

# 基于 1—10 GHz 空地链路信号的雨强监测方法可行性研究

安豪 严卫<sup>†</sup> 赵现斌 王少波 吕华平

(解放军理工大学气象海洋学院, 南京 211101)

(2013 年 4 月 23 日收到; 2013 年 5 月 23 日收到修改稿)

空地链路上的微波信号受降雨影响, 会产生功率衰减和去极化效应. 基于这些物理特性, 本文提出利用 1—10 GHz 空地链路信号的降雨干扰项获取雨强的方法, 并开展了相关理论研究. 根据空地链路信号与雨滴复杂的相互作用, 研究了空地链路信号频率为 1—10 GHz 时, 雨强 (rain rate,  $R$ ) 对衰减 (attenuation,  $A$ ) 和交叉极化分辨率 (cross-polarization discrimination, XPD) 的影响, 分别建立了  $A$ - $R$  和 XPD- $R$  关系模型. 通过数值模拟, 分别分析了利用上述两个关系模型估测雨强的可行性, 并系统研究了不同频率、极化方式和仰角条件下的适用性. 研究表明, 对于水平极化或圆极化, 且频率较高的空地链路信号, 利用  $A$ - $R$  关系反演强降雨具有理论上的可行性; 对于不同频率和极化方式的信号, XPD- $R$  关系模型都可以用于反演雨强, 并且对于 1—50 mm·h<sup>-1</sup> 范围内的雨强, XPD 较为敏感; 不同仰角条件下,  $A$ - $R$  和 XPD- $R$  模型都适用. 在 4—10 GHz 时, 本文的 XPD- $R$  模型和国际电信联盟 ITU- $R$  中 XPD 预测模型的结果非常接近. 所得出的结论对于下一步开展相关的验证实验, 拓展卫星系统的气象应用, 实时估测降雨强度, 实现全球降雨观测具有重要的参考价值.

**关键词:** 空地链路信号, 雨强, 衰减特性, 交叉极化分辨率 (XPD)

**PACS:** 92.40.eg, 43.35.Bf, 77.22.Ej

**DOI:** 10.7498/aps.62.199201

## 1 引言

降雨是与人类生产生活密切相关的天气现象, 它对人类的经济发展、社会稳定, 乃至生存安全都有着深远的影响. 而降雨强度, 简称雨强, 又称降雨率, 作为降雨的重要参数, 其监测、预报和估算, 不仅对天气现象的研究有重要作用, 也对气象灾害预报、防灾减灾和通信系统补偿等各项工作具有重要意义. 传统上, 人们使用雨量计直接获取单点雨强; 利用地基气象雷达的反射率 ( $Z$ )、差分传播相移 (KDP)、差分反射率因子 (ZDP) 等参数与雨强 ( $R$ ) 的关系, 定量计算探测半径内的雨强<sup>[1-3]</sup>, 利用星载微波成像仪和降雨雷达 (TRMM/PR) 遥感卫星轨道下方降水强度也是近年热点之一<sup>[4]</sup>.

众所周知, 强降水对通信系统有严重影响, 对于空地链路信号也不例外. 降雨对信号的衰减和去

极化效应, 是在通信系统中不容忽视的因素. TAUR (1975) 和 Ali (1986) 的研究表明, 降雨衰减和去极化都与雨强成正相关关系<sup>[5,6]</sup>. 强降雨可以产生较强的衰减, 并且衰减随着微波频率的增高而增大. 降雨衰减和去极化效应对于通信系统具有不利影响, 然而, 可以作为监测降雨的一种信号来源. Messer 等<sup>[7]</sup> 基于现有无线网络信号的功率衰减与雨强的关系, 研究了区域降水强度监测的方法, 但其信号频率都在 10 GHz 以上. Goldshtein 和 Messer<sup>[8]</sup> 利用了国际电信联盟 (ITU) 推荐的降雨衰减与雨强的经验模型, 估算了微波频率为 20 GHz 时信号链路上的平均降雨强度. 李黄利用 Ku 波段通信卫星的降雨衰减对信号链路上的雨强进行了技术研究和实验验证<sup>[9]</sup>. 然而, 系统对 1—10GHz 空地链路信号的功率衰减和去极化效应估测雨强方法的研究还未见报道.

近年来, 通信卫星、导航卫星、气象卫星和侦

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: 18913979082@163.com

察卫星等进入太空进行科学试验和业务应用的数量与日俱增. 空地链路信号频率在 1—10 GHz 之间, 比如 X 波段、C 波段、S 波段、L 波段的卫星逐步增多 [10–12]. 而在空地链路传输过程中, 往往需要采取相关技术抗雨衰、抗降雨去极化效应 [13], 以保障卫星系统有效地、可靠地工作. 本文从空地链路信号与雨滴复杂相互作用出发, 结合雨滴谱分布函数, 分别建立降雨衰减、去极化效应与雨强的关系模型, 系统研究了利用 1—10 GHz 的空地链路信号降雨衰减和去极化效应监测雨强的可行性.

## 2 利用降雨的功率衰减监测雨强

微波频率在 1—10 GHz 时, 云、气溶胶对其衰减较小, 可以忽略不计; 然而, 降雨衰减是明显的, 一般需要考虑 [14]. 微波通过雨区时, 其功率衰减 ( $A$ ) 与雨强 ( $R$ ) 密切相关. 本文首先给出  $A$ - $R$  模型, 并通过数值模拟研究两者的关系, 并对利用该关系估测雨强的可行性和适用范围进行分析.

### 2.1 $A$ - $R$ 关系模型

经过多年的研究, 人们已提出若干被广泛使用的衰减模型. 这些模型包括 Crane 模型、DAH 预测模型、SAM 简单衰减模型和 ITU-R 发布的模型 [15]. 其中, ITU-R 模型的  $\gamma$ - $R$  关系应用最为广泛. 该模型表明, 任一频率的雨衰率可以用雨强的幂函数来表示. 其中, 雨衰率  $\gamma_R$  是指单位路程上的降雨衰减量, 其单位为  $\text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$ , 它由雨强和电波的极化方式所决定. 雨衰率可以按照下式求得:

$$\gamma_R = kR^\alpha, \quad (1)$$

其中, 系数  $k$ ,  $\alpha$  的值和信号的频率、极化方式、相对水平位置的极化斜角以及路径仰角等有关. 对于 1—10 GHz 的频率,  $k$  和  $\alpha$  的值可由文献 [16] 给出.

如果微波通过雨区路径长度为  $L$ , 并且路径范围内的雨强均匀, 那么路径上的降雨衰减为

$$A = \gamma_R \cdot L. \quad (2)$$

将 (1) 代入 (2) 式即得,  $A$ - $R$  的关系:

$$A = kR^\alpha \cdot L. \quad (3)$$

### 2.2 数值模拟与分析

基于  $A$ - $R$  关系模型, 利用仿真模式, 开展利用该关系监测雨强的可行性分析. 该模型中, 降雨衰

减与微波频率、极化方式、雨区路径长度、卫星仰角等因素有关. 重点针对微波频率为 1—10 GHz 时, 不同极化方式和卫星仰角的情况进行研究, 这些研究对于开展验证实验, 进一步挖掘该方法的适用范围和应用价值具有重要意义.

#### 2.2.1 不同极化方式时, $A$ - $R$ 关系的可行性分析

由 (3) 式知, 降雨衰减与雨区路径长度成正比. 雨区路径长度与卫星仰角、降水云底高、降水区域等有关, 可以为几公里到几十公里. 这里取雨区路径长度为 10 km, 卫星仰角为  $0^\circ$ , 微波频率为 1—10 GHz 时, 分别对水平极化、垂直极化、圆极化条件下, 降雨衰减随雨强的变化, 即  $A$ - $R$  关系进行数值模拟. 如图 1 所示.

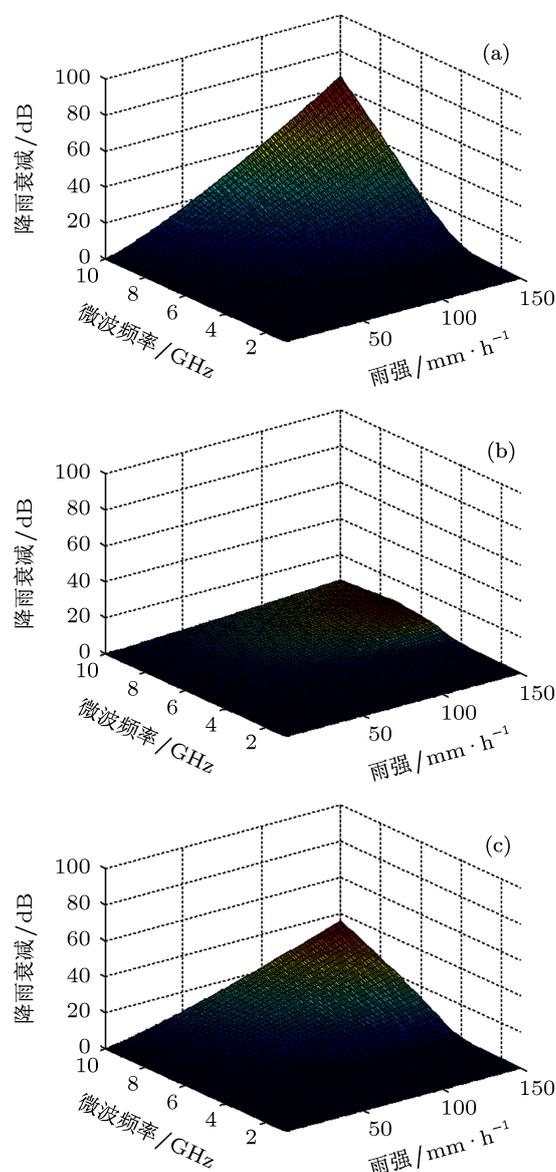


图 1 不同微波频率时,  $A$ - $R$  关系图 (a) 水平极化波; (b) 垂直极化波; (c) 圆极化波

由图 1 可知, 对于不同的微波频率和极化方式,  $A-R$  关系存在一定的差异, 并且图 1(a) 和 (c) 中的差异较为明显. 随着雨强的增大, 以及频率的增加, 衰减  $A$  呈增加趋势. 对于较大的雨强, 在较高的频率时, 降雨衰减较为明显. 相反, 对于较小雨强  $1-50 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ , 降雨衰减对雨强不敏感. 相比较, 垂直极化波的  $A-R$  关系不明显, 不适于反演雨强. 这解释了不少 S 波段、C 波段的卫星选取垂直极化方式的原因. 因此, 对于水平极化或者圆极化且频率较高的空地链路信号, 用  $A-R$  关系反演较强降雨具有理论上的可行性.

### 2.2.2 不同卫星仰角时, $A-R$ 关系的可行性分析

上述  $A-R$  关系的数值计算, 是在卫星仰角为  $0^\circ$  的情况下进行的. 通常情况下, 卫星仰角不是  $0^\circ$ . 而

卫星仰角会影响  $A-R$  关系. 下面对不同卫星仰角情况下, 利用该关系反演雨强的可行性进行分析. 这里选取雨区路径长度为  $10 \text{ km}$ , 极化方式为水平极化, 微波频率分别选取  $4 \text{ GHz}$  和  $8 \text{ GHz}$ , 卫星仰角分别为  $0^\circ, 20^\circ, 40^\circ$  和  $60^\circ$ , 结果如图 2 所示.

图 2(a), (b) 分别显示了微波频率为  $4 \text{ GHz}$  和  $8 \text{ GHz}$  时, 降雨衰减随雨强和仰角的变化关系. 随着仰角的增加, 降雨衰减逐渐减小. 由图 2(a), 不难看出, 在雨强达到  $150 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ , 仰角为  $0^\circ$  时, 降雨衰减非常小, 不超过  $1.2 \text{ dB}$ . 此时, 不适于用来反演雨强. 而图 2(b), 降雨衰减较大, 能够用来反演较大雨强. 通过对比, 既验证了较高的微波频率更容易监测强降雨, 又说明了不同仰角时,  $A-R$  方法也具有可行性.

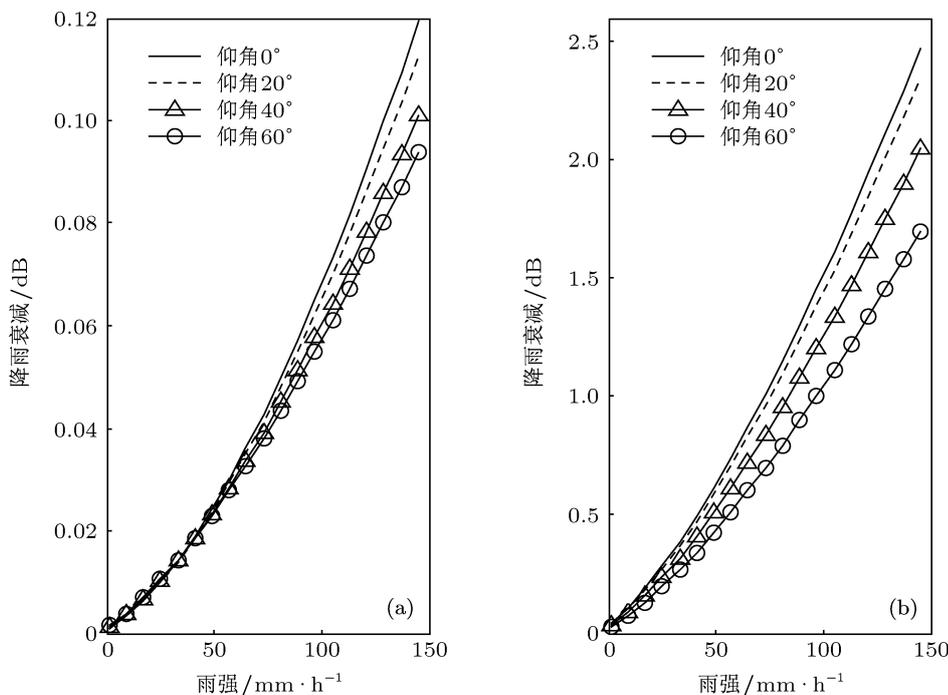


图 2 水平极化时, 降雨衰减随雨强和仰角的变化 (a) 微波频率为  $4 \text{ GHz}$ ; (b) 微波频率为  $8 \text{ GHz}$

## 3 利用降雨的去极化效应监测雨强

### 3.1 机理分析

降雨的去极化效应是由雨滴的非球形造成的. 雨滴半径较小时, 雨滴为球形; 而雨滴较大时, 由

于空气阻力、表面张力的影响, 往往呈现出扁椭球形<sup>[17]</sup>. 由于雨滴模型的数学描述比较复杂, 通常将雨滴近似为扁平的旋转椭球体, 把雨滴的长短轴比值作为雨滴形状的参数进行计算. 长短轴之比的非线性方程为<sup>[17]</sup>

$$\frac{a}{b} = \begin{cases} 1, & r_{\text{eq}} \leq 0.5, \\ 1.0048 + 0.0114 \times \frac{r_{\text{eq}}}{10} - 10.512 \times \left(\frac{r_{\text{eq}}}{10}\right)^2 + 29.456 \times \left(\frac{r_{\text{eq}}}{10}\right)^3 - 26.832 \times \left(\frac{r_{\text{eq}}}{10}\right)^4, & 0.5 < r_{\text{eq}} \leq 4.5, \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $a$  是雨滴短半轴 (cm);  $b$  是雨滴长半轴 (cm);  $r_{\text{eq}}$  是和椭球雨滴等体积的球体等效半径 (cm).

图 3 显示的是根据 (4) 式计算的归一化的扁椭球形雨滴近似模型. 该扁椭球形雨滴和经典的

Pruppacher-Pitter 形雨滴<sup>[17]</sup> 非常接近, 可用于该模型的计算. 另外, 由于空气动力对雨滴的影响, 雨滴的倾角是随机的, 服从一定的分布. 假定雨滴倾角服从高斯分布, 均值为  $\theta_0$ , 标准差为  $\sigma_\theta$ .

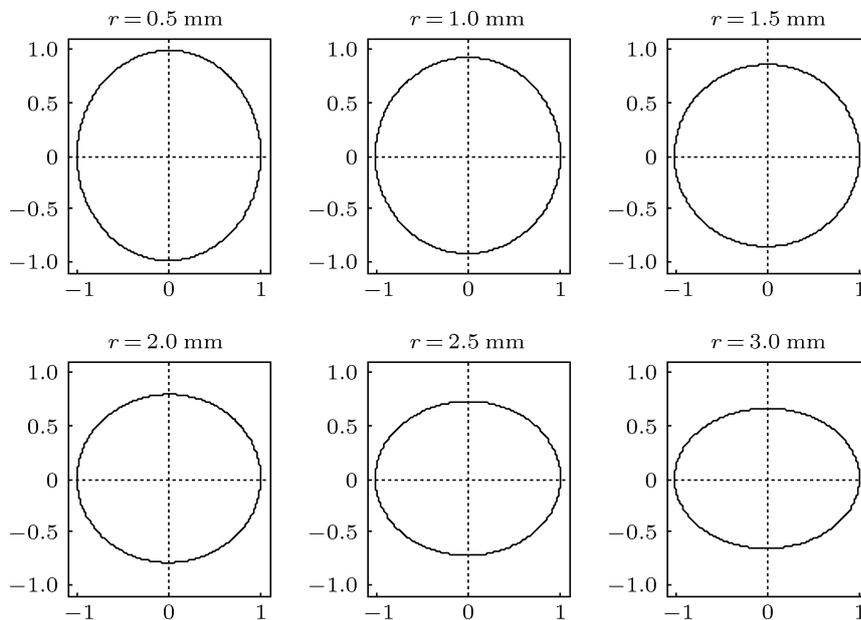


图 3 归一化的扁椭球形雨滴

非球形雨滴对微波的去极化效应, 通常用交叉极化分辨率 (XPD) 度量, 其定义为<sup>[18]</sup>

$$\text{XPD} = 20 \lg \left| \frac{E_{11}}{E_{12}} \right|, \quad (5)$$

其中,  $E_{11}$  为同极化电场强度,  $E_{12}$  为交叉极化电场强度. XPD 的大小与雨强有内在的联系, 需要进行建模分析.

### 3.2 XPD-R 关系模型

根据 XPD 的定义式 (5), 结合微波经过雨区的传输过程, 由文献 [19] 可知, 水平极化波和垂直极化波的 XPD 分别表示为

$$\text{XPD}_h = 20 \lg \left| \frac{G + \tan^2 \phi}{(1 - G) \tan \phi} \right|, \quad (6)$$

$$\text{XPD}_v = 20 \lg \left| \frac{1 + G \tan^2 \phi}{(1 - G) \tan \phi} \right|. \quad (7)$$

也可得出右旋圆极化波和左旋圆极化波的 XPD 为

$$\text{XPD}_R = 20 \lg \left| \frac{(1 + G) e^{2\phi i}}{1 - G} \right|, \quad (8)$$

$$\text{XPD}_L = 20 \lg \left| \frac{(1 + G) e^{-2\phi i}}{1 - G} \right|, \quad (9)$$

其中

$$G = e^{(\lambda_1 - \lambda_2)L}, \quad (10)$$

$L$  为信号穿过雨区的路径长度.  $\phi$  是与雨滴倾角有关的量, 当雨滴倾角变化服从高斯分布时,  $\phi = \theta_0$ , 并且

$$\lambda_1 - \lambda_2 = \frac{-i(k_h - k_v) e^{-2\sigma_\theta^2}}{2}, \quad (11)$$

其中,  $k_h$  和  $k_v$  分别是微波穿过雨区的水平和垂直传播常数,  $k_h - k_v$  是差分传播常数. 传播常数可表示为

$$k_{h,v} = \frac{2\pi}{k} \int f_{h,v}(r_{\text{eq}}, 0) n(r_{\text{eq}}) dr_{\text{eq}}. \quad (12)$$

(12) 式中,  $n(r_{\text{eq}})$  为雨滴谱分布,  $f_h$  和  $f_v$  分别是单一雨滴的水平和垂直方向的前向散射振幅, 可由非球形粒子散射算法求解. 这些算法主要有瑞利近似、边界元法、点匹配法、 $T$  矩阵法和 Fredholm 积分方程<sup>[19-21]</sup>.

目前, 雨滴谱分布主要有 LP, MP, Gamma, JD 和 JT<sup>[22]</sup>. 雨强监测需要雨滴谱分布的精确模型. 雨滴谱和雨强有特定关系的一个模型是由 Marshall 和 Palmer 等提出的负指数模型, 即 MP 雨滴谱分布:

$$N(r) = N_0 \exp(-\Lambda r). \quad (13)$$

其中,  $r$  为雨滴的等效半径 (mm),  $N_0$  和  $\Lambda$  分别为浓度和尺度参数,  $N_0 = 16000 \text{ (m}^{-3}\cdot\text{mm}^{-1}\text{)}$ ,  $\Lambda = 8.2R^{-0.21}$ ,  $R$  为雨强 ( $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ).  $N(r)dr$  表示单位体积内雨滴半径介于  $r-r+dr$  之间的雨滴数目. MP 谱分布具有一般雨滴谱的特点, 应用较为广泛.

### 3.3 数值模拟与分析

基于推导的 XPD- $R$  关系模型, 采用仿真模式, 对利用该模型监测雨强的可行性进行分析. 交叉极化分辨率与雨强、雨滴形状、雨滴谱、微波频率、极化形式、卫星仰角和雨区路径长度等因素有关 [5]. 首先, 根据实际雨滴形状模型和水的相对复介电常数, 利用非球形粒子散射算法计算单一雨滴的前向散射极化特性; 并结合雨滴谱分布模型, 计算群雨滴的前向散射极化特性, 数值模拟 XPD- $R$  关系. 其次, 对不同极化方式的情况进行数值模拟, 并和国际电信联盟推荐 (ITU- $R$ ) 的 XPD 预测模型结果进行对比分析. 最后, 研究不同卫星仰角时该方法反演雨强的可行性.

#### 3.3.1 相对复介电常数

降雨传播特性的计算与水的复介电特性密切相关, 液态水的复介电特性是计算雨滴散射特性的基础, 其通常用相对复介电常数 ( $\epsilon = \epsilon' - i\epsilon''$ ) 表示. 在计算雨滴散射特性中, 最常用的为 Ray [23] 经验公式, 它是 Ray 研究了许多试验结果后, 得到的与实验结果相符的经验公式, 其形式为:

$$\epsilon' = \epsilon_\infty + \frac{(\epsilon_s - \epsilon_\infty) \left[ 1 + \left( \frac{\lambda_s}{\lambda} \right)^{1-\alpha} \sin \left( \frac{\alpha\pi}{2} \right) \right]}{1 + 2 \left( \frac{\lambda_s}{\lambda} \right)^{1-\alpha} \sin \left( \frac{\alpha\pi}{2} \right) + \left( \frac{\lambda_s}{\lambda} \right)^{2(1-\alpha)}}, \quad (14)$$

$$\epsilon'' = \frac{(\epsilon_s - \epsilon_\infty) \left( \frac{\lambda_s}{\lambda} \right)^{1-\alpha} \cos \left( \frac{\alpha\pi}{2} \right)}{1 + 2 \left( \frac{\lambda_s}{\lambda} \right)^{1-\alpha} \sin \left( \frac{\alpha\pi}{2} \right) + \left( \frac{\lambda_s}{\lambda} \right)^{2(1-\alpha)}} + \frac{\sigma\lambda}{18.8496 \times 10^{10}}, \quad (15)$$

其中的参数为

$$\sigma = 12.5664 \times 10^8, \quad (16)$$

$$\epsilon_s = 78.54 [1 - 4.579 \times 10^{-3}(t - 25) + 1.19 \times 10^{-5}(t - 25)^2 - 2.8 \times 10^{-8}(t - 25)^3], \quad (17)$$

$$\epsilon_\infty = 5.27134 + 2.16474 \times 10^{-2}t$$

$$- 1.31198 \times 10^{-3}t^2, \quad (18)$$

$$\alpha = \frac{16.8129}{t + 273} + 6.09265 \times 10^{-2}. \quad (19)$$

(14) 和 (15) 式中  $\lambda$  为工作波长 (cm),  $t$  为温度 ( $^\circ\text{C}$ ), 该公式适用范围为  $-20\text{ }^\circ\text{C}$  到  $50\text{ }^\circ\text{C}$  的温度. 计算降雨传播特性时通常使用 Ray 经验公式, 上述国际电信联盟 ITU- $R$  的雨衰模式即是利用 Ray 经验公式得到的 [24].

#### 3.3.2 不同极化方式时, XPD- $R$ 关系的可行性分析

由 3.2 知, 交叉极化分辨率 XPD 通过 (10)—(13) 式与雨强  $R$  建立了数学关系. 假设雨滴的倾角分布的均值为  $7.2^\circ$ , 标准差为  $33^\circ$  [25]. 微波频率为  $1\text{—}10\text{ GHz}$ , 此时其波长远大于雨滴半径, 可采用瑞利近似方法计算非球形雨滴散射 [18]. 雨滴温度选为  $20^\circ$ . 由于右旋圆极化和左旋圆极化的情况类似, 选取右旋圆极化进行分析. 卫星仰角为  $0^\circ$ , 雨区路径长度为  $10\text{ km}$  时, 水平极化、垂直极化、右旋圆极化波的 XPD- $R$  关系如图 4.

#### 3.3.3 结果分析

由图 4 可知, 在特定的频率、特定的极化方式下, 信号经过雨区后 XPD 随着雨强的增大逐渐减小. 这是由于随着雨强的增大, 雨滴对信号产生的散射较强, 产生的交叉极化量较强, 从而使同极化分量较弱, 最终使得 XPD 逐渐减小. 仔细观察, 可以发现在雨强为  $1\text{—}50\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$  时, XPD 对雨强较为敏感, 而该范围内的雨强是实际中通常出现的雨强. 对于特大的雨强  $50\text{—}150\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ , XPD 对其分辨力较低. 因此, 对于  $1\text{—}50\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$  范围内的雨强, 利用该方法估测的雨强精度会高一些.

还可以看出, 同一极化方式, 随着频率的增大, XPD 的值逐渐变小. 这是因为频率越大, 波长越小, 和雨滴的尺寸越接近, 使得散射越强, 损失的能量较多, 导致接收到的同极化分量较弱, 而产生的交叉极化分量较强, 最终使 XPD 变小. 通过对三种极化方式的情况进行对比分析发现, 垂直极化波对强降雨的分辨率明显比水平极化波和右旋圆极化波的分辨率要高, 这可能和强降雨中半径较大的扁椭球形雨滴数目增多有关.

图 4 说明了 XPD 对雨强是敏感的, 用 XPD 反演雨强是可行的. 然而, 对于 XPD 的计算, 许多学者已进行了研究, 最为著名的是国际电信联盟推荐 (ITU- $R$ ) 的 XPD 预测模型 [26], 它是根据实际测量结果加以总结概括出来的, 具有很强的指导意

义. 但是 ITU-R 中只给出了 4—35 GHz 的经验模型, 没有给出 4 GHz 以下微波的情况. 因此, 这里将 4—10 GHz 的模拟结果和 ITU-R 的经验结果进行对比, 进一步分析本文提出的 XPD-R 方法监测雨强的可信度, 如图 5, 6, 7 所示.

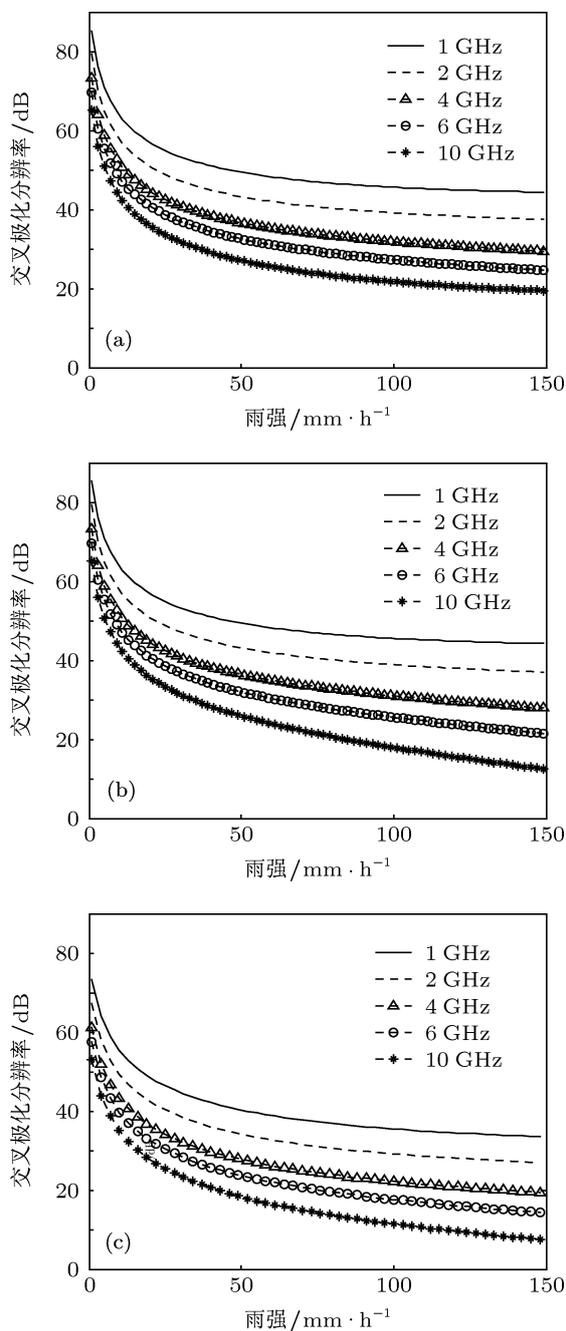


图 4 不同微波频率时, 交叉极化分辨率与雨强的关系 (a) 水平极化波; (b) 垂直极化波; (c) 右旋圆极化波

图 5, 6, 7 分别显示了水平极化波、垂直极化波、右旋圆极化波情况下, 本文模型和经验模型的 XPD-R 关系曲线. 可以直观地发现: 两种模型中, XPD 随微波频率和雨强的变化趋势基本一致.

经计算, 在样本数为 4650 情况下, 水平极化时, 两种模型的相关系数达到 0.9496, 置信水平 95% 的置信区间为 (0.9466, 0.9523); 垂直极化时, 相关系数为 0.8985, 置信水平 95% 的置信区间为 (0.8928, 0.9039); 右旋圆极化时, 相关系数为 0.9752, 置信水平 95% 的置信区间为 (0.9737, 0.9766). 垂直极化波时, 两种模型的相关系数没有达到 0.9, 这是由于本文模型是基于非球形雨滴 (扁平旋转椭球体) 进行分析的, 而 ITU-R 的模型是在球形雨滴的基础上总结出来的 [26]. 通过对比, 充分说明了本文仿真模型结果的可靠性, 也进一步表明了本文推导的 XPD-R 关系反演雨强的可行性.

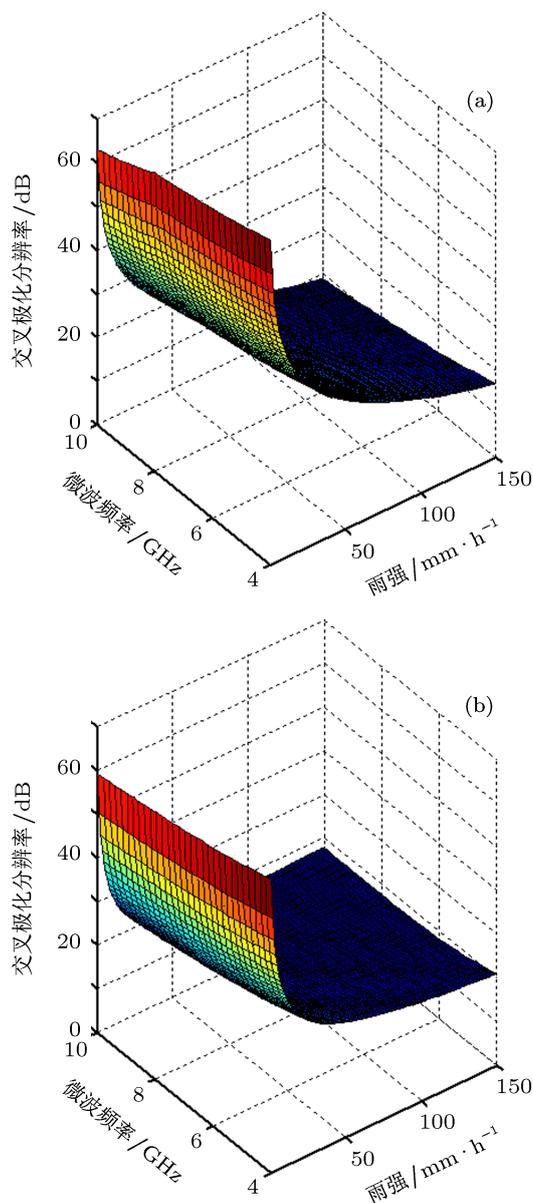


图 5 水平极化波时, 交叉极化分辨率 (XPD) 随雨强和微波频率的变化情况 (a) ITU-R 中经验模型; (b) 本文仿真模型

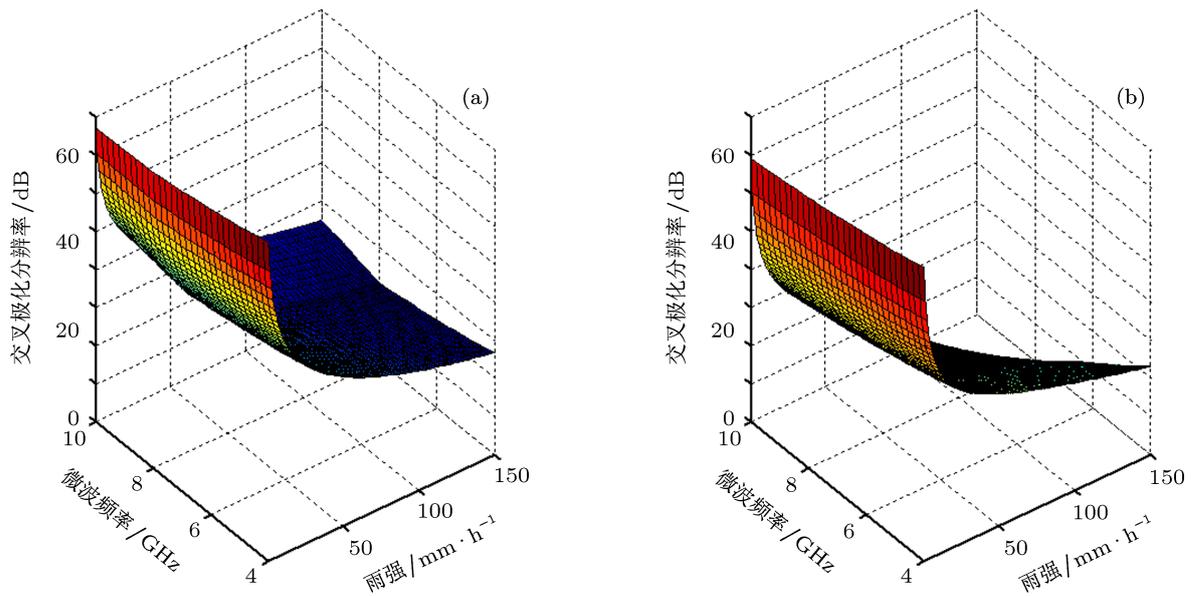


图6 垂直极化波时,交叉极化分辨率(XPD)随雨强和微波频率的变化情况 (a) ITU-R 中经验模型; (b) 本文仿真模型

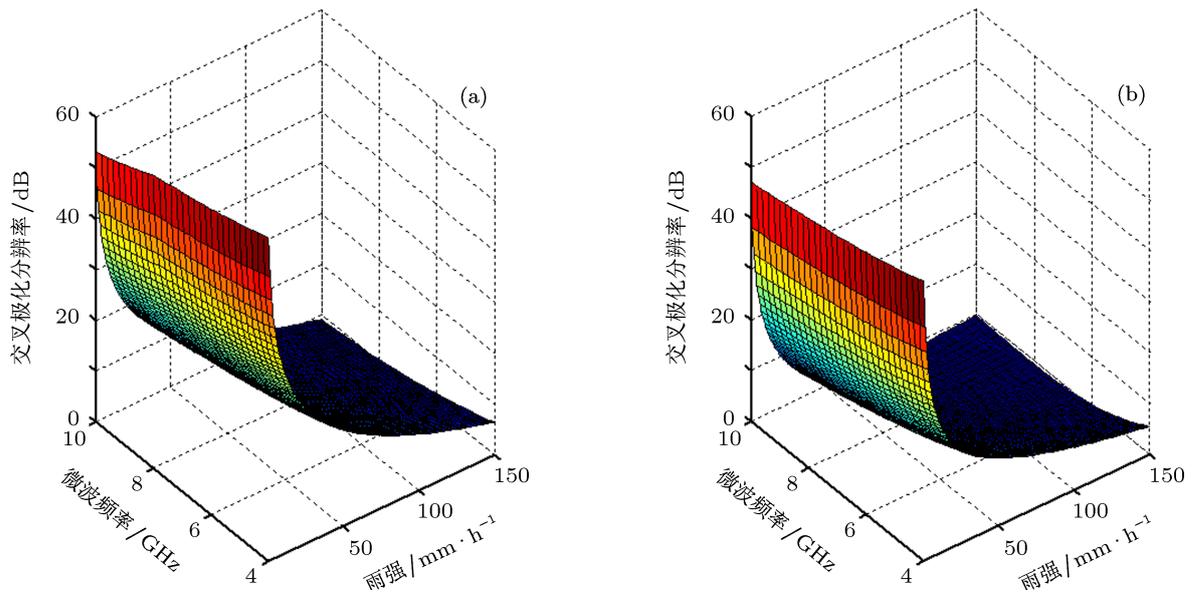


图7 右旋圆极化波时,交叉极化分辨率(XPD)随雨强和微波频率的变化情况 (a) ITU-R 中经验模型; (b) 本文仿真模型

### 3.3.4 不同卫星仰角时, XPD-R 关系的可行性分析

卫星仰角既影响雨区路径长度又影响非球形散射的入射角. 上述仿真, 是在仰角为  $0^\circ$  的情况下进行的. 对于其它仰角的情况, 也需要进行分析. 下面以右旋圆极化波为例进行探讨. 选取雨区路径长度为 10 km, 卫星频率分别选取 2 GHz 和 4 GHz, 卫星仰角分别为  $0^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $60^\circ$  和  $80^\circ$ , 如图 8 所示.

图 8 显示的是在 2 GHz 和 4 GHz 时, XPD 随雨强和仰角的变化趋势. 可以看出, 仰角不同, 其 XPD

值不同; 随着仰角的增加, XPD 一直呈现出上升趋势. 这是因为在雨区范围已知时, 仰角增大使得有效路径减小, 从而使散射作用较弱, 产生的交叉极化分量较小<sup>[21]</sup>. 在仰角为  $0^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $60^\circ$  和  $80^\circ$  的条件下, 分别对图 8(a), (b) 对比发现, 仰角相同时, 微波频率为 4 GHz 的 XPD 低于 2 GHz 的 XPD, 这和上述图 4(c) 的分析结果一致. 图 8 的结果表明了不同仰角情况下, XPD-R 关系的适用性, 进一步增强了该方法的可行性.

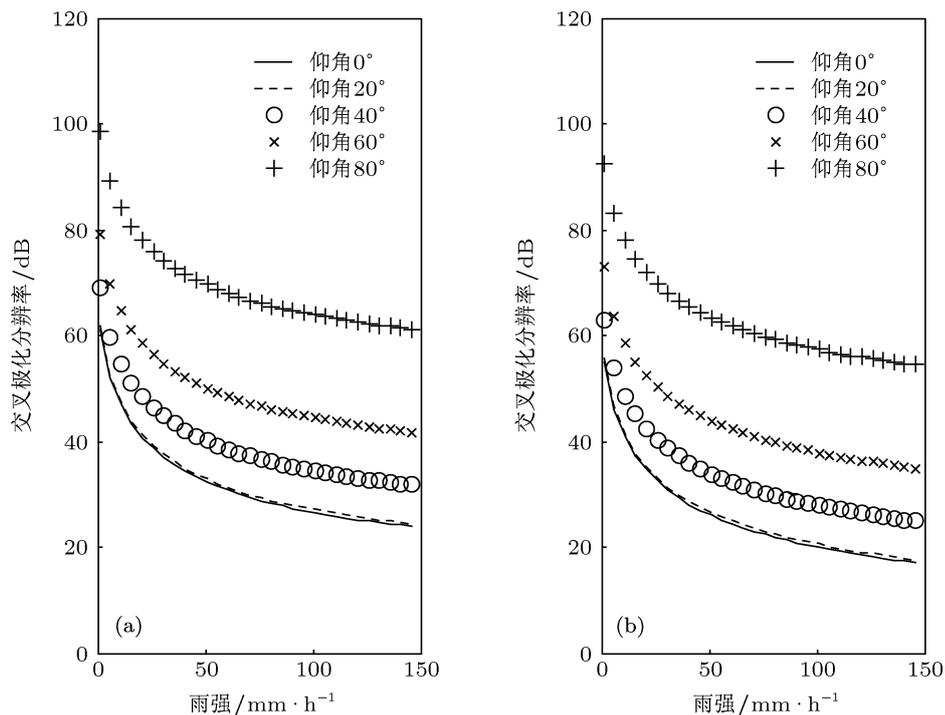


图8 交叉极化分辨率随雨强和仰角的变化 (a) 微波频率为 2 GHz; (b) 微波频率为 4 GHz

#### 4 结论与展望

本文研究了在引入实际雨滴形状和雨滴谱模型的情况下,利用降雨对频率为 1—10 GHz 的空地链路信号的衰减 ( $A$ ) 和交叉极化分辨率 (XPD) 估测雨强的可行性. 首先,利用 ITU 推荐的降雨衰减的预测理论,建立了降雨衰减随雨强变化的  $A$ - $R$  关系模型,并对 1—10 GHz 范围内不同极化方式时该方法的可行性进行了系统分析;研究表明在微波信号频率较高,且为水平极化或圆极化情况下, $A$ - $R$  关系反演较强降雨是可行的. 接着,结合实际的雨滴形状,利用瑞利近似的方法,考虑了群雨滴散射效应,经过数学推导,建立了交叉极化分辨率随雨强变化的 XPD- $R$  关系模型,并分析了该方法反演雨

强的可行性. 最后,利用数值模拟的方法讨论了微波频率、极化方式、仰角对  $A$ - $R$  和 XPD- $R$  关系的影响;另外,分析了在不同仰角情况下两种方法的适用性,进一步说明了其实用性和潜在应用价值.

论文研究结果对于发挥卫星系统的特有优势,发展对地遥感技术,探索区域降水探测新技术具有重要意义. 由于时间限制,文章仅对方法的可行性进行了理论研究,下一步我们将开展多次联合观测实验探索本文的  $A$ - $R$  和 XPD- $R$  关系监测雨强的实用性;并针对某一卫星系统,结合雨量计和气象雷达等其他设备开展区域降水探测针对性研究. 另外,将对文中两种雨强监测方法的精度和适用范围进行对比实验研究.

- [1] Amitai E, Nystuen J A, Liao L 2004 *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* **1** 35
- [2] Zhang G F, Vivekanandan J, Brandes E 2000 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **39** 830
- [3] Matrosov S Y, Kropfli R A, Martner B E, Reinking R F 1998 *Geosci. Remote Sens. Symposium Proceedings* **1** 446
- [4] Jackson C R, Apel J R 2004 *Synthetic Aperture Radar Marine User's Manual* (Washington DC: U.S. Department of Commerce) p355
- [5] Ali A, Hassan M, Alhaider M 1986 *J. Eng. Sci.* **12** 197
- [6] TAUR R R 1975 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **23** 854
- [7] Messer H, Zinevich A, Alpert P 2006 *Sci.* **312** 713
- [8] Goldshtein O, Messer H 2009 *IEEE Trans. Signal Process.* **57** 1616
- [9] Li H 2006 *Journal of Remote Sensing* **10** 568 (in Chinese) [李黄 2006 遥感学报 **10** 568]
- [10] Shen Y M 2005 *Satellite TV & IP Multimedia* **22** 48 (in Chinese) [沈永明 2005 卫星电视与宽带多媒体 **22** 48]
- [11] Zhang X Z, Guo Y C, Chen J L, Yang C J 2012 *Journal of Applied Meteorological Science* **23** 478 (in Chinese) [张秀再, 郭业才, 陈金立, 杨昌军 2012 应用气象学报 **23** 478]
- [12] Hegarty C J 2012 *IEEE International Baltimore MD, May 21–24, 2012*, p1
- [13] Huang J Y, Chen X L, Tang Y D, Wang L M 2002 *Journal of Xidian*

- University 29 733 (in Chinese) [黄际英, 陈新莲, 唐映德, 王兰美 2002 西安电子科技大学学报 (自然科学版) 29 733]
- [14] Rec. ITU-R P840-3 1999
- [15] Shen L H, Li X H 2010 *Communications Technology* 5 79 (in Chinese) [申莉华, 李晓辉 2010 通信技术 5 79]
- [16] Rec. ITU-R P838-3 2005
- [17] Li L W, Kooy P S, Leong M S, Yeo T S, Gao M Z 1995 *IEEE Trans. Antennas Propag.* 43 811
- [18] Flock W L 1987 *Propagation effects on satellite systems for frequencies below 10 GHz NASA Ref. Publ.* p4-42
- [19] Oguchi T 1983 *Proc. IEEE* 71 1029
- [20] Duffo N, Vall-Ilossera M, Camps A, Corbella I, Torres F 2009 *Remote Sens.* 1 107
- [21] Mishchenko M I, Travis L 1998 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* 60 309
- [22] Liu X C, Gao T C, Qin J, Liu L 2010 *Acta Phys. Sin.* 59 2156 (in Chinese) [刘西川, 高太长, 秦建, 刘磊 2010 物理学报 59 2156]
- [23] Ray P S 1972 *Appl. Opt.* 11 1836
- [24] Zhao Z W 2001 *Ph.D. Dissertation* (Xi'an: Xidian University) (in Chinese) [赵振维 2001 博士学位论文 (西安: 西安电子科技大学)]
- [25] Hu T, Song H, Yang J H, Niu Z X, Zhou D F, Rao Y P 2007 *IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications Hangzhou, August 16-76, 2007*, p761
- [26] Rec. ITU-R P.530-9 2001

# Feasibility research on the method of rain rate detection based on space-earth link signals at 1—10 GHz

An Hao Yan Wei<sup>†</sup> Zhao Xian-Bin Wang Shao-Bo Lü Hua-Ping

(College of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China)

(Received 23 April 2013; revised manuscript received 23 May 2013)

## Abstract

Satellite signals across the space-earth link are always seriously affected by rain, inducing attenuation and depolarization. In this paper, two methods of estimating the rain rate are investigated based on the space-earth link signals in a frequency range of 1—10 GHz. Firstly, the effects of rain rate ( $R$ ) on attenuation ( $A$ ) and cross-polarization discrimination (XPD) are studied, according to the complex interaction between signals and raindrops. Then, two relevant models  $A$ - $R$  and XPD- $R$  are established, which are the key techniques to estimate the rain rate. The feasibilities of the above models are analyzed. In addition, their applicabilities at various frequencies, polarization and satellite elevations are also investigated systematically. The results show that for the space-earth link signal with horizontal or circular polarization and higher frequency, the  $A$ - $R$  relation can be used to estimate the heavy rain; for signals with different frequencies and polarizations, XPD- $R$  is suited to estimate various rain rates, especially in a frequency range of 1—50 mm·h<sup>-1</sup>;  $A$ - $R$  and XPD- $R$  are both applicable at different elevations. Moreover, the XPD- $R$  relation is consistent with the prediction model of XPD proposed by ITU at 4—10 GHz. The results obtained in this work will play an important role in the future verification experiment, the nowcasting automatic detection of rain rate and global rain observations.

**Keywords:** space-earth link signals, rain rate, attenuation characteristic, cross-polarization discrimination (XPD)

**PACS:** 92.40.eg, 43.35.Bf, 77.22.Ej

**DOI:** 10.7498/aps.62.199201

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: 18913979082@163.com