

# 超宽带技术的信道模型和定位技术研究与分析

曾文<sup>1,2</sup> 王宏<sup>1</sup> 徐皓冬<sup>1</sup>

(中国科学院沈阳自动化研究所 沈阳 110016)<sup>1</sup> (中国科学院研究生院 北京 100039)<sup>2</sup>

**摘要** 短距离无线系统是今后较长时间内通信界研究的热点,其中个人局域网(PAN)概念的提出,更推动了个人信息网络的发展。实现 PAN 的主要技术有:IEEE802.11b、Home RF、蓝牙(Bluetooth)以及超宽带(UWB)等。其中高带宽、高速率、低功耗和抗干扰等特点使得 UWB 技术优势极为突出。本文系统地阐述了 UWB 的物理信道模型、定位技术和计算方法,并进行了必要的总结和概括。

**关键词** 超宽带,无线信道模型,定位

## The Research and Analysis of Channel Models and Positioning Technology Based on UWB

ZENG Wen<sup>1,2</sup> WANG Hong<sup>1</sup> XU Ai-Dong<sup>1</sup>

(Shenyang Institute of Automation of the Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016)<sup>1</sup>

(Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)<sup>2</sup>

**Abstract** The short distance wireless system will become a research hot spot in a longer time, Personal Area Network (PAN) impulse the development of personal information network. Main technologies include IEEE802.11b, Home RF, Bluetooth as well as ultra-wide band (UWB) and so on. Because UWB has its unique characteristics, wider band, higher speed rate, lower power spectrum density and stronger anti-jamming etc, the UWB-based technology is focused on more deeply for these advantages. The paper emphatically introduced the physical channel model, the positioning technology and basic methods of positioning computing on UWB. Finally the latest development of node positioning system and algorithms are presented and summarized in this paper.

**Keywords** Ultra-wide band, Wireless channel model, Positioning

## 1 引言

超宽带(UWB)是一种无载波通信技术,利用纳秒至微微秒级的非正弦波窄脉冲传输数据。有人称它为无线电领域的一次革命性进展,认为它将成为未来短距离无线通信的主流技术。超宽带和其它的“窄带”或者“宽带”主要有两方面的区别:一是超宽带的带宽明显大于目前所有通信技术的带宽;二是超宽带的无载波传输方式。UWB 技术主要有下列特点:

(1)发射功率低。超宽带无线电的射频带宽可达 1GHz 以上,所需的平均功率很小。在短距离应用中,UWB 发射机的发射功率低于 1mW;低发射功率可以延长系统电源工作时间,况且发射功率小,其电磁波辐射对人体的影响也会很小。这样,UWB 的应用领域就广。

(2)多径分辨能力强。UWB 采用持续时间极短的窄脉冲,其时间、空间分辨力都很强,因此系统的多径分辨率极高,1ns 脉冲的多径分辨率为 30cm,接收机通过分集可以获得很强的抗衰落能力。

(3)传输速率高。UWB 使用 GHz 级的超宽频带,所以即使把发送信号功率谱密度控制得很低,也可以实现高达 100~500Mbit/s 的信息速率。

(4)带宽极宽。UWB 使用的带宽在 1GHz 以上,高达几个 GHz。UWB 系统容量大,在半径 10m 的区域内,允许 6 个发射机同时工作,每个发射机的数据速率以大于 50Mbit/s 计算,总数据速率约为 300Mbit/s,空间容量大于 1000kbit/(s·m<sup>2</sup>)。

(5)抗干扰性能强。UWB 采用扩频跳频工作方式,这种工作方式抗信号干扰的能力较强。在发射时,将微弱的无线电脉冲信号分散在宽阔的频带中,输出功率甚至低于普通设备产生的噪声;接收时,将信号能量还原出来,在解扩过程中产生扩频增益。因此与 IEEE802.11a、IEEE802.11b 和蓝牙相比,在同等码速条件下,UWB 具有更强的抗干扰性。

(6)安全性高。作为通信系统的物理层技术具有天然的安全性能。由于 UWB 信号一般把信号能量弥散在极宽的频带范围内,对一般通信系统,UWB 信号相当于白噪声信号。并且大多数情况下,UWB 信号的功率谱密度低于自然的电子噪声,从电子噪声中将脉冲信号检测出来是一件非常困难的事。采用编码对脉冲参数进行伪随机化后,脉冲的检测将更加困难。

(7)低功耗。UWB 设备可以使用小于 1mW 的发射功率,这样就大大延长了系统电源的工作时间。UWB 技术的系统功耗也相当低,59~70mW 就可以满足它的工作要求,功耗还不到目前各种无线传输技术的 1%。

(8)工程简单,造价便宜。在工程实现上,UWB 比其它无线技术要简单得多,可全数字化实现。它只需要以一种数学方式产生脉冲,并对脉冲产生调制,而这些电路都可以被集成到一个芯片上,设备的成本很低。

## 2 超宽带无线信道模型的研究

超宽带不同于窄带通信,它在调制、编码、功率控制、天线设计等方面面临着许多挑战。在研究 UWB 通信技术的时候

候,需要一个合适的、接近于实际的 UWB 信道模型。但令人遗憾的是,至今尚无一个统一的信道模型。一方面 UWB 信道非常复杂,较为全面地建立一个 UWB 信道模型不是一件容易的事;另一方面,我们对 UWB 信道的研究时间不长,没有实验数据来建立这样一个信道模型。目前,有关信道建模的文章<sup>[1,2]</sup>虽然比较多,但各种信道模型的侧重点和描述参数的考虑都不尽相同。它们的共同点是:UWB 信道模型都是建立在实际实验测量的基础上的,实验一般是在室内进行。UWB 信道具有时变特性,所以应该测量足够多的数据,用统计的观点和方法来分析数据,描述信道特性。UWB 的无线信道除了存在反射、散射和衍射等现象外,还有独特的簇特性。一般说,UWB 信道的特征主要体现在信道的路径损耗和多径衰落上,因此 UWB 信道模型的建立也就从两方面考虑,即路径损耗和多径效应。

### 2.1 路径损耗模型

理论分析和大量的实测数据都表明:接收到的信号的平均幅度随着距离的增加而对数减小;在室内,无线信道在给定距离上路径损耗是随机变量,服从对数正态分布。用距离的指数方程来描述任意 T-R(发射机到接收机的距离)上的平均路径损耗(以 dB 值表示),有

$$PL(d) = PL_0(d_0) + 10N \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + S_e(d)$$

$PL_0(d_0)$ 是参考点处的接收功率, $N$ 是损耗指数, $S_e(d)$ 是由于阴影效应引起的损耗(dB), $S_e(d)$ 服从正态分布。阴影效应主要是信道中散射现象引起的,使得传播空间上的信号变得混乱。 $PL(d)$ 随 T-R 的增大而减小,其值的变化幅度也增大。因此,路径损耗的大小与信道中视距传播的情况有关:视距传播路径多,即类似自由空间传播的情况占的比例增大,则  $N$  变小,损耗减少;反之,损耗增大。

### 2.2 多径衰落信道模型

#### 2.2.1 S-V 室内信道模型

S-V 模型是两个泊松模型的应用。第一个泊松模型用于描述每一簇第一径的到达时间,第二个泊松模型用于描述簇内各路径的到达时间。假设: $T_l$ 表示第  $l$  簇中第  $l$  个多径分量到达时间; $\tau_{k,l}$ 表示第  $l$  簇的第  $k$  条多径相对于  $T_l$  到达的延迟; $v$ 表示单位时间内簇到达的速率; $\lambda$ 表示单位时间内多径分量到达的个数。

##### (1)多径的到达时间

簇到达时间和多径到达时间的分布为

$$p(T_l | T_{l-1}) = v \exp[-v(T_l - T_{l-1})], l > 0$$

$$p(\tau_{k,l} | \tau_{(k-1),l}) = \lambda \exp[-\lambda(\tau_{k,l} - \tau_{(k-1),l})], k > 0$$

##### (2)多径的功率分布

第  $l$  簇中第  $k$  个多径分量的幅度服从瑞利分布,多径的平均功率服从双指数分布:

$$\beta_{k,l}^2 = \beta^2(0,0) \exp(-T_l/\tau) \exp(-\tau_{k,l}/\lambda)$$

$\beta^2(0,0)$ 是第一个簇中第一个多径分量的平均功率。

在这种信道模型中,由于采用了双指数衰减模型,因此比较贴近于实际信道。对 S-V 模型与测量数据进行拟合表明,S-V 模型与测量数据吻合得很好。

#### 2.2.2 $\Delta$ -K 模型

##### (1)多径的到达时间

时间轴以  $\Delta$  为单位划分时隙, $l$  时隙中有一个多径信号到达的概率为  $P_l$ ,如果前一个时隙  $l-1$  内存在一个多径信号,则  $P_l = K\lambda_l$ 。否则  $P_l = \lambda_l$ 。 $\lambda_l$  描述为

$$\lambda_1 = r_1;$$

$$\lambda_l = \frac{r_l}{(K-1) \cdot r_{l-1} + 1}, 2 \leq l;$$

其中  $K > 1$ ,则表示多径的到达是成簇的;如果  $K < 1$ ,则表示多径到达趋向于分隔。

##### (2)多径的幅度分布

时隙  $l$  的冲击响应以  $\alpha_l$  表示,多径的幅度  $|\alpha_l|$  为对数正态分布, $p_l$  表示反射导致的脉冲反相,并假设  $p_l$  等概地取土 1,有

$$\alpha_l = p_l |\alpha_l|$$

$$20 \lg(|\alpha_l|) \sim N(\mu, \sigma^2)$$

$T_l$  是时隙  $l$  的过剩时延; $\tau$  是簇延因子;

$\Omega_0$  是第一个簇中第一个多径分量的平均功率;

$$\mu = \frac{10 \ln(\Omega_0) - 10 T_l / \tau - \sigma^2 \ln(10)}{\ln(10)}$$

这种信道模型能较好地反映 LOS 和 NLOS 信道的特征,但由于这种信道模型采用了单个指数衰减的模式,所以不能很好地反映 LOS 或 NLOS 信道中的时延扩展均方根和平均过剩时延。

#### 2.2.3 IEEE802.15.3a 的室内信道模型

根据大量的实验测量,多径幅度分布选择对数正态分布比瑞利更合适一些,因此 802.15 工作组对 S-V 信道模型进行了修改。

信道的离散冲击响应模型为

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

其中  $i$  表示第  $i$  次信道的随机实现; $X_i$  表示第  $i$  次信道随机实现时的对数正态阴影函数,其分布为  $20 \lg(X_i) \sim N(0, \sigma_x^2)$ 。 $\alpha_{k,l,i}$  为多径模型中的衰减系数,  $\alpha_{k,l,i} = p_{k,l} \beta_{k,l,i}$ 。

802.15 工作组建议的超宽带室内信道模型如下:

##### (1)多径到达时间的分布

令簇到达时间,即簇的第一条多径的到达时间服从参数为到达速率  $v$  的泊松分布,而簇中其它多径的到达时间服从参数为  $\lambda$  的泊松分布, $\lambda$  一般远远大于  $v$ 。

$T_l$  及  $\tau_{k,l}$  分布为:

$$p(T_l | T_{l-1}) = v \exp[-v(T_l - T_{l-1})], l > 0$$

$$p(\tau_{k,l} | \tau_{(k-1),l}) = \lambda \exp[-\lambda(\tau_{k,l} - \tau_{(k-1),l})], k > 0$$

##### (2)多径幅度及能量的分布

信道系数定义为:  $\alpha_{k,l,i} = p_{k,l} \beta_{k,l,i}$

$\beta_{k,l,i}$  表示第  $l$  个簇中第  $k$  个多径分量衰落的情况,它们都服从正态分布,且相互统计独立,即  $20 \lg(\beta_{k,l,i}) \sim N(\mu_{k,l,i}, \sigma_1^2 + \sigma_2^2)$

$\Omega_0$  是第  $l$  个簇中第  $k$  个多径分量的平均功率;

$$\mu_{k,l,i} = \frac{10 \ln(\Omega_0) - 10 T_l / \tau - 10 \tau_{k,l,i} / \gamma - (\sigma_1^2 + \sigma_2^2) \ln(10)}{\ln(10)}$$

$\tau$  是簇时延因子, $\gamma$  表示多径分量的时延因子。相应地,多径的能量分布为

$$E[\beta_{k,l,i}^2] = \Omega_0 e^{-T_l/\tau} e^{-\tau_{k,l,i}/\gamma}$$

### 3 定位技术的研究

无线定位技术和方案很多<sup>[3,4]</sup>。常用的定位技术包括红外线、超声波、射频信号等,但都不适合室内定位。红外线只适合短距离传播,而且容易被荧光灯或者房间内的灯光干扰,在精确定位上有局限性;超声波受多径效应和非视距传播影响很大,不能用于室内环境;而射频信号普遍用在室外定位系统中,应用于室内定位存在局限。利用 GPS 进行定位的优势

是卫星有效覆盖范围大、定位导航信号免费,缺点是定位信号到达地面较弱,不能穿透建筑物,因此不适合室内定位,此外定位器终端的成本较高。当前比较流行的 Wi-Fi 定位是 IEEE802.11 的一种定位解决方案。目前,它应用于小范围的室内定位,成本较低。但 Wi-Fi 收发器只能覆盖半径 90m 以内的地理区域,很容易受到其他信号干扰,从而影响定位精度,并不十分可靠,而且定位器的能耗较高。蓝牙技术应用于定位,与 Wi-Fi 有很多相似之处,主要应用于小范围定位,例

如单层大厅或仓库;同样有定位误差不稳定、受噪声信号干扰大的缺点。UWB 脉冲无线电技术具备了许多正弦载波通信技术无法比拟的优势,特别是 UWB 脉冲的宽度为纳秒级,占用带宽在 1GHz 以上,超宽带技术具有较高的时间分辨率和较强的穿透材料的能力。利用超宽带信号进行定位,采用 TOA 技术测距,理论上可以达到厘米级的测距精度,完全能够满足精确定位的需求。这种良好的性能为定位系统的设计提供了很好的支撑。图 1 是这种定位系统工作原理。

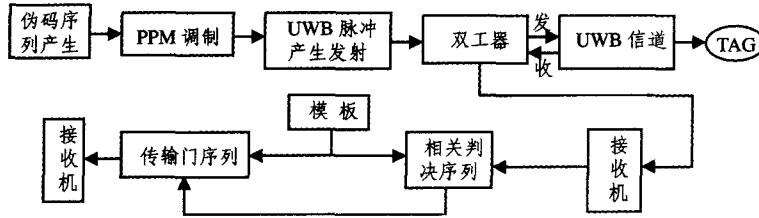


图 1 UWB 定位系统工作原理

### 3.1 基于 TOA 技术的 UWB 定位计算方法

UWB 精确定位采用的是基于到达时间的差分定位算法。其原理是待测点发送信号到各个参考点的基站,由到达时间来计算坐标。根据定位的几何原理,如果要定位一个待测点的三维坐标,就存在 3 个未知数,再加上待测点发送信号的时间也是未知的,所以至少需要 4 个参考点,建立 4 个方程来进行计算:

$$(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2 = c^2(t_i-t_0)^2 \quad (1)$$

$i=1,2,3,4$

式中,  $(x, y, z)$  和  $(x_i, y_i, z_i)$  分别表示需要定位的位置和参考点位置的坐标;  $t_0$  表示需要定位的位置发送信号的时间;  $t_i$  是节点  $i$  的 TOA, 表示参考点位置的到达时间 (Time of Arrival, TOA);  $c$  表示信号传播的速度;  $t_0$  是信号从定位基站到定位标签传输的往返时间。解这个方程组就可以得到待测点的坐标位置。解方程组一般有两种方法:直接计算方法和基于最优化的迭代方法。

#### 3.1.1 直接计算方法

$i=1$  时

$$ct_0 = \frac{c}{2}(t_1+t_2) + \frac{1}{2c(t_1-t_2)}(a_{11}-2x_{11}x-2y_{11}y-2z_{11}z), \quad i=2,3,4 \quad (2)$$

$$x_{i1} = x_i - x_1$$

$$y_{i1} = y_i - y_1$$

$$z_{i1} = z_i - z_1$$

$$a_{i1} = x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - (x_1^2 + y_1^2 + z_1^2)$$

令  $\Delta t_{ij} = t_i - t_j$ , 消去 (2) 式中的  $t_0$ , 得

$$a_1x + b_1y + c_1z = k_1 \quad (3)$$

$$a_2x + b_2y + c_2z = k_2 \quad (4)$$

其中:  $a_1 = \Delta t_{12}\alpha_{31} - \Delta t_{13}\alpha_{21}, a_2 = \Delta t_{12}\alpha_{41} - \Delta t_{14}\alpha_{21}$

$$b_1 = \Delta t_{12}\beta_{31} - \Delta t_{13}\beta_{21} \quad b_2 = \Delta t_{12}\beta_{41} - \Delta t_{14}\beta_{21}$$

$$c_1 = \Delta t_{12}\gamma_{31} - \Delta t_{13}\gamma_{21} \quad c_2 = \Delta t_{12}\gamma_{41} - \Delta t_{14}\gamma_{21}$$

$$k_1 = \frac{1}{2}(c^2\Delta t_{12}\Delta t_{13}\Delta t_{32} + \Delta t_{12}\alpha_{31} - \Delta t_{13}\alpha_{21})$$

$$k_2 = \frac{1}{2}(c^2\Delta t_{12}\Delta t_{14}\Delta t_{42} + \Delta t_{12}\alpha_{41} - \Delta t_{14}\alpha_{21})$$

合并 (3) 式和 (4) 式, 表示为

$$x = Ax + B \quad (5)$$

$$y = Cz + D \quad (6)$$

其中:

$$A = \frac{b_1c_2 - b_2c_1}{a_1b_2 - a_2b_1} \quad B = \frac{b_2k_2 - b_1k_2}{a_1b_2 - a_2b_1}$$

$$C = \frac{a_2c_1 - a_1c_2}{a_1b_2 - a_2b_1} \quad D = \frac{a_1k_2 - a_2k_1}{a_1b_2 - a_2b_1}$$

将 (5)、(6) 式代入 (2) 式, 得

$$c(t_1 - t_0) = Ez + F \quad (7)$$

$$E = \frac{1}{c\Delta t_{12}}(x_{21}A + y_{21}C + z_{21})$$

$$F = \frac{c\Delta t_{12}}{2} + \frac{1}{2c\Delta t_{12}}(2x_{21}B + y_{21}D) - a_{21}$$

将 (5)、(6) 式和 (7) 式代入 (1) 式, 可得到方程

$$Gz^2 + Hz + I = 0 \quad (8)$$

其中,  $G = A^2 + C^2 + 1 - E^2$

$$H = 2[A(B - x_1) + C(D - y_1) - z_1 - EF]$$

$$I = (B - x_1)^2 + (D - y_1)^2 + z_1^2 - F^2$$

则可以得到两个解:

$$z = -\frac{H}{2G} \pm \sqrt{\left(\frac{H}{2G}\right)^2 - \frac{I}{G}} \quad (9)$$

方程组有两个解, 而期望的解只有一个。若计算得到的解没有物理意义或者超过了可测量的范围, 就视其为无效解; 若两个解非常接近并且都合理, 则取它们的中间值。最后求出  $x, y$  的值。

#### 3.1.2 基于最优化的方法

基于最优化的方法是根据以上建立的数学模型式 (1), 将定位坐标的目标函数可以写成

$$f(p) = \sum_{i=1}^N \{ [(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2]^{1/2} - c(t_i - t_0) \}^2 \quad (10)$$

$p = [x, y, z, t_0]^T$  表示待测点的位置坐标  $(x, y, z)$  的矢量;  $t_0$  表示未知的传输时间;  $t_i$  是第  $i$  个节点估计的 TOA 值。目标函数是所有点的距离误差的平方和。优化的目的是最小化目标函数来得到最优的位置估计值。为了便于表示, 定义

$$F(x, y, z, t_0) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N f_i^2(x, y, z, t_0) \quad (11)$$

从而得到

$$f(p) = 1/2 \|f(p)\|^2 \quad (12)$$

式中,  $f(p) = (f_1(p), f_2(p), \dots, f_N(p))^T, p = (x, y, z, t_0)^T$ , 然后根据式 (12) 用迭代算法求解。

有很多优化方法用于目标函数来取得最小值,以便达到优化的性能。在参考文[5]中,采用高斯-牛顿方法和 DCF 相似牛顿算法对该目标函数进行优化,用于对 UWB 精确位置定位。

### (1)高斯-牛顿方法

在当前点  $P_k$  使用泰勒级数展开目标函数,取展开式的前三项,可得

$$F(P_k + s_k) = F(P_k) + g_k^T s_k + s_k^T G(P_k) s_k / 2$$

$s_k$  是方向矢量; $g_k$  是目标函数在  $P_k$  处的梯度; $G(P_k)$  是目标函数的 Hessian 矩阵:

$$G(P_k) s_k = -g_k$$

$$J_k^T J_k s_k = -J_k^T f(P_k)$$

$J_k$  是  $f(P)$  在  $P_k$  的 Jacobian 矩阵,它是全排列矩阵。

$$s_k = -(J_k^T J_k)^{-1} J_k^T f(P_k)$$

$$(J_k^T J_k + \lambda_k b f I) s_k = -J_k^T f(P_k)$$

迭代计算开始,需要初始位置坐标和初始传输时间。位置坐标的初始估计值可以选取固定节点或被监控区域的平均位置。初始的估计发送时间可以是比接收时间更早的一段时间点。初始位置和传输时间的估计越准确,性能越好。

### (2)相似牛顿-高斯算法

Hessian 矩阵  $G(P_k)$  用一个矩阵  $B_k$ ,  $B_k$  通过迭代进行更新。当第  $K$  次迭代,设

$$S_k = -B_k g_k$$

这种算法是通过迭代计算得到位置的估计值,迭代公式如下:

$$P_{k+1} = P_k + \alpha B_k g_k$$

$P_k$  表示待估位置的坐标矢量,在第  $K$  次迭代时被估计的传输时间; $\alpha$  表示步长; $g_k$  表示目标函数的梯度:

$$g_k = \nabla f(x, y, z, t_0) = \left[ \frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y}, \frac{\partial f}{\partial z}, \frac{\partial f}{\partial t_0} \right]^T_{P=P_k}$$

$B_k$  表示逆 Hessian 矩阵,按下式校正更新:

$$B_{k+1} = B_k + \frac{h_k h_k^T}{h_k^T q_k} - \frac{B_k q_k q_k^T B_k}{q_k^T B_k q_k}$$

$$h_k = P_{k+1} - P_k \quad q_k = g_{k+1} - g_k$$

初始矩阵  $B_k$  是正定矩阵。为了开始迭代,需要初始坐标的位置和初始传输时间。初始坐标的估计值可以选取所有活动或在检测域内的节点的平均位置。初始的估计发送时间可以是比接收时间更早的一段时间点。每次迭代的步长和梯度都要被更新。

以上两种算法在计算中都可能出现无解或者迭代溢出的情况,这主要是因为实际测量中存在误差,同时基站位置的选择对方程组有较大影响。为了减小无解或者迭代溢出的可能性,一般会设定 5 个基站参考点,从中选择 4 个接收信号功率最高的作为最佳参考点,然后再联立方程组进行计算。

### 3.2 目前的研究进展

目前 UWB 精确定位采用的算法主要是传统定位算法,系统的定位精度受限于无线信道的传输条件。如果收发器之间存在视距(LOS)传输,定位精度会较高。反之,信号只能以

反射、衍射等其它路径到达,则 TOA 测量值会引入非视距(NLOS)误差。基于优化的位置估计定位方法是迭代的,当预先定义的标准满足,迭代的执行终止。与迭代算法相比,直接计算的方法简单且容易执行。当无线信道的传输条件好时,或对精确度要求不高的应用,可以考虑直接计算的方法。目前存在的非迭代算法,如果非迭代算法的位置估计被用作初始位置估计,那么基于优化方法的性能可能会被改善。文[6]提出使用最大似然估计方法进行建模和快速测距方案;文[7]使用粒子滤波器解决非视距问题,为室内条件下的定位提供了良好的解决方案;文[8]提出基于 TOA 和 AOA 两种技术建立成本函数。

**结束语** 目前,UWB 技术已经成为未来最有前途的 10 大通信技术之一,拥有十分广阔的前景。无线信道模型的研究和定位技术是 UWB 技术研究的基础,无线信道模型的建立是评价整个无线通信系统(不仅仅指 UWB)性能的评价标准。信道模型对信道链路估算、传播范围的规划和评估物理层方案都是必需的。而定位技术是 UWB 本身特有的物理特性,是其它无线通信技术所不具备的。作为无线信道技术重要的支撑基础,信道模型和节点的定位问题极具研究价值。本文论述了 UWB 无线信道模型和节点定位问题的基本原理与计算方法,归纳了已有的研究及最新发展,期望能为未来的研究提供一个良好的基础,借此推动国内对这一领域的关注和研究。

### 参考文献

- 1 Saleh A, Valenzuela R. A Statistical Model for Indoors Multipath Propagation. IEEE JSAC, 1987, 5(2)
- 2 王金龙,等. 无线超宽带(UWB)通信原理与应用[M]. 北京:人民邮电出版社,2005
- 3 Opshaug G R, Enge P. Integrated GPS and UWB Navigation System; Motivates the Necessity of Non-interference. In: IEEE Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies, 2002
- 4 任丽荣,肖军. 基于 TOA 的无线传感器网络定位系统[J]. 信息与控制, 2006, 35(2): 280~283
- 5 Yu K, Oppermann I. UWB positioning for wireless embedded networks[A]. In: Proceeding of the 2004 IEEE Radio and wireless Conference[C]. New York, USA: IEEE, 2004. 459~462
- 6 Lee J Y, Scholtz R A. Ranging in a Dense Multi-path Environment Using an UWB Radio Link[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2002, 20(9): 1677~1683
- 7 Jourdan D B, Deyst J J Jr, Win M Z. Monte Carlo Localization in Dense Multipath Environments Using UWB Ranging[A]. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Ultra-Wideband [C]. Piscataway, USA: IEEE, 2005. 314~319
- 8 Montillet J-P, Braysy T, Oppermann I. Algorithm for Nodes Localization in Wireless Ad-Hoc Networks Based on Cost Function [A]. In: Proceedings of the International Workshop on Wireless Ad-hoc Networks (IWWAN2005) [C]. <http://www.cs.berkeley.edu>