

文章编号: 1000-1972(2005)06-0017-05

## 超宽带室内多径信道成簇特性仿真与分析

扈罗全, 朱中华, 朱洪波

(南京邮电大学 通信与信息工程学院, 江苏南京 210003)

**摘要:** 超宽带(UWB)无线信道的成簇特性是UWB信号在室内多径信道中的重要传播特性。在对UWB室内多径信道成簇特性进行分析的基础上,介绍了UWB信道的成簇模型,对UWB信号的基本特征和成簇现象形成的原因及其影响进行分析;采用布朗桥方法对有金属网格玻璃门反射的走廊环境中UWB多径信道的成簇特性进行仿真和分析;将具有成簇现象的UWB信号功率时延谱仿真结果与已公布的测量数据结果进行了比较和验证。为UWB无线信道及其信号传播特性的研究打下较好的基础,具有重要参考价值。

**关键词:** 超宽带; 多径信道; 成簇特性; SV 模型

**中图分类号:** TN929.5; TN914.4      **文献标识码:** A

## Simulation and Analysis of UWB Signals Clustering Property of Indoor Multipath Channels

HU Luo-quan, ZHU Zhong-hua, ZHU Hong-bo

(College of Communication and Information Engineering Nanjing University of Posts and Telecommunications Nanjing 210003, China)

**Abstract:** Clustering property in Ultra-wideband (UWB) wireless channels is an important phenomenon for UWB signals during their propagation. Clustering models of UWB channels are introduced in the current research. The fundamental properties of UWB signals are analyzed. The cause of clustering phenomenon and its effect on a receiver are investigated. The clustering property is validated by using a Brownian bridge model of UWB multipath channels to simulate a corridor environment of two glass doors with metal grid inside. The power delay profile (PDP) with clusters is obtained from simulation, which is similar to results of other experiments. The results of the paper are essentially useful for the research of UWB wireless channels and propagation properties of UWB signals.

**Keywords:** Ultra-wideband; Multipath channels; Clustering property; Saleh-Valenzuela model

## 1 引言

无线信道是无线通信系统的重要组成部分,由于其非线性、时变性等复杂特性,长期以来一直是无线通信领域的研究热点。在通信技术发展到超宽带(Ultra-wideband 简称 UWB)通信系统以后,无线传播出现了许多与以往窄带或宽带系统不同的特点,

因而研究 UWB 信道特性,建立信道模型,对于 UWB 通信技术至关重要。

目前 UWB 无线信道领域已经取得了大量研究成果,许多研究者得到的 UWB 信道测量结果,均存在明显的成簇现象<sup>[1~4]</sup>。但是由于 UWB 室内信道的成簇现象比较复杂,目前还没有一个信道模型能够很好地把成簇规律解释清楚。成簇现象一般认为是由散射环境引起,是一种多径分量在到达接收天线时,在时延域和角域分簇或成组到达的现象。Saleh 和 Valenzuela 在对宽带系统(带宽为 200 MHz)的研究

中<sup>[5]</sup>,根据对信道测量数据的分析提出了考虑簇现象的信道模型。该模型假设来波的各个到达时间间隔是一个 Poisson 过程,建立了在时延方向多径分量分批到达的时域离散信道模型,首次说明了宽带系统中多径分量在到达接收机时存在簇现象。Hashim通过对实验数据的分析提出了描述宽带信道成簇现象的  $\Delta K$  模型<sup>[6]</sup>, Spencer 等在此基础上提出了宽带系统在角域方向也存在簇现象<sup>[7,8]</sup>。有学者认为簇现象是一个与实测数据相吻合的到达电磁波的 Poisson 流的结果<sup>[1]</sup>。由于散射体的分布总是具有一定的偏好性,而 Poisson 过程要求到达的射线(或电磁波)具有完全的随机性,在一般的散射环境中很难成立。成簇现象现在已经被反映在许多信道模型中<sup>[1,9,10]</sup>。在 2003 年 IEEE 802.15.3a 官方机构公布了“信道建模小组委员会最终报告”<sup>[9]</sup>,在这份报告里面总结了当时所有信道模型研究的成果,提出了推荐使用的 UWB 信道模型。该模型是基于 Intel 公司进行的 UWB 信道测量活动,对测量数据进行分析后提出的信道模型,其多径信道模型是一个考虑了 UWB 信道成簇现象,基于宽带 Saleh-Valenzuela 模型的修正模型。它能够较为准确的反映 UWB 信道 RMS 时延扩展,功率时延谱,多径分量数(有不同的定义,例如在峰值多径分量 10 dB 以内的多径到达数),其他信道特性参数需要更为复杂的模型来解释。尽管该推荐模型考虑了 UWB 信道的成簇特性,但是对于室内 UWB 信号传播中的成簇现象,并没有给出深入而合理的解释。

研究室内 UWB 信号传播中的成簇现象,对于深入理解 UWB 信道的传播特性非常有意义。最近成簇现象已经被用于 UWB 信道的估计<sup>[11]</sup>。本文对 UWB 无线信道的成簇特性进行分析,认为 UWB 信道中出现簇是由其固有的特性:密集多径和高时延分辨率引起的。考虑电磁脉冲的传播距离、传输损耗和反射损耗等因素后,建立了一个有约束的布朗桥过程的 UWB 多径信道模型。对有金属网格玻璃门反射的走廊环境进行仿真,得到的 UWB 信道功率时延谱出现了明显的簇现象,簇的位置与公布的 UWB 信道测量结果一致。

## 2 UWB 成簇信道模型介绍

成簇现象可以被定义为在一定的环境中独立个体之间存在的某种相互联系的集群行为。一般所说的 UWB 信道的成簇现象,是指在功率时延谱上有明显的尖峰。在移动台的散射环境中,功率时延谱

上簇的分布与该散射环境密切相关。大多数情况下,这些簇之间是非相关的,即各散射体之间的联系没有达到一个临界概率,或者相关性很低。在散射体密集的环境中,簇之间可能是相关的,但是非相关假设在一般的室内环境中是成立的。

宽带信道多径模型在时域的冲激响应(即 S-V 信道模型)表示如下<sup>[5]</sup>:

$$h(t) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \beta_{kl} e^{j\phi_{kl}} \delta(t - T_l - \tau_{kl}) \quad (1)$$

式中,  $\beta_{kl}$  是第  $l$  个簇内第  $k$  个来波的强度,  $\phi_{kl}$  是该来波的附加相位, 在  $[0, 2\pi]$  均匀分布,  $T_l$  是第  $l$  个簇内第一个来波的到达时间,  $\tau_{kl}$  是第  $l$  个簇内第  $k$  个来波的到达时间。图 1 是 S-V 模型中接收功率随时延成双指数衰减的示意图。

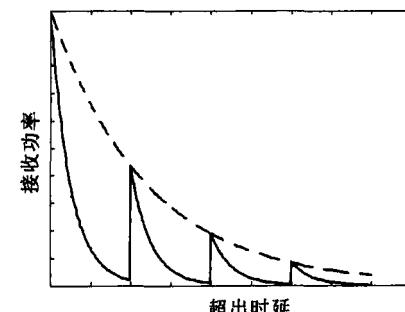


图 1 接收功率随时延成双指数衰减示意图

大量对 UWB 信道测量的结果表明,接收机接收到的信号功率与时延之间(功率时延谱)成双指数衰减关系。因此,IEEE 802.15.3a 推荐的 UWB 多径信道模型由下列离散时间冲激响应组成<sup>[9]</sup>:

$$h_i(t) = X_i \sum_{l=0}^L \sum_{k=0}^K \alpha_{k,l}^i \delta(t - T_{k,l}^i - \tau_{k,l}^i) \quad (2)$$

式中,  $\alpha_{k,l}^i$  为多径增益系数,  $T_{k,l}^i$  为第  $i$  簇的延迟,  $\tau_{k,l}^i$  为相对第  $i$  簇到达时间的第  $k$  个多径分量的延迟,  $X_i$  表示对数正态阴影的影响,  $i$  是指第  $i$  次实现。式(2)是对式(1)的改进,引入对数正态分布以更好的拟合实测数据。目前该模型已经被应用在许多场合。

## 3 UWB 信道的成簇特性分析

### 3.1 UWB 室内信道成簇现象的原因

在 UWB 室内传播信道中,对 UWB 脉冲信号产生反射、折射和绕射作用的物体非常丰富,例如墙壁、门、窗户和各种办公家具等。大量 UWB 信道的测量实验发现,室内信道的功率时延谱上簇的数量有限,一般只有几个。簇内功率都比相邻时延间隔内的接收功率要高,不会出现低功率的簇。簇的分

布位置与环境密切相关,并且有扩展宽度,其时域宽度一般在 10 ns 左右<sup>[7]</sup>。

事实上 UWB 信道中出现簇现象,是由其固有的特性密集多径和高时延分辨率产生的。UWB 信道常常被称作密集多径信道,是指在该信道中,可分辨多径分量的数目远比以往的窄带或宽带信道多。其原因在于,UWB 通信系统中发送信号的带宽覆盖几个 GHz 的频率,相应地,脉冲信号的持续时间(以占脉冲能量 10% 的上升沿到占脉冲能量 10% 的下降沿为计算区间)小于 1 ns。在时延轴上 1 ns 的时间间隔相当于 0.3 m 的光程,在这样短的光程内,脉冲信号发生重叠的概率非常低,仅有少数几个时延点间隔内会有若干条多径分量发生叠加,在某些时延间隔内甚至会没有多径分量。有多个脉冲到达的时延间隔就会发生能量叠加,从而产生成簇现象。但是发生这种事件的概率非常低。能够发生叠加作用的脉冲的时延几乎是相同的,这就要求它们来源于同一个散射体,因为这样才能使时延相同的概率最高。因此可以得出结论,UWB 信道中的簇是由于某些对多径分量有突出贡献的散射体造成的。图 2 为超宽带信道簇的成因示意图。图 2(a)说明 UWB 脉冲能量是如何进行叠加的。当到达接收机的若干个多径分量之间的时延间隔大于脉冲信号的持续时间时,脉冲之间是正交的,不会发生能量叠加。当脉冲之间的时延间隔小于脉冲持续时间时,脉冲之间发生部分叠加或者完全重合。图 2(b)说明 UWB 脉冲在时域中生成簇。只有在很少的时延间隔内才会发生多径分量同时到达,从而发生能量叠加而形成簇。

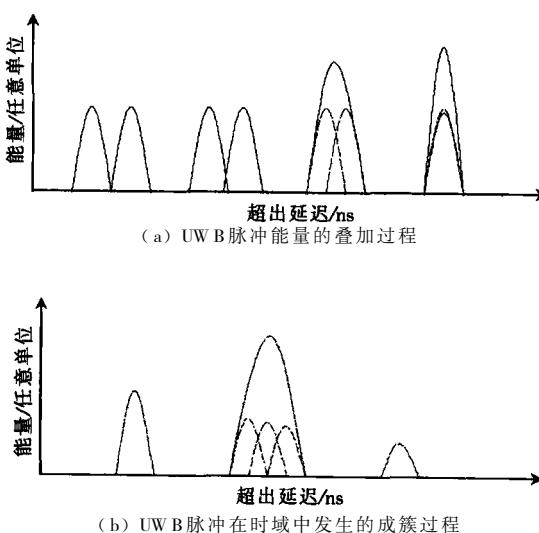


图 2 超宽带信道簇的成因示意图

### 3.2 成簇现象对 UWB 信号检测与接收的影响

与传统窄带通信系统相比,UWB 通信系统具有许多优越性能,其中尤以突出的抗多径衰落性能备受关注。UWB 信号的抗多径衰落性能,是由于脉冲信号的时域宽度非常窄,各个多径分量在时域发生重叠的概率非常低,在接收机处收到的信号可以认为是独立的脉冲信号,这样就形成了 UWB 信号的抗多径性能。

但是 UWB 信号在无线信道传播过程中出现成簇现象,而成簇是因为有多个脉冲信号发生叠加而产生的,显然簇内信号的波形发生了失真,这时 UWB 信号就不存在抗多径性能。因此可以看出,成簇现象对 UWB 通信系统在密集多径信道中的信号检测与接收性能,具有重要影响。这种影响体现在两个方面。首先,簇内信号由于叠加而产生波形失真,这样如果采用相干接收,就需要避开出现簇这一时延间隔内的信号。对于目前正在研究中的 UWB 波形正交调制技术,就需要考虑信号成簇这一现象。其次,簇内信号能量明显较高,因此,如果接收机能够有效接收簇内的能量,则有助于得到更高的能量增益。当采用非相干接收方式时,就可以利用 UWB 信道的成簇效应。

### 4 布朗桥方法对 UWB 信道成簇特性的仿真与分析

布朗桥模型<sup>[12]</sup> (Brownian Bridge Model BBM) 是对 UWB 无线传播信道中散射体完全随机分布情况的一种近似,使用该模型可以构造一个理想的无线信道随机分析模型。该模型假设在发射机和接收机之间 UWB 信号的射线轨迹(或路径)是一个布朗桥过程,以反射次数为指标的电磁波在传播环境中经过多次反射,最后到达移动台的路径,服从概率选择性原理,即某条有 n 次反射次数的电磁波束是否存在,完全由概率来判断。在不同时延处的来波,是运动了不同时间的布朗桥过程的样本函数。当相邻多径分量到达接收机的时延间隔小于脉冲在时域的持续时间时,脉冲之间发生叠加,就会出现成簇现象。以此为基础,可以构建 UWB 信道的布朗桥模型。UWB 信道的冲激响应表示如下:

$$h(t, \tau) = \sum_{j=0}^N \sum_{i=1}^{M_j} a_{ij} \delta(\tau - \tau_{ij}(t))$$

$$= \sum_{i=0}^N \sum_{j=1}^{M_i} p_{ij} \left( \prod_{k=0}^i \delta_{ijk}^{1/2} \left( \frac{d_{ij}(t)}{d_{01}} \right) \right) \delta(\tau - \frac{d_{ij}(t) - d_{01}}{c}) \quad (3)$$

BBM 模型中各种记号的意义说明如下：

$i (=0, 1, 2, \dots)$ : 表示某多径分量在信道中经历的反射次数。

$D_i$ : 所有发生  $i$  次反射的多径分量构成的集合。

$j (=1, 2, 3, \dots)$ : 表示  $D_i$  中第  $j$  条多径分量,  $k (=0, 1, 2, \dots, i)$  表示发生第  $k$  次反射。

$d_{ij}$ : 表示  $D_i$  中第  $j$  条多径分量行走轨迹的路程长度;  $d_{01}$  表示在 LOS 条件下的直达距离, 当在 NLOS 条件下时,  $d_{01}$  表示首条到达射线走过的路程长度。

$\tau_{ij}$ : 对应于路径为  $d_{ij}$  的多径分量的超出时延,  $\tau_{ij} = (d_{ij} - d_{01}) / c$ ,  $c$  为光速。 $\tau_{01} = 0$  表示以首条多径分量的时延为参照。

$\delta_{ijk}$ : 对应于路径为  $d_{ij}$  的多径分量第  $k$  次反射发生损耗残留的能量, 与特定的传播环境有关, 可以将它建模为一个随机变量。 $\delta_{ijk}^{1/2}$  相当于多径分量发生第  $k$  次反射脉冲幅度发生的变化。

$a_{ij}$ : 表示路径为  $d_{ij}$  多径分量的幅度,  $a_{ij} = p_{ij} \prod_{k=0}^i \delta_{ijk}^{1/2} \left( \frac{d_{ij}(t)}{d_{01}} \right)^{-n/2}$ , 其中  $n$  为路径损耗指数, 一般  $n \geq 2$ 。 $a_{01} = 1$ , 表示以首条多径分量的幅度进行归一化。

$p_{ij}$  ( $i=0, 1, 2, \dots$ ;  $j=0, 1, 2, \dots$ ): 接收机收到的某条多径分量的幅度取向, 为一个随机变量。 $p_{ij}$  等概率为 +1 或 -1<sup>[9]</sup>。

$N$  是最大反射次数,  $M_i$  是  $D_i$  中的多径分量数。

式 (3) 是一个时域离散型 UW B 信道模型。 $d_{ij}$  的随机性使得  $a_{ij}$  和  $\tau_{ij}$  是随机变量, 得到的多径分量在时域的分布是完全随机的, 幅度也是随机的, 这与实际情况相符。因此, 式 (3) 得到的信道响应具有使用传统的冲激响应方法得到的信道响应相似的特性。

对 BBM 模型中的布朗桥样本函数进行约束, 就可以很自然地得到有约束的布朗桥模型 (Bounded Brownian Bridge Model BBBM)。约束条件就是传播环境的几何描述, 使每次射线发生反射的点在障碍物的表面上。

Hamalainen 对走廊环境的 UW B 信道进行了测量<sup>[13]</sup>, 其走廊环境如图 3 所示。走廊高度为 3.3 m, 天线高度为 1.1 m。图 3 中在 END 2 和 END 3 处各有一个金属网格的玻璃门, 是为了让脉冲信号能够

穿过。测量结果发现在超出时延位置分别为 53 ns 70 ns 107 ns 123 ns 160 ns 处有明显的尖峰, 也即存在 5 个簇。Hamalainen 认为这 5 个峰是由 END 1、END 2 和 END 3 产生的一次反射与二次反射造成的, 他没有考虑高次反射以及不同反射次数的电磁波之间的叠加效应产生的影响。

现在使用 BBBM 模型进行分析。根据式 (3) 对图 3 的测量环境进行仿真分析, 以得到有成簇现象的 UW B 信道的功率时延谱。假设  $\delta_{ijk} \sim N(0.6, 0.05^2)$ ,  $n=2.5$ ,  $T_c=0.5$  ns 接收到的射线数目为 198 条 (此处射线数目较多是因为该散射环境的尺寸比较大)。由于该环境比较规则, 故使用低反射次数的假设, 此处取最高反射次数为 3。图 4 为发射机和接收机之间脉冲信号的三维行走轨迹, 图 5 为信道的幅度响应, 图 6 为信道的功率时延谱。在图 6 上箭头所指处可以很清晰地看到有 5 个峰, 其时延分别在 53 ns 70 ns 107 ns 123 ns 160 ns 仿真结果与 Hamalainen 给出的测量结果完全一致。在 BBBM 模型中综合考虑了在 END 1、END 2 和 END 3 产生的一次反射、二次反射和高次反射以及不同反射次数的电磁波之间的叠加效应产生的影响等众多因素。BBBM 模型得到的功率时延谱的仿真结果表明, 在时延轴上出现 5 个峰, 是由于在非常短的时延间隔内有多个电磁脉冲到达并发生能量的叠加。这些电磁脉冲分别来自于在 END 1、END 2 和 END 3 产生的一次反射与二次反射, 因此在功率时延谱就显示出成簇特性。图 6 与测量结果的一致性, 表明本文对 UW B 室内无线信道簇的成因分析是正确的。

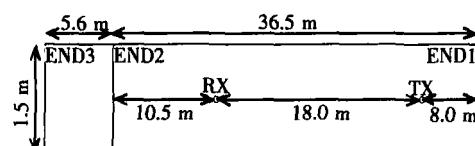


图 3 BBBM 模型散射环境示意图

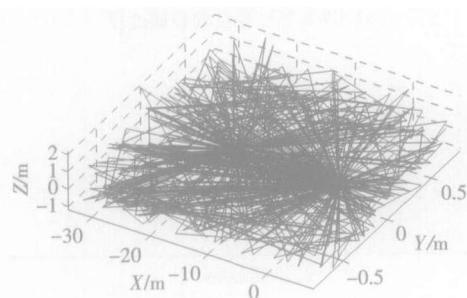


图 4 射线的三维轨迹

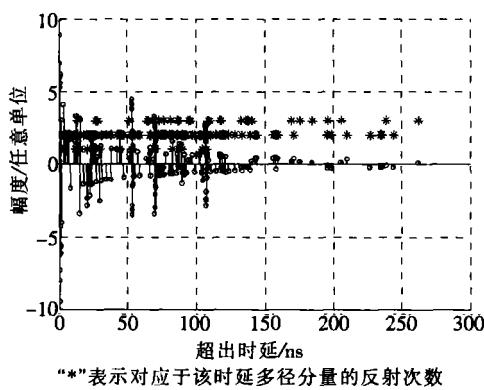


图 5 信道幅度响应

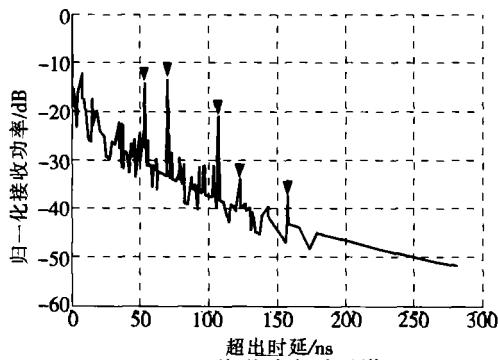


图 6 信道功率时延谱

## 5 结 论

本文对 UWB 室内无线信道的成簇特性进行了分析研究,从脉冲信号发生能量叠加这一角度分析 UWB 无线信道功率时延谱上簇的成因。认为 UWB 信道中出现簇,是由于其固有特性,可分辨多径分量多以及非常高的时延分辨率产生的。UWB 信号的成簇现象对通信系统的信号检测与接收会产生影响,使用相干接收应该避开簇内信号,使用非相干方式可以利用簇内能量。本文采用布朗桥方法对特定室内环境中 UWB 信道传播特性进行的仿真结果表明,具有成簇现象的 UWB 信号功率时延谱特性与已公布的实测数据结果基本一致。上述仿真和分析的过程及方法对今后进行超宽带无线信道及其信号传播特性的深入研究具有重要意义和参考价值。

## 参考文献:

- [1] CRAMER R J M, SCHOLTZ R A, WIN M Z. Evaluation of an ultra wideband propagation channel [J]. IEEE Trans on Antenna and Propagation, 2002, 50(5): 561~570.

- [2] KUNISCH J, PAMP J. Measurement results and modeling aspects for the UWB radio channel [A]. IEEE Conference on Ultrawideband Systems and Technologies Digest of Technical Papers [C]. 2002, 19~23.
- [3] CASSIOLI D, CICCOGNANI W, DURANTINI A. UWB Channel Model Report [R]. IST, Ultrawaves W 03-03-0012-R03, 2003.
- [4] KAREDAL J, WYNE S, ALMERS P, et al. UWB Channel Measurements in an Industrial Environment [A]. IEEE Globecom [C]. 2004, 3511~3516.
- [5] SALEH A A M, VALENZUELA R A. A statistical model for indoor multipath propagation [J]. IEEE JASC, 1987, 5(2): 128~137.
- [6] HASHEMI H. Impulse response modeling of indoor radio propagation channels [J]. IEEE JASC, 1993, 11(7): 967~978.
- [7] SPENCER B J Q, RICE M, JEFFS B, et al. A statistical model for the angle-of-arrival in indoor multipath propagation [A]. IEEE Vehicular Technology Conference [C]. 1997, 1415~1419.
- [8] SPENCER B J Q, JEFFS B, LENSON M, et al. Modeling the statistical time and angle of arrival characteristics of an indoor multipath channel [J]. IEEE JASC, 2000, 18(2): 347~360.
- [9] FOERSTER J. Channel modeling subcommittee report-final [R]. IEEE P802.15 Working Group for WPANs, 2003.
- [10] VENKATESH S, IBRAHIM J, BUEHRER R M. A new 2-cluster model for indoor UWB channel measurements [A]. IEEE Antennas and Propagation Society Symposium [C]. 2004, 1: 946~949.
- [11] CARBONELLI C, MITRA U. Clustered Channel Estimation for UWB Signals [A]. IEEE International Conference on Communications [C]. 2004, 4: 2432~2436.
- [12] KLOEDEN P E, PLATEN E, SCHURZ H. Numerical Solution of SDE Through Computer Experiments [M]. New York: Springer-Verlag, 1994. 69~90.
- [13] OPPERMANN I, HAMALAINEN M, INATTI J. UWB theory and applications [M]. New York: John Wiley & Sons, 2004. 9~38.

## 作者简介:



扈罗全 (1972—),男,江苏宜兴人。南京邮电大学通信与信息工程学院博士研究生。1996年6月毕业于四川大学,获得学士学位,2004年1月毕业于同济大学,获得硕士学位。IEEE 学生会员。主要从事无线通信与电磁兼容研究。已在国内外各类学术刊物和学术会议上发表论文 20 余篇,被 EI 收入 5 篇。

(下转第 26 页)

Conference on Computer Vision [C]. Cambridge England April 1996. 709~720.

- [6] TRIGGS B. Autocalibration and the absolute quadric [A]. In: Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C]. Puerto Rico 1997. 609~614.

- [7] HARTLEY R I ZISSELMAN A. 韦穗译. 计算机视觉中的多视图几何 [M]. 合肥: 安徽大学出版社, 2002. 326~328.

- [8] PRESS W, FLANNERY B, TEUKOLSKY S et al. Numerical Recipes in C [M]. New York: Oxford University Press 1979.

### 作者简介:



杨敏 (1969—), 男, 安徽泾县人。南京邮电大学自动化学院讲师, 博士。2003年12月在南京航空航天大学自动化学院导航、制导与控制专业获得工学博士学位。目前主要研究方向是计算机三维视觉和智能控制。

(上接第 21页)



朱中华 (1981—), 男, 江苏南通人。南京邮电大学通信与信息工程学院硕士研究生。2003年7月毕业于解放军理工大学通信工程学院。目前主要从事无线通信与电磁兼容研究。

朱洪波 (1956—), 男, 江苏扬州人。南京邮电大学通信与信息工程学院院长, 工学博士, 教授, 博士生导师。中国电子学会理事兼学术工作委员会副主任委员, 中国电子学会通信学分会委员兼副秘书长。(见本刊2005年第1期第50页)