

# ITU-R 建议中几项电波传播技术模式

张明高

(信息产业部电子第二十二研究所, 山东 青岛 266071)

**[摘要]** 文章介绍 ITU-R 建议中五项电波传播技术模式的研究情况。它包括对流层散射传输损耗统计预测方法、海事卫星移动通信海面反射衰落预测方法、电离层闪烁衰落换算方法、大气衰减简易预测方法和陆地移动通信场强预测方法。

**[关键词]** 电波传播; 对流层散射; 海面反射; 电离层闪烁; 大气衰减

## 1 引言

信息产业部电子第二十二研究所为各种无线电工程建立了一系列重要的电波传播技术模式, 其中有五项技术模式被 ITU-R 纳入有关建议, 供国际通用。这五项技术模式是由笔者研究提出的, 其中, 有三项取代了原有的国际权威性的国外模式, 一项是首次在国际上提出的, 另一项是对原有模式的重要改进。

## 2 对流层散射传输损耗统计预测方法的研究

在国内早期对流层散射通信系统设计中, 一般综合采用国外的传输损耗统计预测方法, 并尽可能寻找相应的实测数据进行检验。国外方法包括美国、法国、原苏联和日本等国方法。美国方法也有很多种, 其中最具权威性的是 NBS 方法, 它是由美国四位电波传播权威首先根据理论和美国实验数据提出, 然后又利用其它许多国家的实验数据进行修正而得到的。但是, 笔者通过比较发现, 国内实验数据往往与 NBS 方法预测结果相差较大。通过分析, 其原因有二: 一是中、美两国在与对流层散射有关的气候条件方面有区别, 二是 NBS 方法在

理论和技术上还有一定局限性。一方面, 传播机制仅限于湍流散射, 而且大气结构参数固定; 另一方面, 作为基础的传输损耗曲线都是事先通过机械的计算得到的, 事后即使想结合实验数据统一调整大气结构参数也不可能, 因而只能逐个气候区、逐段距离地进行修正, 这种修正并不足以反映大气结构参数的全部影响。

笔者对各种对流层散射传播机理进行了总结, 并在综合分析的基础上提出了广义散射截面模型。已有的对流层散射传播机理有多种, 综合为湍流散射、中小尺度层结的非相干反射和大尺度渐变层结的相干反射三种。以往的作者各执一端, 但实际上三种机理都可能单独或同时存在。广义散射截面模型综合反映了各种可能情况, 其形式为

$$\sigma = A\lambda^n\theta^{-m}e^{-\gamma h}$$

其中,  $\lambda$  为波长,  $\theta$  为散射角,  $h$  为高度,  $A$  为气候气象参数,  $n$ 、 $m$  为大气结构参数,  $\gamma$  为高度分布指数。当  $n = m - 4$  时,  $\sigma$  蜕化为湍流散射形式。当  $m = 4$ 、 $n = 1$  或  $n = 0$  时,  $\sigma$  蜕化为中小层结非相干反射形式。当  $m = 6$ 、 $n = 2$  时,  $\sigma$  蜕化为大尺度层结反射形式。参数  $A$ 、 $n$ 、 $m$  和  $\gamma$  在推导出传输损耗理论形式后由实验数据统一确定。

对流层散射传输损耗是个随机量, 必须采取统

计预测方法,即按要求的概率(通常为时间百分数)预断。一定出现概率的传输损耗,通常表示为传输损耗中值与该出现概率相应的衰落深度之和。传输损耗中值由双基地雷达方程确定:

$$L_m = B \int_V \frac{g_1 g_2 k_1 k_2 \sigma}{(r_1 r_2)^2} dV$$

其中:  $B$  为待定常数,  $g_1$ 、 $g_2$  分别为发射、接收天线方向性函数,  $k_1$ 、 $k_2$  分别为发射点和接收点与散射体积元  $dV$  间的地反射因子,  $\sigma$  为散射截面,  $r_1$ 、 $r_2$  分别为发射点和接收点到散射体积元间的距离,  $V$  为公共体积,即发射天线和接收天线的波束交叉区。在已往有些作品中,上述体积积分中的被积函数仅取公共体积中点的值,这虽然使计算十分简单,但误差很大,所以在实际中并不采用。而在实用模式研究中,上述体积积分的具体计算是一项有难度的工作。在 NBS 模式的研究和其它一些作品中,上述体积积分按直角坐标下的三重积分计算。在这种情况下,三重积分很难以足够的精度近似处理为三个单积分之积,所以 NBS 模式中的传输损耗中值只能以数字积分结果以一系列曲线给出,其中,所有的大气结构参数全被固定,而不是可以调整的待定参数。与此不同,笔者采取了一种由发射端、接收端仰角和接收端方位角组成的特殊坐标系。在这种坐标系中,上述体积积分以足够的精度近似为三个单积分之积,从而得到了传输损耗中值的解析型一般理论形式,其中所有大气结构参数等均保持待定。随后,笔者利用国内对流层散射传播实验数据和相应的气象数据对气候气象和大气结构等参数作了订正,同时通过对衰落深度与超视线距离、地面折射率季变化量间的回归分析得到了衰落深度模式,从而形成了一套比较完整的对流层散射传输损耗统计预测方法。此方法是笔者专著《对流层散射传播》中的重要内容。自此以后,国内的对流层散射通信系统设计均用此方法。

上述的对流层散射传输损耗统计预测方法,于 1977 年被 CCIR (ITU-R 前身) 采纳于 238 号报告中<sup>[1]</sup>。但 NBS 方法仍然是国际上的权威性方法,列为 238 报告中的首要技术模式。后经英国专家组检验表明,笔者方法与西北欧等地区的实验数据也相当吻合,但美国专家组列举热带、亚热带地区数据进行检验表明,此方法并不适合热带、亚热带地区。在这些检验中,世界各地的对流层散射历史数据一批批地披露出来,最终形成了全球对流层散射

数据库。利用这一数据库,笔者进一步对全球各地的气候特点及其对对流层散射传播的影响进行了分析,从而分气候区分别订正了对流层散射传输损耗中的气候气象和大气结构参数,同时分别分析了各气候区的衰落深度与公共体积高度、地面折射率季变化量及频率间的优化关系,从而得到了全球适用型对流层散射传输损耗统计预测方法。其中,主要传输损耗模式为

$$L(q) = M + 30 \lg f + 10 \lg d + 30 \lg \theta + L_N + L_c - G_t - G_r - Y(q)$$

其中,  $L(q)$  为出现概率为  $(100 - q)\%$  的传输损耗,  $M$  为气候气象因子,  $d$  为路径长度,  $f$  为工作频率,  $\theta$  为散射角,  $L_N$  为公共体积高度因子,

$$L_N = 20 \lg(5 + \gamma H) + 4.34 \gamma h$$

$\gamma$  为高度分布指数,  $H$ 、 $h$  分别为公共体积相对于收发端连线和地面的高度,  $L_c$  为口面介质耦合损耗,

$$L_c = 0.07 \exp\{0.055(G_t + G_r)\}$$

$G_t$ 、 $G_r$  分别为发射、接收天线增益,  $Y(q)$  为出现概率为  $(100 - q)\%$  的衰落深度,

$$Y(q) = c(q) Y(90)$$

$c(q)$  为对数正态分布的逆函数。 $M$ 、 $\gamma$  两参数和  $Y(90)$  与公共体积高度等的关系对七个气候区分别给出。

上述方法与 NBS 方法相比有如下优点:

a. 更加科学 NBS 方法仅局限于湍流散射机理,大气结构参数等预先固定,对各气候区均用一套固定模式,然后按等效距离进行误差修正,既机械、繁琐、随意、又不准确。笔者的方法适于各种可能的传播机理,大气结构参数等可以统一由各气候区实验数据确定,既灵活,又准确。

b. 简单易用 NBS 方法不仅包括公式,而且依赖大量曲线,其完整版本中的曲线多达 98 条,最简版本中的曲线还有 38 条,使用不便。笔者的方法主要由简单的数学公式组成,使用极其方便。

c. 预测精度高 对照全球对流层散射数据库逐条电路地检验发现,笔者的方法与 NBS 方法的预测误差为:

	中值预测 误差/dB	90%值预测 误差/dB	99%值预测 误差/dB
笔者方法	2.7	4.0	5.1
NBS方法	4.4	5.2	6.8

上面所述的全球适用型对流层散射传输损耗统

计预测方法，于 1987 年提交 CCIR 第三研究组，经过两次中间工作组会议、一次研究组中期会议、一次研究组末期会议的严格审查，美国电信主管部门（NTIA）的挑剔，以及一些国家主管部门对照本国实验数据的认真检验，各国同行权威专家，包括美国专家在内，最终一致公认此方法优于曾在国际上沿用 20 多年的美国 NBS 方法，因此在 1990 年 CCIR 第 17 届全会上被确定为国际通用方法列入 CCIR 238 号报告<sup>[2]</sup>，并于 1992 年形成 CCIR 617-1 建议<sup>[3]</sup>。ITU-R《地面通信电波传播手册》全面评述了此方法的理论基础、技术模式、应用实例及检验结果。

### 3 其它四项国际通用型电波传播技术模式的研究

#### 3.1 海事卫星移动通信海面反射衰落预测方法的研究

在海事卫星移动通信中，由于海面舰载台天线波束都不可能尖锐，由海面反射所产生的多径传播分量很难抑制，特别是在卫星仰角较低的工作区更是如此，因此，海面反射衰落的预测和备裕量设计十分关键。

美、日等国自 1970 年以来对此进行了一系列实验和模式研究，CCIR 680-1 建议采纳了日本的一种简化预测方法。在我国有关卫星移动通信系统论证中，笔者查询了这一方法，但发现一些问题，特别是它主要基于 L 波段实验数据，仅仅适于 L 波段，即 1~2 GHz 频段，而我国有关系统频段并不属于这一频段，为此，笔者带领研究生做了进一步的实用化模式研究。

海面反射衰落是直接波、镜反射波和大量不规则海浪子面的漫反射波相互干涉的结果。直接波和镜反射波是相干分量，漫反射波是非相干分量。如果把相干分量之和看作一个常矢量，非相干分量看作 Rayleigh 矢量，那么，作为常矢量与 Rayleigh 矢量之和，总的场强应服从 Nakagami-Rice 分布，其关键特征是常矢量与 Rayleigh 矢量的平均功率比。实验数据表明，在 L 波段，只要稍有海浪，镜反射分量迅即消失。此时，关键特征主要决定于直接波与漫反射波的平均功率比。在较高频段，情况更应如此。在较低频段，当海浪较大或卫星仰角较高时，情况也应如此。

漫反射波平均功率是利用粗糙面电磁散射理论

进行严格计算得到的。首先，假定海面起伏呈高斯型，基于物理光学近似，得到了散射截面系数  $\sigma_0$ ；然后，根据如下方程计算了归一化漫反射系数：

$$\eta_1 = \int_A \sigma_0 s |R'|^2 G'_r \tan \theta_s d\theta_s d\varphi_s / (4\pi |R|^2 G_r)$$

其中， $s$  为海浪遮蔽函数， $R'$  为反射子面的镜反射系数， $G'_r$  为接收天线在反射方向相对于卫星方向的方向性因子， $\theta_s$  和  $\varphi_s$  为散射角， $A$  为海面， $R$  为平静海面反射系数， $G_r$  为接收天线在平静海面镜反射点方向相对于卫星方向的方向性因子。计算结果表明，只要海面满足粗糙条件，在 0.25~8 GHz 频率范围， $\eta_1$  都可以图 1 中曲线表示。

综合上述研究，得到如下的海面反射衰落预测方法：

- 确定相对于直接波的漫反射平均功率：

$$P_r = G + R + \eta_1$$

其中， $G$  为天线在镜反射点方向相对于卫星方向的增益 (dB)， $R$  为镜反射系数 (dB)， $\eta_1$  由图 1 确定；

- 确定参数  $\alpha = 10^{0.1P_r} / (1 + 10^{0.1P_r})$

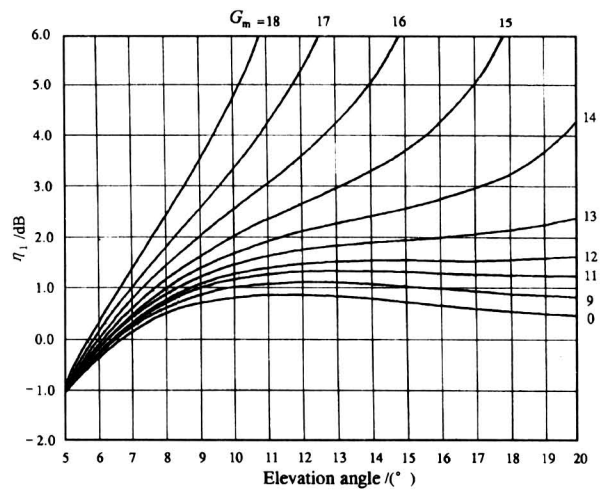


图 1 0.25~8 GHz 范围的归一化漫反射系数  
Fig.1 Normalized diffuse coefficients in the range 0.25~8 GHz

- 由图 2 所示 Nakagami-Rice 分布曲线确定相对于接收场总平均功率的衰落深度  $A$ ；

- 最终确定相对于直接波的衰落深度

$$A_F = A + 10 \lg(1 + 10^{0.1P_r})$$

此方法较之原 ITU-R 方法（日本方法）大大扩展了模式适用范围，即 0.25~8 GHz 范围，

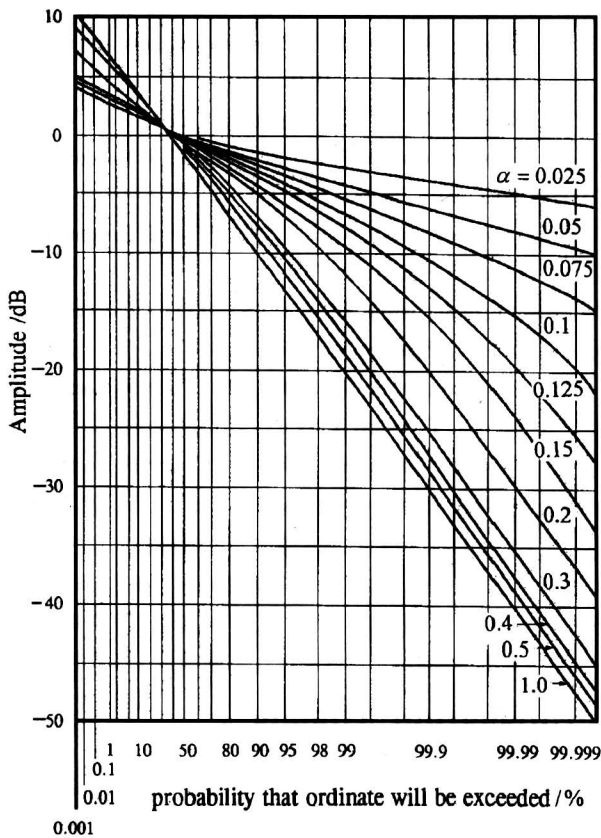


图 2 Nakagami - Rice 分布

Fig.2 Nakagami - Rice distribution

覆盖了目前已经开发和今后相当长一段时间可能开发的海事卫星移动通信频率范围。同时，经检验，此预测方法与国际上已有的在 L 波段近 20 组实验数据的均方根误差仅为 0.69 dB。日本方法的相应均方根误差为 0.94 dB。由于国际上也正在寻求一种扩展适用频率范围的模式，所以，此方法于 1997 年提出后立即取代日本方法，而被列为 ITU-R 680-2 建议首要技术模式<sup>[4]</sup>。

### 3.2 电离层闪烁衰落换算方法研究

在 3 GHz 以下频率的各种卫星业务中，一个共同的重要限制因素是电离层闪烁。它产生于电波在电离层中的传播路径周围电子浓度的小尺度不规则结构引起的前向散射分量对直接波分量的干涉。对此，国内外都做了大量的实验研究。

从卫星通信系统设计角度看，需要有一种能对一个较长时期（如最坏月、最坏年）的电离层闪烁衰落深度进行统计推断的方法，以便能按系统可靠度要求设计衰落备余量。但是，以往仅有大量的电离层信号峰值起伏统计。为此，笔者研究提出了一

种由峰值起伏统计换算电离层闪烁衰落深度统计分布的方法。

电离层闪烁在一次短期事件中已知是服从 Nakagami - m 分布的，其特征参数与闪烁指数  $S_4$  相联系。为了研究上述方法，笔者首先根据比较系统的数据库总结了峰值起伏  $P_{fluc}$  与  $S_4$  的定量关系：

$$P_{fluc} = 27.5 S_4^{1.26}$$

然后，利用全概率公式，得到了所述换算方法：

$$P(I) = \sum_i f_i P_i(I)$$

其中， $I$  为相对于平均值的信号强度或衰落深度， $P(I)$  为衰落深度长期统计分布， $P_i(I)$  为特征参数为  $m_i$  的 Nakagami - m 分布，

$$P_i(I) = \Gamma(m_i, m_i I) / \Gamma(m_i)$$

$$m_i = 1 / S_{4i}^2$$

$$S_{4i} = (\xi_i / 27.5)^{1/1.26}$$

$$f_i = F(\xi_i \leq \xi < \xi_{i+1})$$

$\xi$  为峰值起伏， $\xi_i$  为其第  $i$  个值， $F(\xi)$  为峰值起伏统计分布。

此换算方法于 1998 年提交 ITU-R，经过两次工作组会议和一次研究组会议审查以及会议之间的检验，于 1999 年被批准纳入 ITU-R 531-5 建议<sup>[5]</sup>。这是在国际上首次提出的一种方法。

### 3.3 大气衰减简易预测方法研究

大气衰减是 10 GHz 以上频段所有的地面和空间无线电系统设计都需要考虑的。这种衰减产生于大气分子，主要是氧气和水汽对电波的吸收。大气分子的吸收谱线很多。在 1 000 GHz 以下频段，氧气和水汽有影响的谱线分别有 44 条和 30 条。如果逐线计算大气吸收，那是十分费时的。因此，在工程应用中，一般宜于采用简化算法。

ITU-R 原先采用了英国提出的一种简化算法。该方法极其简便，但只能用于海面标准大气条件，而不能反映温度和气压的影响，因而也不能用于具有一定高度的地面和空间。

笔者提出了另一种简化算法，形式比英国方法较为复杂，但仍然足够简单，并且充分反映了温度、气压和水汽密度的影响，可以足够准确地用于 5 km 以下的各种地面和空间。

英国方法主要是基于对海面标准大气条件下的逐线计算曲线的拟合所得到的。笔者方法主要基于对孤立谱线吸收项简化和 60 GHz 附近氧气吸收带

的吸收曲线的拟合得到的。

笔者方法已于1999年替代英国方法纳入ITU-R 676-4建议。

### 3.4 陆地移动业务场强预测方法改进

笔者利用广州、上海、北京和郑州四个城市及其邻近地区的移动传播实验数据,系统地检验了国际上若干有代表性的陆地移动业务场强预测模式,发现Okumura预测方法对我国城市和郊区是最为适宜的,从而将其选为有关国标的参考基础。

但是,Okumura预测方法是以一系列曲线为基础的。Hata对这些曲线进行了解析拟合,但拟合结果仅适于20 km以内范围。笔者对其中的距离因子进行了指数修正,结果使其适用距离拓展到100 km,并与原Okumura曲线相当吻合。此项修正纳入ITU-R 529-2建议<sup>[7]</sup>。

### 参考文献

- [1] Report 238-3 [R]. Recommendations and Reports of CCIR, Vol. V, 1978
- [2] Report 238-6 [R]. Reports of CCIR, Vol. V, 1990
- [3] Recommendation 617-1 [S]. CCIR Recommendations, RPN Series, 1992
- [4] Recommendation 680-2 [S]. ITU-R Recommendations, P Series, 1997
- [5] Recommendation 531-5 [S]. ITU-R Recommendations, P Series, 1999
- [6] Recommendation 676-4 [S]. ITU-R Recommendations, P Series, 1999
- [7] Recommendation 529-4 [S]. ITU-R Recommendations, P Series, 1995

## Study on Several Radio Propagation Models in ITU-R Recommendations

Zhang Minggao

(China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao, Shandong 266071, China)

**[Abstract]** Studies are presented on five radio propagation models in ITU-R recommendations. The models include statistical prediction method for tropospheric scatter transmission loss, prediction method for sea reflection fading in maritime mobile satellite telecommunications, conversion method for ionospheric scintillation fading, simplified prediction method for attenuation by atmospheric gases and modified prediction method for field strength in land mobile services.

**[Key words]** radio propagation; tropospheric scatter; sea reflection; ionospheric scintillation; attenuation by atmospheric gases

\* \* \* \*

## 《中国工程科学》电子版网址

**[本刊讯]** 《中国工程科学》除相继获得《中国期刊网》、《中国学术期刊(光盘版)》全文收录证书和《中国学术期刊综合评价数据库》、《中国科学引文数据库》来源期刊证书外,《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社为《中国工程科学》提供的电子版专用网址为:

<http://www.chinajournal.net.cn/GCKX.html>

热忱欢迎读者网上浏览《中国工程科学》。