

文章编号:1001-9014(2007)01-0030-05

# 一种 60GHz 毫米波的四参数模型

张奇, 林如俭, 修明磊

(上海大学通信与信息工程学院, 上海 200072)

**摘要:**在传统毫米波四参数模型的基础上,通过分析 60GHz 毫米波特有的传输特性,运用大、小尺度衰落概念模拟幅值,同时改用延时箱对时延的模拟,构造出符合 60GHz 毫米波特性和复杂度较低、模拟效果较好的时域模型.根据该模型,用 Matlab 进行编程仿真.通过仿真结果的分析,该模型完全符合 60GHz 毫米波的物理传输特性,而且还能较准确地进行统计分析,达到了对 60GHz 毫米波进行快速模拟,快速分析的目的.

**关键词:**60GHz 毫米波;四参数模型;大、小尺度衰落;延迟箱;功率时延谱

**中图分类号:**TN 928 **文献标识码:**A

## MODEL OF 60GHz MILLIMETER WAVE WITH FOUR VARIABLES

ZHANG Qi, LIN Ru-Jian, XIU Ming-Lei

(School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** Based on the traditional four-variable model and the unique characteristics of 60GHz millimeter wave, the large/small scale attenuation was used to simulate the amplitudes and delay bins were used to estimate the delay, thus, a simple and effective millimeter wave model was created, which fits the actual situation well. According to the program float chart, MATLAB was used to simulate and analyze. After the computer simulation, the result shows that this model accurately fits the 60GHz wave transmission characteristics and it can also analyze them statistically.

**Key words:** 60GHz millimeter wave; four-variable model; large/small scale attenuation; delay bins; power delay profile

### 引言

在无线领域,60GHz 已经越来越成为研究的重点.不仅因为 60GHz 毫米波系统的体积小、安全性高,更重要的是这种系统有着极大的传输带宽和较高的传输速率<sup>[1]</sup>.自 2000 年 8 月起,59~66GHz 的频段已开放给公共使用,各种通信系统,只要发送功率不超过 10mW,都不需无线电执照.这意味着 60GHz 通信系统将有着非常巨大的发展空间和潜力<sup>[8]</sup>.

对 60GHz 毫米波的传播特性进行研究是非常有必要的.这将决定系统最大的传输速率、覆盖最大的地理范围以及所能应用于最极限的环境,而这些将成为系统可行性的的重要因素.

60GHz 毫米波有别于其它无线电波的最根本原因是它特有的反射、散射和绕射特性<sup>[1]</sup>.在描述无

线电波的模型中,四参数模型具有简单、高速、较准确、易分析、普适性强等优点而被大量采用并改善.四参数模型首先由 Turin<sup>[2]</sup>构造并运用于 800MHz 室外信道的模拟,然后 Saleh 等人<sup>[3]</sup>又相继改进成适合室内 1.5GHz 的模型.该文虽基于四参数模型,但是摆脱模型对测试环境的依赖,非刻意模拟波簇特性,用固定延迟箱完成过量时延的统计分布,较客观地运用大、小尺度衰落将低频四参数模型移植到 60GHz 毫米波的模拟中去.模型主要得出 60GHz 毫米波的直观传播特性包括:均方根时延扩展(RMS Delay Spread)以及功率时延谱(Power Delay Profile, PDP).

该文的结构如下:自第 2 部分起,介绍 60GHz 四参数模型的构造.第 3 部分主要详细描述编程思想及流程.第 4 部分将讨论模拟结果以及与实际结果的对比.

## 1 60GHz 时域模型构造

本模型以 Saleh 四参数模型为基础,引入大、小尺度衰落进行改进,得到适合 60GHz 毫米波的模型.一般,四参数模型认为,信道的冲激响应模型主要由以下 4 个参数决定: $\{\beta_k\}$ :各路正实数增益; $\tau_k$ :各路传播时延; $\theta_k$ :传输相移; $N$ :总多径分量.

在上述各个变量中,下标  $k$  代表多径成份 (MPC, Multi-path component) 指数.值得注意的是,这些参量都随时间的变化而变化,故它们是时间  $t$  的函数.因此,毫米波的冲激响应为

$$h(t) = \sum_{k=1}^{N(t)} \beta_k e^{j\theta_k} \cdot \delta(t - \tau_k) \quad , \quad (1)$$

上式中  $\delta(\cdot)$  为冲激函数.于是当基带信号为一脉冲,且信号没有重叠,接收端信号  $y(t)$  的功率为

$$\begin{aligned} |y(t)|^2 = G(t) &= \sum_{k=1}^{N(t)} \beta_k^2 p^2(t - \tau_k) \\ &= \sum_{k=1}^{N(t)} \beta_k^2 \delta(t - \tau_k) \quad , \quad (2) \end{aligned}$$

其中  $p(t)$  为基带信号,且  $p(t) = \delta(t)$ .式(2)即为模型需要仿真的功率时延谱.

典型的冲激响应如图 1 所示<sup>[3]</sup>:

理论上,冲激响应是有限个不同幅度、不同时延的脉冲的复制组合与叠加,但从图中可以看出:毫米波的冲激响应信号往往以波簇的形式出现,即波束成簇集中出现在特定时延段.该现象称为“来波成簇”现象.文章[3]对波簇与波束有非常详细的解释和建模.该文基于 Saleh 的四参数模型,但是最大区别在于该模型摒弃了 Saleh 四参数模型中关于波簇、波束的定量描述,而采用大小尺度来计算接收功率(或电平).同时由于测量环境的不同,来波时间的差异将有变化,该文同样改善传统模型中对时延的统计模拟,改用延迟箱计算来波时间.因此,该模型在一定程度上脱离特定环境造成的影响,使模型可以较准确地模拟各种室内环境,增强模型的普适性.

以下采用分大、小尺度平均功率时延谱得出 4 个参数的定量设置.

所谓大尺度功率衰落是指接收信号随着收、发端距离显著变化或接收端环境改变而引起接收平均功率的较明显的上下起伏波动,该现象属于宏观变化,且常常发生于接受者出入房门或在室内、走廊快速移动(这种快速移动造成收发距离在短时间内发生十几甚至几十倍波长量级的变化).小尺度衰落

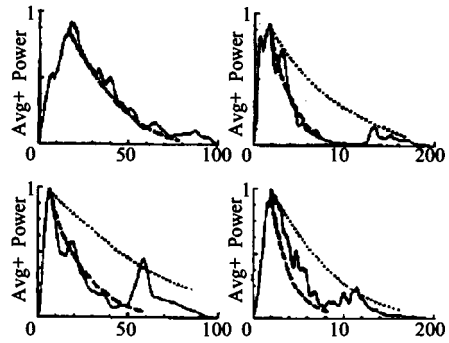


图 1 典型的冲激响应  
Fig. 1 The typical impulse response

则是由收发端间距的细微变化或接收端环境的非显著改变(这种细微改变在距离上约为一个波长量级)引起的.模型的参数从小尺度平均功率时延谱导出.

### • 大尺度衰落模型

该情况下,主要确定表征功率具有显著变化的变量.包括衰减常数  $\gamma$ 、功率比  $r$ 、路径损耗  $PL$  以及接收总功率  $\bar{G}_{tot}$ . 衰减常数  $\gamma$  呈对数正态分布,即:

$$\gamma \sim L_N(\mu_{sdB}, \sigma_{sdB}) \quad . \quad (3)$$

经过实验验证与观测<sup>[4]</sup>,  $\mu_{sdB} = 1.61\text{dB}$ ,  $\sigma_{sdB} = 1.27\text{dB}$ . 根据距离—功率准则:  $\bar{G} \sim d^{-\gamma}$ , 且通过大量数据观测,引入功率比  $r = \frac{\bar{G}_2}{\bar{G}_1} = \frac{\bar{G}_3}{\bar{G}_2} = \dots = \frac{\bar{G}_{i+1}}{\bar{G}_i}$ <sup>①</sup>, 且

有指数关系<sup>[3]</sup>:

$$r = \exp[-\Delta\tau/\Gamma] \quad , \quad (4)$$

其中,  $\Gamma = 60\text{ns}$  为大尺度平均增益衰减常数,表示增益衰减的快慢.  $\Delta\tau$  的意义详见小尺度模型.

路径损耗有如下表达式:

$$PL = \begin{cases} 20.4 \cdot \log_{10}(d/d_0) & d \leq 11\text{m} \\ -56 + 74 \cdot \log_{10}(d/d_0) & d > 11\text{m} \end{cases} \quad , \quad (5)$$

其中,  $d_0$  为参考距离,设为 1m. 因此,受阴影衰落的影响,总增益服从

$$\bar{G}_{tot} \sim L_N(-PL_{dB}, 4.3\text{dB}) \quad . \quad (6)$$

### • 小尺度模型

小尺度模型主要确定在大尺度的条件下,功率在每个细微时刻的数值,即  $G_k$ . 由于采用  $\Delta\tau = 2\text{ns}$  的延时箱<sup>[4,5]</sup>, 因此每一个  $G_k$  都以间隔 2ns 采样模拟. 若实际来波延迟小于 2ns 并考虑到过小的延迟对信号分辨并不造成影响,所以也将所有延时小于 2ns 的来波视为一条波束考虑,并纳入同一延时箱

①  $\bar{G} = \mathbb{E}(G) = \mathbb{E}(\beta^2)$ .  $\mathbb{E}(\cdot)$  是取均值函数.

进行计算. 这样, 时延  $\tau_k = (k - 1) \Delta\tau$ , 而据此测量出的功率时延谱具有小尺度衰落特性, 并将  $G_k$  重新定义为:  $\{G_k^i\}$ , 其中下标  $k$  表示第  $k$  个延时箱表示的延时  $\tau_k$ ,  $i$  表示处于测量网格中第  $i$  个测量点. 此时,  $G_k^i$  服从 Nakagami- $m$  分布<sup>②</sup>, 即:

$$G_k \sim m(\Omega_k, m_k) \quad (7)$$

其中,  $\Omega_k = \bar{G}_k$ ,  $m_k$  为衰落系数, 服从截顶正态分布:  $m \sim N(\mu_m, \sigma_m)$  且  $m \geq 0.5$  . (8)

通过与实验数据的拟合, 得到  $\mu_m, \sigma_m$  的分布分别如下:

$$\mu_m(\tau_k) = 3.5 - \frac{\tau_k}{73} \quad (9)$$

$$\sigma_m^2(\tau_k) = 1.84 - \frac{\tau_k}{160} \quad (10)$$

基于对上述大、小尺度模型的定义, 就可构造 60GHz 的冲激响应模型. 首先假设信号从第二个延迟箱处 ( $i=2$ ) 衰减, 则总功率为:

$$\bar{G}_{tot} = \bar{G}_1 [1 + r \cdot I(\gamma)] \quad (11)$$

其中,  $r$  如式(4)所示.  $I(r)$  如下表示:

$$I(\gamma) \approx \frac{1}{1 - \exp(-\Delta\tau/\gamma)} \quad (12)$$

由式(6), (11), (12), 可得第一个来波均值  $\bar{G}_1$  为:

$$\bar{G}_1 = \frac{\bar{G}_{tot}}{1 + r \cdot I(\gamma)} \quad (13)$$

而之后的来波幅度均值均可由式(4)处理得到.

得到每个来波的均值后, 可用式(7)计算每个实际的来波幅度. 这样便可得到功率时延谱.

为了方便起见, 将各个关系式罗列于表 1.

表 1 各个方程关系图

Table 1 The relationship among functions

大尺度模型参数: $\bar{G}_{tot}, \bar{G}_k$	
路径损耗 PL	$PL \begin{cases} 20.4 \cdot \log_{10}(d/d_0) & d \leq 11m \\ -56 + 74 \cdot \log_{10}(d/d_0) & d > 11m \end{cases}$
阴影衰落	$\bar{G}_{tot} \sim L_N(-PL_{dB, 4.3dB})$
波束衰减常数 $\gamma$	$\gamma \sim L_N(\mu_{dB}, \sigma_{dB})$
波簇功率比 $r$	$r = \exp[-\Delta\tau/\Gamma]$
小尺度模型参数: $G_k$	
米波增益 $G_k$	$G_k \sim m(\Omega_k, m_k)$
	$m \sim N(\mu_m, \sigma_m)$
参数 $m$	$\mu_m(\tau_k) = 3.5 - \frac{\tau_k}{73}, \sigma_m^2(\tau_k) = 1.84 - \frac{\tau_k}{160}$

由表 1, 四参数中  $G$  (或  $\beta^2, \beta$ ) 和  $\tau$  就可比较清楚地进行仿真了. 而一般认为, 相移  $\theta_k$  服从  $[0, 2\pi]$  的均匀分布. 通过预设最低接收电平, 并通过多次的模拟又可以得到反射波次数的均值  $\bar{N} = \pi(N)$ . 这样四参数模型就成功构造出来了.

## 2 仿真实验

第二部分论述了模型的具体构造, 通过编程可以得到功率-时延谱和必要的统计结果(如: 均方根时延). 程序流程如下所示.

i.	输入变量, 即距离参数 $d$
ii.	初始化. 包括初始化波束衰减常数 $\gamma$ , 波簇功率比 $r$ 以及采样时延间距 $\Delta\tau$ , 并且设置最大时延 $\tau_{max} = 5\gamma$ , 置初值 $k=1$ .
iii.	进入小尺寸模型计算. 计算 $\bar{G}_{tot}$ .
iv.	计算 $\bar{G}_k$ .
v.	进入小尺寸模型计算. 计算 $\tau_k$ , 参数 $m$ 以及 $G_k, k=k+1$ .
vi.	判断时延是否溢出. 若是, 跳转至 vii. 若否, 至 iv.
vii.	根据计算结果作出 PDP.

按照该流程表, 该文得出的运行一次功率时延谱如图 2 所示.

可以看出, 虽然用大、小尺度衰落来进行模拟, 但是结果和实际的物理传输特性(如图 1)完全吻合. 图 2 中的虚线即为所得信号功率的包络, 并且显示它们服从双指数分布<sup>[6]</sup>, 即波簇(大尺度衰落)服从特定的指数衰落; 在某一波簇内的波束又服从另一中指数衰落. 模型对波束的模拟并没有刻意按照

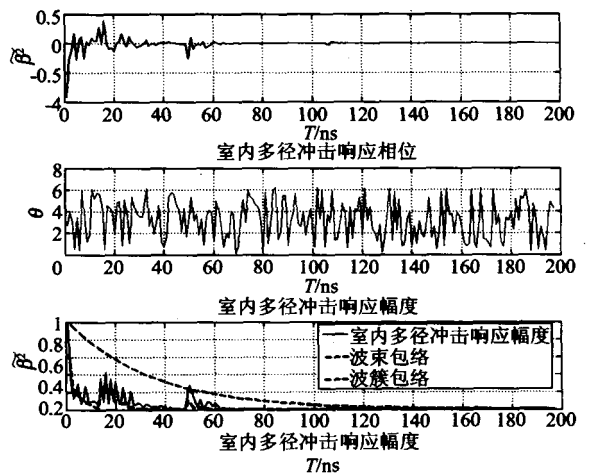


图 2 运行一次的功率-时延谱的仿真结果  
Fig. 2 The result of one PDP computation

② Nakagami- $m$  分布的概率密度函数为:  $f(x) = \frac{2}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{\Omega}\right)^m x^{2m-1} \exp\left(-\frac{m}{\Omega}x^2\right), r \geq 0, m \geq 0.5$ .

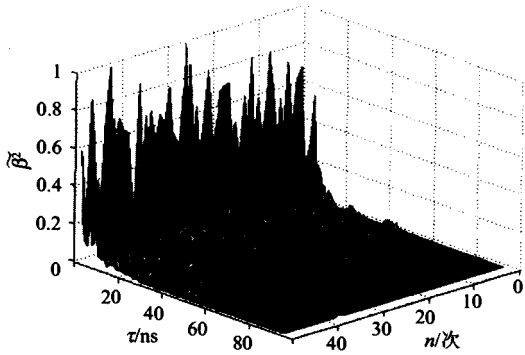


图 3 小尺度功率时延谱的仿真结果  
Fig. 3 The simulation result of small-scale PDP

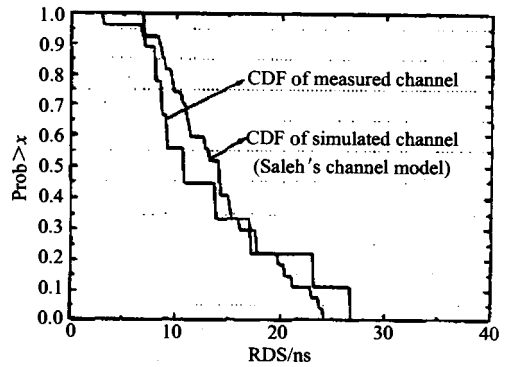


图 5 实测及模拟的均方根时延扩展的例子  
Fig. 5 An RDS example of measurement

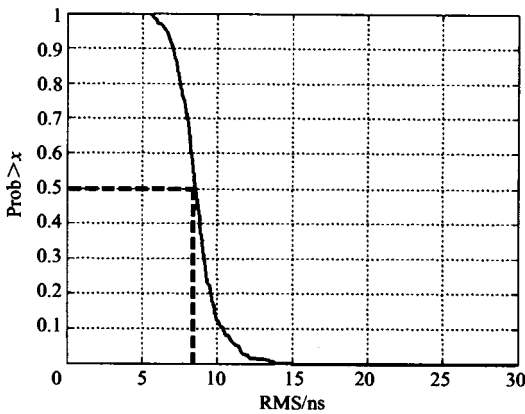


图 4 均方根时延模拟  
Fig. 4 The simulation of RMS Delay Spread

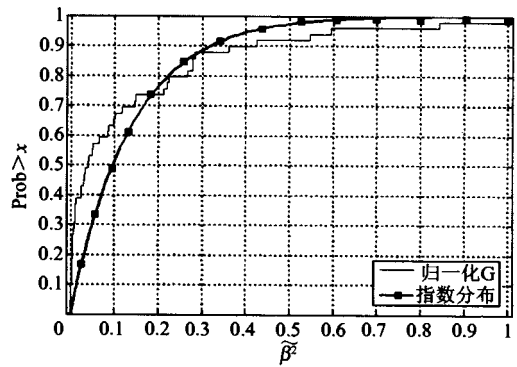


图 6 数据累计分布及模型模拟  
Figure. 6 The CDF of data and its simulation

指数函数计算,而采用的大、小尺度模型模拟. 事实证明这种方法更科学、更符合实际.

图 3 是基于一次模拟程序的基础上,在  $\bar{G}_{tot}$  固定不变的前提下,运行 50 次后得到的小尺度衰落功率时延谱. 可以看出,在小范围内,波形都随测量位置的不同而不同.

在统计分析方面,通过模拟计算出的均方根时延如图 4 所示. 可以发现,在大量来波中,很少有时延超过 15ns 的分量. 事实上,几乎一半来波分量的时延均小于 8ns. 只要适当调整基带码流就可有效减少时延引起的码间干扰.

图 5 是来自文章[7]的均方根模拟结果. [7]所使用的模型为 Saleh 四参数模型. 图 5 表明,在均方根时延扩展方面,该文的模拟结果较传统模型更接近实际情况(观察图 4、图 5 中概率为 0.5 时的情况).

图 6 中,显示模型模拟功率  $G_k$  的累计分布(曲线)和传统指数分布模型(点划线). 从中可以

看出,这两种模拟都存在着相似点,但是当归一化值小于 0.2 以及大于 0.4 时,都有着较大的差别. 因此,60GHz 毫米波模型不完全符合双指数分布,也就是本模型有别于传统四参数模型的主要地方.

### 3 结论

该文首先介绍 60GHz 通信技术的动向及模型发展,突出该模型与传统四参数模型的差别. 然后运用大、小尺度衰减概念构造出合理的 60GHz 毫米波仿真模型. 程序流程图清楚地描述了整个过程及所涉及到的相应公式. 文末给出了冲激响应仿真结果图和较为直观的统计分析. 通过观察,可见该模型在 60GHz 频段内有着较好的模拟效果. 同时只要修改程序有关参数就可将程序移植到其他测试环境,保证了该模型的普适性.

在其它模拟毫米波的模型中,也存在着很优秀的模拟和数据处理方法. 因此用更简便、更有效的方法完善 60GHz 毫米波四参数模型成为推动模型向更准确方向发展的主要途径.

## REFERENCES

- [1] Edward J T, McDonnell. Characteristics of the indoor wireless propagation environment at microwave and millimeter frequencies [J]. *The Institution of Electrical Engineers*, 1996(11):4—5.
- [2] Turin G L, Clapp F D, Johnson T L, et al. A statistical model of urban multipath propagation [J]. *IEEE Trans. Veh. Techno.*, 1972(21):1—9.
- [3] Adel A M Saleh, Reinaldo A Valenzuela. A statistical model for indoor multipath propagation [J]. *IEEE Journal on selected areas in communications*, 1987, 5(2):128—137.
- [4] Dajana Cassioli, Moe Z Win, Andreas F Molisch. The ultra-wide bandwidth indoor channel: from statistical model to simulation [J]. *IEEE Journal on selected areas in communications*, 2002, 20(6):1247—1257.
- [5] Rappaport T S, Seidel S Y, Takamizawa K. Statistical channel impulse response models for factory an open plan building radio communication system design [J]. *IEEE Trans. Commun.*, 1991, (39):794 - 807.
- [6] Clavier L, Fryziel M, Delignon Y, et al. Wide band 60GHz indoor channel: characterization and statistical modeling [J]. *Information Theory, IEEE Transactions on, IEEE*, 2001, 44(6):2100.
- [7] Ji-Hoon Park, Yungsoo Kim, Young-Sik Hur, et al. Analysis of 60 GHz band indoor wireless channels with channel configurations [J]. *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, IEEE*, 1998, (2):619.
- [8] JIANG Tie-Zhen, WU Hu, WU Kai, et al. Threshold design method of car for millimeter-wave collision warning radar [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (蒋铁珍, 武虎, 吴凯, 等. 毫米波汽车防撞雷达恒虚警率门限设定方法. *红外与毫米波学报*), 2005, 24(03):217—221.

~~~~~  
(上接 25 页)

## REFERENCES

- [1] TONG Jin-Jun, QIU Kang-Mu, LI Xiao-Wen. New method of in-flight absolute calibration for thermal infrared channels of satellite sensors [J]. *J. Infrared Millim. Waves*. (童进军, 邱康睦, 李小文. 一种卫星遥感仪器热红外通道在轨绝对辐射定标新方法, *红外与毫米波学报*), 2005, 24(4): 277—280.
- [2] RONG Zhi-Guo, ZHANG Yu-Xiang, WANG Yu-Hua, et al. Calibration method for water vapor channel of scanning-radiometer carried by FY-2B satellite. [J]. *J. Infrared Millim. Waves*. (戎志国, 张玉香, 王玉花, 等. 风云二号 B 卫星载扫描辐射计水汽通道定标方法, *红外与毫米波学报*), 2005, 24(5):357—360.
- [3] YANG Zhong-Dong, DU Song-Yan, QIU Hong, et al. Research on the algorithm of cross calibration about IRMS abond on CBERS-1 [J]. *J. Infrared Millim. Waves*. (杨忠东, 谷松岩, 邱红, 等. 中巴地球资源一号卫星红外多光谱扫描仪交叉定标方法研究, *红外与毫米波学报*), 2003, 22(4):281—285.
- [4] YANG Zhong - Dong , GU Song - Yan , QIU Hong , et al . CBERS-1's CCD Image quality evaluating and cross calibrating study [J]. *Journal of Remote Sensing* (杨忠东, 谷松岩, 邱红, 等. 中巴地球资源一号卫星 CCD 图像质量评价和交叉定标研究, *遥感学报*), 2004, 8(2):113—120.
- [5] GHULAM Abduwasit, QIN QIming, ZHU Lijiang. 6S model based atmospheric correction of visible and near-infrared data and sensitivity analysis [J]. *Acta Scientiation Naturalium Univeritatis Pekinensis* (阿布都瓦斯提·吾拉木, 秦其明, 朱黎江. 基于 6S 模型的可见光、近红外遥感数据的大气校正, *北京大学学报(自然科学版)*), 2004, 40(4): 611—618.
- [6] Vermote E F , Tanre D, Deuze J L, et al. The second simulation of satellite signal in the solar spectrum (6S) [M], User's Guide. France: Laboratoire d'Optique Atmospherique, 1997.
- [7] CHI Hong-Kang , ZHOU Guang-Sheng , XU Zhen-Zhu, et al. Apparent reflectance and its applications in vegetation remote sensing [J]. *Acta Phytocologica Sinica* (池宏康, 周广胜, 许振柱, 等. 表观反射率及其在植被遥感中的应用, *植物生态学报*), 2005, 29(1):74—80.