:

$$A_p = 0.12p^{-(0.1546+0.0431\log(p))} A_{0.01} \quad (\text{dB/km}) \quad (10)$$

式中,p为0.001%至1%范围内的任意时间百分数。行业标准与ITU-R建议P.839-1中所用的雨衰量估算方法,均为先求A_{0.01},再按p换算出任意的A_p。

4 估算实例与结果比较

设地球站建于北纬20度,按行业标准中的雨高公式(式1)算出的降雨高度为3.6公里。设天线仰角为66度,地球站海拔为20米,将其代入式3和式4,可以算出L_s与L_G分别为3.9公里和1.6公里。设地球站位于N区,从降雨强度表中可查出p为0.1、0.03和0.01时的降雨强度R_p分别为35、65和95mm/h。欲求15GHz水平极化的雨衰率γ_r,可从雨衰率关系图中查出0.1%、0.03%和0.01%时间的雨衰率分别为2.2、4.6和7.1dB/km。或者,在式5中代入从频率相关系数表中查出的k=0.367和a=1.154,可以算出相应p%时间的三个雨衰率分别为2.22、4.54和7.03dB/km。经比较可知,两种方法的计算结果基本相同,由图上作业产生的误差可被接受。最后,将有关数据代入式8和式9,可得三个不同时间百分数p的路程缩短因子r_p分别为0.93、0.89和0.84,以及相应的雨衰量A_p为8.0、15.7和22.9dB。

上述估算中,p不等于0.01的雨衰量A_p是直接由相应的降雨强度R_p逐步求出的。该方法曾在CCIR的报告被介绍,但未被收入行业标准和ITU-R建议P.839-1。后两个文件都采用先从(下转第32页)

于这类数传的地面接收地球站而言,它们可以期待着,在该接收地球站无法直接接收时,由中继卫星转发其相关卫星所获取的数据,这是卫星用户对中继卫星应用最直截了当的设想(即看得见自己的卫星时,接收自己卫星的数据;看不见自己的卫星时,接收中继卫星转发的数据)。这些地球站都有跟踪卫星的能力,指向静止轨道的中继卫星不成问题。选用X频段,可以使这类地球站不用添置太多的新设备,也不用租用或建设与中继卫星地面控制总站相连的地面通信网,只须进行适量的中频设备改造(包括接收机),就可以实现接收数据的成倍增长。这种模式有利于建成分散式的中继卫星数据管理体系,有利于数据的快速分发和通信资源的节省。当然,有关设备改造问题须仔细论证,本文在此只是提一个想法,另外,X频段的无线电业务频率共用问题也须引起一定的注意:

三是X频段的卫星数传国内已有基础,且经过飞行验证,属于成熟技术,只须对频率范围做相应的较小调整(在X频段范围内的调整),就可以直接上星。采用X频段数传能有效地降低卫星研制难度(相对于Ka频段数传而言),可以使中继卫星研制的难点主要集中到星间链路有效载荷上。

四是X频段的雨衰小,与C频段基本

相当,有利于低仰角工作,对于中继卫星未来的轨位扩展有利。同时,X频段的波束较宽,有利于中继卫星的轨道机动。

当然,从目前的情形看,X频段主要的不足是,频谱带宽不如Ka频段。但是,如果中继卫星的频谱有效需求能在500MHz(单极化)以内,则X频段可以满足要求。另外,频谱的需求与多方面的技术因素有关,如调制方法、频率复用等,若使用双极化复用、高效调制等技术手段,X频段也能满足更大通信容量的需求。

另外,卫星固定业务的规划频段(《无线电规则》附录30B规划,上行:6725~7025MHz、12.75~13.25GHz,下行:4500~4800MHz、11.2~11.45GHz、10.7~10.95GHz)也可以考虑作为中继卫星星地馈线链路的一项选择,选择这些频段都可以有效地降低中继卫星研制的难度,并避免严重的干扰问题。

5 可能影响频段选取的几个其它因素

以上频段选取建议主要是根据业务频率划分及预期干扰等而做出的,并没有考虑到其它因素,另外可能严重影响频段选取的几个因素有:

① 元器件采购问题

是否可以采购到符合上述具体频段的X频段元器件(如高功放、接收机等)对于上述具体频段的选取具有根本的影响。

② 频率划分和频率共用的发展变动情况

目前看起来最合适的频段,不一定在未来若干年后仍是最合适的。随着X频段器件管制的逐步放开,新系统和新业务会不断地在该频段上出现,因此往往会带来一系列的频率划分和频率共用的发展和变动。我们需根据具体情况进行适时的调整,这种调整有时会严重影响到具体频段选取,同时,在现阶段不能准确地预计到这种调整。

③ 国际频率协调情况

对于想要取得合法的国际地位的卫星网络而言,国际频率协调是非常繁琐而困难的。目前,各国根据国际频率协调情况而改变频段选取的例子已越来越多,为了避免造成严重的损失,欧美等发达国家的做法是成立无线电规则和协调小组,在立项前事先进行国际频率协调,视国际频率协调情况而确定具体频段选取。在我国因国际频率协调而改变卫星频率配置的事例也已经发生。由于不能完全准确预期国际频率协调结果,因此,必然带来频段选取的不确定性。

(上接第35页) $R_{0.01}$ 求得 $A_{0.01}$,再换算出 A_p 的方法。按式10可求得 p 为0.1和0.03时的换算因子 $A_p/A_{0.01}$ 分别为0.38和0.65,将它们与 $A_{0.01}=22.9\text{dB}$ 相乘,乘积分别为换算出的雨衰量 $A_{0.1}=8.8\text{dB}$ 和 $A_{0.03}=14.8\text{dB}$ 。应该注意到,用换算方式求得的 A_p (p 不等于0.01)不同于直接估算结果。经过更多的数据对比可发现,当 p 接近于它的最大值1和最小值0.001时,直接估算与间接换算结果的差别更大。其原因在于,给定 p 的换算因子 $A_p/A_{0.01}$ 是与雨区无关的固定值,但不同雨区的 R_p 与 $R_{0.01}$,以及最终求得的 A_p 与 $A_{0.01}$ 之间的比值却并不相同。例如在降雨强度表中,G区和K区的 $R_{0.01}$ 分别为30和42,而这两区的 $R_{0.1}$ 却均为12。若按间接换算法,先分别由两区的 $R_{0.01}$ 算出不同的 $A_{0.01}$,再按统一的换算因子 $A_p/A_{0.01}=0.38$ 换算出相应

的 $A_{0.1}$,则G区和K区的 $A_{0.1}$ 也不相同;但若由 $R_{0.1}=12$ 直接计算 $A_{0.1}$,则这两区的 $A_{0.1}$ 应是相同的。因此,如果认为降雨强度表中时间百分数不等于0.01的降雨强度数据是值得保留和可以使用的话,行业标准与ITU-R建议所用的机械的换算公式就是不完善和可质疑的。

按ITU-R建议P.839-1的雨高公式(式2)算出的雨高为5公里。用直接估算方法和上文中的相同条件可求得,时间百分数 p 为0.1、0.03和0.01的雨衰量 A_p 分别为10.9、21.2和30.3dB。尽管其他的方法和数据都相同,由于分别按行业标准与ITU-R建议的公式算出的雨高相差1.4公里,最终得到的三个雨衰量将分别相差2.9、5.5和7.4dB。由此可见,雨高公式对估算结果的影响不容忽视。行业标准中的雨高公式出自ITU-R建议的前一

个版本,ITU-R建议已修改多年,不知行业标准是亦步亦趋,还是以不变应万变。

5 结束语

降雨衰耗是时间统计值,它不能预测,很难量化。目前所用的雨衰估算方法仍不完善,各个环节的估算公式和统计数据中都可能引入误差。尽管如此,ITU-R建议和我国的通信行业标准所提供的估算方法仍不失为客观实用的标准。由估算结果可知,我国东南部高降雨区的雨衰影响不容忽视。在Ku和Ka频段的卫星和地面微波业务的系统设计中,需要估算当地的雨衰量,以便预留系统余量或考虑其他对策,从而避免或减少由雨衰引起的通信中断。