

文章编号 1005-0388(2003)03-0328-04

# 沙尘暴对地空路径上 Ka 频段电波传播的影响

徐英霞<sup>1</sup> 杜 延<sup>2</sup> 黄际英<sup>1</sup> 官秀国<sup>1</sup>

(1. 西安电子科技大学理学院, Xia\_xiaor@sohu.com, 陕西 西安 710071;

2. 中国电子科技集团公司第七研究所, 广东 广州 510310)

**摘要** 通过分析陆地上毫米波在沙尘暴中传播时的衰减和交叉极化分辨率, 给出了一定高度毫米波传播的衰减和交叉极化分辨率的计算公式, 并提出了一种计算地空路径沙尘暴衰减和交叉极化分辨率的等效模型。在不同的地球站点、不同的能见度、不同的沙尘粒子含水量、不同的粒径分布下进行了数值计算, 并对结果进行了分析。

**关键词** Ka 波段, 地空路径, 粒径分布, 衰减, 交叉极化分辨率

**中图分类号** O451      **文献标识码** B

## Effect of sand and dust storms on Ka-band electromagnetic wave propagation along earth-space paths

XU Ying-xia<sup>1</sup> DU Yan<sup>2</sup> HUANG Ji-ying<sup>1</sup> GUAN Xiu-guo<sup>1</sup>

(1. School of science, Xidian University, Xia\_xiaor@sohu.com, Xi'an Shanxi

710071, China; 2. The 7<sup>th</sup> Research Institute of Chinese Electric science

and Technique Group corporation, Guangzhou Guangdong 510310, China)

**Abstract** In this paper, the attenuation and XPD of millimeter waves propagating through sand and dust storms along horizontal paths are analyzed, and their expressions suitable to a certain height are presented. A model of attenuation and XPD due to sand and dust storms on earth-space paths is given. Some results with different earth station, visibility, volumetric moisture, and particle size distribution are obtained and discussed.

**Key words** ka-band, earth-space paths, particle size distribution, attenuation, XPD

## 1 引言

由于近二十年来, 卫星通信已经在极其广泛的领域得到应用, 而且随着各种通信业务的不断增加, 对系统容量的要求也越来越大, 因此频率更高、带宽更宽的 Ka 频段日益成为近年来通信领域的重点。

但 Ka 频段也有其自身的特点, 它频率较高, 降雨、浓雾、沙尘暴等因素对电波传播的影响十分明显。

通常, 人们着重考虑的是降雨对卫星通信的影响, 并且在这方面已有了较好的预报模型。但由于近几年沙尘暴天气在我国部分地区频发出现, 因此, 沙尘暴对卫星通信的影响也不可忽视。近年来国内外不少学者已经作了不少有关沙尘暴对陆地通信线路的影响方面的工作, 主要是衰减和交叉极化效应。本文也从这两方面考虑沙尘暴对卫星通信线路(地空路径)的影响。

• 收稿日期: 2002-09-10.

基金项目: 国防科技重点实验室基金资助项目(51473040101DZ0103)

## 2 沙尘暴概况

在气象学中,由大风刮起的能见度在1000m以下弥散在空气中浓密的沙尘,叫沙尘暴。沙尘暴又可以分为沙暴和尘暴两类。沙暴多发生在沙漠地区,是由强风将地面的尘沙吹起使空气浑浊而形成的尘暴是由粒子半径小于60μm的粘土和沙粉组成的,它无明显的上界,高度可达几千米甚至数十千米。

有关沙尘中粒子的粒径分布,国内外学者都作了不少的研究。实际上,离散在空气中的沙尘粒子受到多种因素的制约,包括地面环境、风速以及高度等。一般情况下沙尘粒子的粒径在0.01mm~0.1mm之间。文献[1]中总结了几种不同的分布。本文主要考虑指数分布和对数正态分布,它们分别为:

指数分布:

$$p(a) = \exp(-a/\bar{a})/\bar{a} \quad (1)$$

对数正态分布:

$$p(D) = \exp[-(\ln D - m)^2/2s^2]/\sqrt{2\pi}Ds \quad (2)$$

式中,  $\bar{a}$  为粒子半径的均值,  $m$  和  $s$  为参数  $\ln D$  的均值和方差。

对于粒径尺度参数可根据测量而定<sup>[2]</sup>,本文选取为:黄土,  $m = -3.08$ ,  $s = 0.491$ 。

沙尘粒子的介电常数与很多因素有关<sup>[3][4]</sup>,但尤以含水量( $m_v$ )最明显。本文选取两种情况,  $f = 3.7$  GHz,  $m_v = 0$  时, 干沙的复介电常数 2.53+ $j0.0625$ ;  $m_v = 10\%$  时, 沙尘复介电常数为 4.0+ $j1.3$ 。

## 3 地空路径上沙尘暴产生的衰减

### 3.1 水平路径沙尘暴产生的衰减

由等效介质传播理论,把沙尘等效为一均匀介质,且假定所有粒子半径相同,根据文献[5]可得到如下表达式:

$$\alpha = -\frac{0.6287f}{V_b} a_e \operatorname{Im}\left[\frac{\epsilon_m^* - 1}{\epsilon_m^* + 2}\right] \quad (3)$$

$$\beta = \frac{4.15f}{V_b} a_e \operatorname{Re}\left[\frac{\epsilon_m^* - 1}{\epsilon_m^* + 2}\right] \quad (4a)$$

其中,  $\epsilon_m^*$  为等效介电常数<sup>[6]</sup>。 $\alpha$  是衰减系数,  $\beta$  是相移系数,  $k_0$  为自由空间传播常数。  $a_e$  为粒子等效半径,  $V_b$  为能见度,  $\epsilon_m^*$  为沙尘粒子介电常数。

$$a_e = \frac{\int_{a_{\min}}^{a_{\max}} a^3 p(a) da}{\int_{a_{\min}}^{a_{\max}} a^2 p(a) da} \quad (4b)$$

### 3.2 沙尘暴在地空路径上产生的衰减

#### 3.2.1 经验模型

由于计算地空路径上沙尘暴的影响尚没有实验数据可以借鉴,所以下面的公式仅适用于距地面1~21m的高度。

能见度以及等效粒子半径与高度有关,其关系<sup>[7]</sup>如下:

$$a_e = a_{0e} \left(\frac{h}{h_0}\right)^{-\gamma_e}, \quad \gamma_e = 0.04 \quad (5)$$

$$V_b = V_{b0} \exp[b(h - h_0)], \quad b = 1.25 \quad (6)$$

其中,  $h_0$  为地球站高度,  $V_{b0}$ 、 $a_{0e}$  分别是高度为  $h_0$  时的能见度和等效粒子半径。

将(5)、(6)两式代入(3)式中,得到不同高度处衰减系数的表达式:

$$\alpha(\text{dB/km}) = -\frac{0.6287f}{V_{b0} \exp[b(h - h_0)]} \quad (7)$$

$$a_{0e} \left(\frac{h}{h_0}\right)^{-\gamma_e} \operatorname{Im}\left[\frac{\epsilon_m^* - 1}{\epsilon_m^* + 2}\right] \quad (7)$$

上述(3)、(4a)、(4b)、(7)表达式中,  $V_{b0}$ 、 $h$ 、 $h_0$  的单位取 km,  $f$  的单位取 GHz,  $a_{0e}$  的单位取 mm。

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可如下式表示:

$$A_m = \int_{h_0}^{h_m} \alpha \cdot dh / \sin\theta \quad (8)$$

式中,  $h_0$  为地球站高度,  $h_m = 21$  m,  $\theta$  为地面站天线仰角。如图1所示。

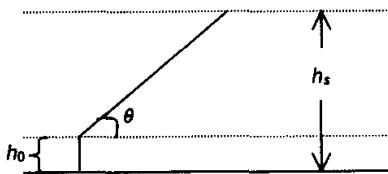


图 1

#### 3.2.2 等效模型

对于地空路径上沙尘暴引起的总衰减量的计算,本文作一等效。取沙尘暴厚度为  $h_s = 2$  km, 计算高度为从  $h_0$  到  $h_s$ 。

具体计算时,分三步:第一步,从  $h_0$  到  $h_m$  采用(8)式求得此段路径上沙尘暴产生的总衰减量  $A_m$ ;第二步,从  $h_m$  到  $h_s$  采用下面(9)式计算;第三步,将前两步的计算结果相加,即得整个路径上沙尘暴引起的总衰减量,如式(10)所示。

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 $h_s$ 处的衰减趋近于0,采用求均值的方法,利用高度 $h_m=21\text{m}$ 处的衰减率 $\alpha_m$ ,计算高度 $h_m$ 到 $h_s$ 的总衰减量 $A_s$ :

$$A_s = \frac{\alpha_m \cdot (h_s - h_m)}{2\sin\theta} \quad (9)$$

$$A = A_m + A_s \quad (10)$$

## 4 沙尘暴引起的交叉极化

### 4.1 经验模型

在沙尘暴发生的恶劣条件下,沙尘粒子形状很不规则,许多时候往往不是球形,而是扁椭球形。两种不同的极化波沿粒子的长轴、短轴的衰减不同,产生差分衰减,同理沿长轴与短轴的相移不同,产生差分相移。并且沙尘暴中粒子的轴相对于垂直方向有一定的取向角,最终沙尘暴与降雨、冰晶一样,引起毫米波在沙尘暴中的交叉极化效应。

粒子的形状和取向是研究交叉极化的前提。本文沿用1987年Ghobrial给出的粒子的近似轴比值, $a:b:c=1:0.75:0.75^2$ 。粒子的取向则采用冰晶的去极化模型,即粒子排列成行理论;尘土粒子的对称轴在空间近似成线性排列,且椭球的最短轴在垂直方向上,另外两轴在水平面内随机取向。

与圆极化波相比,线极化波的去极化现象不是很严重,尤其是在椭球形及上述取向的情况下,交叉极化很小,所以本文只考虑圆极化波的交叉极化效应<sup>[8]</sup>。

在沙尘暴中传播毫米波的差分衰减系数和差分相移系数<sup>[8]</sup>分别为:

$$\Delta\alpha = |\alpha_h - \alpha_v| = 2.099 \times 10^2 \frac{f}{V_b} a_e \\ \left| \frac{1}{2}(L''_1 + L''_2) - L''_3 \right| \cdot \left( \frac{\bar{b}}{a} \right) \cdot \sin^2\phi \quad (11)$$

$$\Delta\beta = |\beta_h - \beta_v| = 1.3848 \times 10^3 \frac{f}{V_b} a_e \\ \left| \frac{1}{2}(L'_1 + L'_2) - L'_3 \right| \cdot \left( \frac{\bar{b}}{a} \right) \cdot \sin\phi \quad (12)$$

式中, $\phi$ 为入射角; $V_b$ 、 $f$ 、 $a_e$ 的单位取km、GHz、m; $a_e$ 、 $V_b$ 如式(5)和(6); $L'_i$ 、 $L''_i$ 如下所示:

$$L'_i = \operatorname{Re} \left[ \frac{1}{A_i + 1/(\epsilon_m^* - 1)} \right], \\ L''_i = \operatorname{Im} \left[ \frac{1}{A_i + 1/(\epsilon_m^* - 1)} \right], \quad (i = 1, 2, 3) \quad (13)$$

其中, $A_1 = 0.243$ , $A_2 = 0.324$ , $A_3 = 0.432$ <sup>[9]</sup>。

圆极化波的交叉极化分辨率为:

$$XPD = 10 \lg \left| \frac{1 + 2m \cos\varphi + m^2}{1 - 2m \cos\varphi + m^2} \right| \quad (14)$$

计算高度从 $h_0$ 到 $h_m$ 的 $XPD_m$ 时, $m$ 和 $\varphi$ 表示为:

$$m = \exp \left( - \int_{h_0}^{h_m} \Delta\alpha \cdot dh \right) \quad (15a)$$

$$\varphi = \int_{h_0}^{h_m} \Delta\beta \cdot dh \quad (15b)$$

上式中, $\Delta\alpha$ 和 $\Delta\beta$ 如式(11)、(12)所示。将(15a)和(15b)代入(14)式,得到高度 $h_0$ 到 $h_m$ 的 $XPD_m$ 。

### 4.2 等效模型

地空路径上沙尘暴引起的XPD的计算方法与总衰减量的计算相似,并且参数取值相同,高度从 $h_0$ 到 $h_s$ 。

具体计算分三步:第一步,从 $h_0$ 到 $h_m$ 采用(14)和(15a)、(15b)式求得此段路径上沙尘暴产生的 $XPD_m$ ;第二步,从 $h_m$ 到 $h_s$ 采用(14)式和下面的(16a)和(16b)式计算;第三步,将前两步的计算结果相加,即得整个路径上沙尘暴引起的XPD,如式(17)所示。

计算高度从 $h_m$ 到 $h_s$ 时, $m$ 和 $\varphi$ 表示为:

$$m = \exp[\Delta\alpha_m \cdot (h_s - h_m)/(2\sin\theta)] \quad (16a)$$

$$\varphi = \Delta\beta_m \cdot (h_s - h_m)/(2\sin\theta) \quad (16b)$$

其中, $\Delta\alpha_m$ 和 $\Delta\beta_m$ 为高度 $h_m$ 处的差分衰减系数和差分相移系数。将(16)式代入(14)式,得到高度 $h_m$ 到 $h_s$ 的 $XPD_s$ 。

$$XPD = XPD_m + XPD_s \quad (17)$$

## 5 计算

### 5.1 衰减率的计算

下面对衰减率的计算利用经验模型中的公式和参数。

图2和图3表示粒径分布为指数分布和对数正

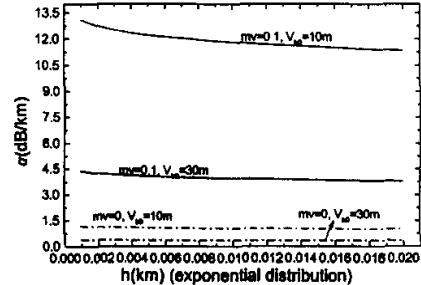


图2 衰减率与高度的变化关系

态分布两种情况下衰减率与高度及能见度的变化关系。很显然,能见度越大,沙尘暴引起的衰减率越小;沙尘粒子含水量越大,衰减率越大;高度越高,衰减率也越小。图中曲线还表明,粒径分布为指数分布的沙尘粒子所产生的衰减率要高于粒径分布为对数正态分布的沙尘粒子所产生的衰减率。

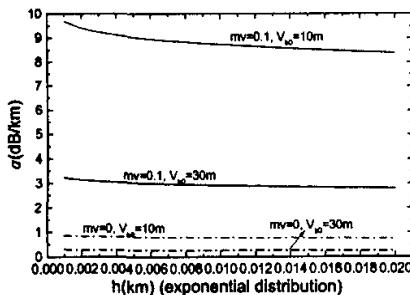


图3 衰减率与高度的变化关系

## 5.2 总衰减量和交叉极化分辨率的计算

以日本1996年2月发射的定点于 $136^{\circ}\text{E}$ 的N-STAR通信卫星为例并结合我国某两个典型地区(纬度分别为 $E_1=43^{\circ}54'$ 和 $E_2=20^{\circ}02'$ ,经度分别为 $\phi_1=125^{\circ}13'$ 和 $\phi_2=110^{\circ}28'$ )所对应之地球站天线仰角( $\theta=38.138^{\circ}, \theta_2=52.75^{\circ}$ ),并且在地球站高度 $h_0$ 处,能见度分别为10m和30m,沙尘厚度为2km。

根据(10)和(18)式,分别对地空路径上沙尘暴引起的总衰减量和XPD进行计算,具体数值见表1。

表1  $f=37\text{GHz}$ 时地空路径上沙尘暴引起的总衰减和XPD

| 天线仰角 $\theta$ | 含水量 $m_v$ | 能见度 $V_m$<br>(m) | 衰减量(dB) |       | XPD(dB) |      |
|---------------|-----------|------------------|---------|-------|---------|------|
|               |           |                  | 对数正态分布  |       | 对数正态分布  |      |
|               |           |                  | 分布      | 分布    | 分布      | 分布   |
| $\theta_1$    | 0         | 10               | 1.21    | 1.97  | 58.8    | 53.5 |
| $\theta_1$    | 0         | 30               | 0.403   | 0.657 | 78      | 72.8 |
| $\theta_1$    | 10%       | 10               | 13.7    | 22.3  | 30.7    | 27.6 |
| $\theta_1$    | 10%       | 30               | 4.57    | 7.44  | 46.4    | 41.6 |
| $\theta_2$    | 0         | 10               | 0.939   | 1.53  | 68.3    | 63.0 |
| $\theta_2$    | 0         | 30               | 0.313   | 0.510 | 87.4    | 82.2 |
| $\theta_2$    | 10%       | 10               | 10.63   | 17.3  | 40.6    | 36.1 |
| $\theta_2$    | 10%       | 30               | 3.54    | 5.77  | 58.8    | 53.7 |

从表1中可以看出,仰角越大,总衰减量越小,XPD越大;能见度越大,总衰减量越小,XPD越大;沙尘粒子含水量越大,总衰减量越大,XPD越小;粒径分布对衰减的影响也很明显。

上述关于衰减以及交叉极化分辨率的计算,只是取了几个特定的例子。对于其它情况,比如高度

$h_0$ 处不同的能见度、不同的频率、不同的介电常数和不同的入射角,都可以参考此例进行计算。

## 6 结论

本文就地空路径上的衰减和交叉极化进行了讨论。从表1中可以看出,在地球站天线仰角为 $38.138^{\circ}$ 、沙尘粒子含水量为10%、高度 $h_0$ 处能见度为10m时,两种粒径分布情况下路径上的总衰减分别可以达到十几个dB和二十几个dB,XPD则可降低到三十几个dB和二十几个dB,从而严重影响了地空路径卫星通信的传输性能。以上研究对于卫星通信系统中抗恶劣气象环境的技术研究具有一定的参考价值。

## 参考文献

- [1] M S Ahmed, MSc. Role of particle-size distributions on millimeter-wave propagation in sand/duststorms [J]. IEEE proceedings-H, 1987, 134(1): 55~59.
- [2] 董庆生,赵振维,丛洪军.沙尘引起的毫米波衰减[J].电波科学学报,1996,11(2):29~32.
- [3] M T Hallikainen, F T Ulaby, M C Dobson. Microwave dielectric behavior of wet soil-Part1: Empirical models and experimental observations [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 1985, 23(1): 25~33.
- [4] M C Dobson, F T Ulaby, M T Hallikainen, and M A El-Rayes. Microwave dielectric behavior of wet soil-Part11: Dielectric mixing models [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 1985, 23(1): 35~46.
- [5] 吴晓梅.沙尘暴对微波、毫米波传播的影响[D].西安:西安电子科技大学,1993.
- [6] 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.
- [7] A S Ahmed, A Ali, and M A Alhaider. Airborne dust size analysis for tropospheric propagation of millimetric waves into dust storms [J]. IEEE Trans on Geosci and Remote sensing, 1987, 25(5): 593~599.
- [8] 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.
- [9] T S Chu. Effects of sand storms on microwave propagation[J]. The Bell System Technical. 1979, 58(2): 549~553.



徐英霞 (1978-),女,山东人,西安电子科技大学硕士生,2000年获理学学士学位,并于同年考入西安电子科技大学攻读硕士学位,主要研究方向为随机介质中微波、毫米波传播与散射。