

# 超宽带定位研究与应用:回顾和展望

肖 竹<sup>1</sup>,王勇超<sup>2</sup>,田 斌<sup>2</sup>,于 全<sup>2,3</sup>,易克初<sup>2</sup>

(1. 湖南大学计算机与通信学院, 湖南长沙 410082; 2. 西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室, 陕西西安 710071;  
3. 总参第 61 研究所, 北京 100039)

**摘 要:** 超宽带(Ultra-Wideband, UWB)技术能获得比现有无线定位技术更高的测距定位精度. 本文主要讨论 UWB 定位技术的研究和应用, 包括 TOA/TDOA(Time/Time Difference of Arrival)等 UWB 定位方法、多径时延估计理论、非视距定位和协作式定位、多带 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)定位和其他超宽带信号定位方式等方面, 对其发展历程和现状进行了充分的叙述和分析, 最后指出了仍存在的问题和值得进一步探讨的方向.

**关键词:** 超宽带; 定位; 到达时间; 时延估计; 非视距定位; 协作定位; 多带 OFDM

**中图分类号:** TN914 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 01-0133-09

## Development and Prospect of Ultra-Wideband Localization Research and Application

XIAO Zhu<sup>1</sup>, WANG Yong-chao<sup>2</sup>, TIAN Bin<sup>2</sup>, YU Quan<sup>2,3</sup>, YI Ke-chu<sup>2</sup>

(1. College of Computer and Communication, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China;  
2. State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;  
3. The 61st Research Institute of General Staff Headquarters, Beijing 100039, China)

**Abstract:** Ultra-Wideband (UWB) has the ability of achieving the better ranging and localization precision than current wireless system. The research and application of UWB localization are studied on this paper, in which the main topics include the different UWB localization methods like TOA/TDOA (Time/Time Difference of Arrival), multipath delay estimation theory, non-light-of-sight localization, cooperative localization, MB-OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) and other ultra-wideband signals localization. Then its development and actuality are discussed in details. The existing problems and several future valuable research directions are summarized finally.

**Key words:** UWB; localization; time of arrival; time delay estimation; NLOS localization; cooperative localization; MB-OFDM

## 1 引言

超宽带 (Ultra-Wideband, UWB) 技术占用带宽极大, 具有传输速率高、系统容量大、成本低等特点, 其功率谱密度极低, 能与现有通信系统共存, 因此成为解决热点地区高速接入需求与紧张的频谱资源之间矛盾的有效方案<sup>[1]</sup>.

上世纪 90 年代, SCHOLTZ R. A. 首次提出采用冲激脉冲进行跳时调制用于多址通信系统<sup>[2]</sup>, 这篇具有里程碑意义的论文开启了对 UWB 理论进行系统研究的先河, 此后, UWB 技术日渐成为当前无线通信研究中的热点<sup>[3~5]</sup>. 空间位置信息的获取是通信及信息科学领域的前沿课题之一. 对于脉冲无线电超宽带 (Impulse Radio

Ultra-Wideband, IR-UWB) 技术, 其脉冲宽度仅为纳秒 (ns) 或亚纳秒级, 因此有着两方面优势: (1) 在理论上可获得厘米级甚至更高的定位精度, 在精确定位应用中极具潜力; (2) 由于时间分辨率高, UWB 具有抗多径能力和一定的穿透能力, 使其在复杂多径环境中仍能完成定位. 因此 UWB 定位技术引起了学术界和业界的极大关注<sup>[6~8]</sup>, IEEE 802.15.4a 标准将 UWB 作为定位应用的首选技术<sup>[9]</sup>.

UWB 定位通过测距和测向来完成, 一般包括三种方法: 基于到达角度 (AOA: Angle of Arrival) 估计、基于接收信号强度 (RSS: Received Signal Strength) 和基于到达时间 (TOA/TDOA: Time/Time Difference of Arrival) 估计<sup>[7]</sup>.

TOA/TDOA 方法是以多径到达时延估计理论为基

收稿日期: 2009-02-10; 修回日期: 2010-08-20

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 60673061); 国家科技支撑计划项目子项 (No. 2007BAK23B03); 国家科技重大专项 (No. 2011ZX03004-001-01); 中央高校基本科研业务费专项资金 (No. K50510010009)

础的,最能体现出 UWB 信号时间分辨率高的特点,因此本文将侧重分析这类 UWB 定位方法的原理和特点,以及基于 UWB 多径检测的时延估计和性能界等.同时文中论述并归纳了 UWB 定位中的协作定位方式.还将介绍 MB-OFDM-UWB 定位和同样具备超宽带概念的其他定位方法,针对 UWB 定位应用和系统实现展开讨论.最后指出了目前 UWB 定位研究与应用中存在的问题,最后对未来研究趋势做了初步探讨.

## 2 UWB 定位方法和时延估计理论

三种常用 UWB 定位方法中 AOA 属于测向技术,需要多天线阵列或者波束赋形等技术,增加了实际系统中的设备成本,其定位精度依赖于波达角度的估计;RSS 方法依赖路损模型,精度与节点间距有关,对信道环境极为敏感,鲁棒性不强;相比而言,TOA/TDOA 方法通过估计到达时延(差)来计算收发两端的距离(差),充分利用了 UWB 信号较高的时间分辨率,能体现出 UWB 高精度定位的优势,在研究中也受到了较多关注.而多种定位技术的配合使用可构成联合定位方式,用于提高定位性能或者改善定位源几何分布的不足<sup>[10]</sup>.

### 2.1 TOA 和 TDOA 定位

基于时延估计的 TOA 和 TDOA 在 UWB 定位中得到了广泛研究.以简单的二维定位为例,完成参考节点(Reference Node, RN)与未知节点(Unknown Node, UN)之间的 TOA 估计就能测定二者的距离,定位时 RN 位置已知,则可将 UN 的位置确定在以该 RN 为圆心的圆周上;TDOA 方式稍有区别,获得一次时延差估计需要两个 RN,UN 位置轨迹为双曲线中的某一支,这取决于 UN 到达 RN 端的先后.完成 2D 定位的 TOA/TDOA 定位需要 3 个 RN.

实际定位应用中,TOA 和 TDOA 方式最大的区别在于是否需要收发两端同步.TOA 方式中定位双方必须是时钟同步的.因此在实际 UWB 定位系统中,TDOA 是一种可行的方式:定位双方无需同步,但定位测量时要求 RN 端同步.

## 2.2 其他测时定位方式

### 2.2.1 RTT 定位

为解决常规 TOA 方式中收发两端需要时钟同步的问题,还可采用基于来回程(RTT: Round Trip Time)或双程(TWR: Two Way Ranging)定位<sup>[11]</sup>,原理是 RN 先向 UN 端发送定位序列,其中可包含要求应答等信息,UN 经过一个固定时延之后转发信号, RN 接收后计算一次来回程时间  $t_{RTT} = 2\tau_{TOA} + t_D$ ,  $\tau_{TOA}$  表示单程到达时间即 RN 与 UN 间的 TOA 估计,对应 RN 与 UN 间的实际距离.  $t_D$  是 UN 转发时的固定时延,RTT 定位时不需要 RN 与 UN 间时钟同步,但要求  $t_D$  能够准确测定.

### 2.2.2 TSOA 定位

TDOA 利用到达时间差来定位,相似地,到达时间和 TSOA(Time Sum of Arrival)也可用于定位,图 1 中给出了其 2D 定位原理,定位过程由某一个 RN 发起, UN 经过固定时延转发信号,其他任意 RN 接收,计算这两次到达时间之和,可得到图中距离  $(L_1 + L_2)$ ,则 UN 的位置 X 确定在以参考节点 A 和 B 为焦点的椭圆上<sup>[12]</sup>. TSOA 也需要

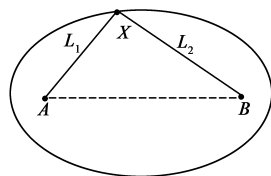


图1 TSOA定位原理

RN 端同步,与 TDOA 不同的是,其定位过程包含了 UN 与 RN 间的双向链路,这一特点与 RTT 方法相似,并且不要求 RN 与 UN 间的点对点通信.

### 2.3 UWB 多径时延估计

TOA/TDOA 都利用了 UWB 信号时间分辨率高的优势,从而能获得较高的定位精度.在多径传播条件下,时延估计实质上转化为了 UWB 信号多径分量(Multipath Components, MPCs)的检测问题.对于视距(Line-of-Sight, LOS)环境而言, UWB 多径分量中 DP(Direct Path)是最先到达且能量最强,因此 TOA/TDOA 方法中检测 DP 的到达时刻来获得时延估计(差)是常规做法<sup>[13]</sup>.下文以 TOA 估计为例来说明不同的时延估计方法.

#### 2.3.1 相干和非相干 TOA 估计

在 UWB 接收机设计中,接收信号检测分为两种基本形式:使用脉冲模板匹配滤波(Matched Filter, MF)的相干检测和基于能量检测(Energy Detect, ED)的非相干检测方法.因此对 TOA 估计方法研究的出发点也是基于这两种形式的接收机<sup>[14]</sup>.其各自特点在于相干 TOA 估计采样速率较高,从匹配相关峰值输出中判断 DP 的位置,可以获得很好的定位精度,但算法复杂度也较大;非相干 TOA 估计方法只需要 sub-Nyquist 采样率,通过检测接收端信号能量来判断 DP 的位置,降低了复杂度,但定位精度也受到了限制.

#### 2.3.2 两步 TOA 估计

为平衡相干和非相干 TOA 估计方法的定位性能和算法复杂度,研究者们提出了很多改进的折中思路,其中以两步(Two-Step)TOA 估计算法最为典型<sup>[15]</sup>,其实质是能量检测方法和相干检测的联合使用.两步 TOA 估计实际是粗略估计和精确估计的结合.

#### 2.3.3 最大似然 TOA 估计

TOA 估计问题也被视为在一个不确定区域内首达路径的时间估计,因此最大似然(Maximum Likelihood, ML)方法也常用于 TOA 估计<sup>[7,13]</sup>.AWGN 信道下 ML 方法是渐进最优的;在能获得完整的信道先验信息的条件下,如多径时延和幅度等,ML 算法能获得最优的 TOA 估计.对 ML 算法的归纳可参见文献<sup>[16]</sup>.

### 2.3.4 阈值搜索 TOA 估计

对于密集多径的情形,在数目非常大的 MPCs 中直接搜索  $DP$  复杂度太高,若考虑信道噪声等影响或者在 NLOS 环境下,由于  $DP$  不再是最强路径,无法保证搜索的准确性.此时更为实际的做法是设置阈值完成  $DP$  检测,将  $MF$  或  $ED$  输出与阈值进行比较,对比过程中可采用前后向、并行和反转搜索等<sup>[17]</sup>.对于实际 TOA 估计中的阈值搜索方法,需要考虑信道噪声、多径效应和波形失真等因素,文献[18]讨论了这些因素的影响,分析了阈值搜索在相干/非相干时延估计中的特点,并指出在某些 SNR 范围下,阈值搜索能获得与 ML 相近的性能.

### 2.4 TOA 估计的性能界

在高 SNR 条件下的 TOA 估计中,克拉莫劳下界 (Cramér-Rao Lower Bound,  $CRLB$ ) 能给出一个“紧”的性能界<sup>[16]</sup>.而对于中等的和低 (medium and low) SNR 的情形,  $CRLB$  较为松散<sup>[19]</sup>,  $ML$  或其他算法都难以达到这个性能界.在这种信噪比条件下,  $ZZLB$  (Ziv-Zakai Lower Bound) 能给出更为紧密的下界<sup>[20]</sup>,其表示形式可以从均方误差估计中推得:

$$E\{\delta^2\} = \frac{1}{2} \int_0^\infty z P\{|\delta| \geq z/2\} dz \quad (1)$$

上式中  $E\{\delta^2\}$  是关于接收信号  $\{r(t), \tau\}$  的期望,寻求  $P\{|\delta| \geq z/2\}$  的下界即为  $ZZLB$ .  $P\{|\delta| \geq z/2\}$  可视为假设检验问题:

$$H_1: r(t) \sim P(r(t)|\tau) \quad (2)$$

$$H_2: r(t) \sim P(r(t)|\tau+z)$$

$P(r(t)|\tau, \tau+z)$  表示条件概率,在次优判决准则下  $P\{|\delta| \geq z/2\}$  应不小于积分式:

$$\int_{-\infty}^{\infty} (p_\tau(\tau) + p_\tau(\tau+z)) P_{\min}(\tau, \tau+z) d\tau \quad (3)$$

上式中  $P_{\min}(\tau, \tau+z)$  由似然检验的最优判决  $L(r(t)) = P\{r(t)|\tau\} / P\{r(t)|\tau+z\}$  来确定.

对于式(2)中检验  $H_1, H_2$ ,可转化为求解采用发射波形  $s(t|\tau)$  和  $s(t|\tau+z)$  的二元通信系统最小错误概率问题,假定时延估计  $\tau$  随机分布于  $(0, T_a]$ ,  $P_{\min}(\tau, \tau+z)$  不依赖时延  $\tau$ ,根据上文论述和式(2)~(4),  $ZZLB$  一般形式可表示如下:

$$ZZLB = \frac{1}{T_a} \int_0^{T_a} z (T_a - z) P_{\min}(z) dz \quad (4)$$

对于 AWGN 条件下的单径情形 (Single Path),  $P_{\min}(z)$  可表示为:

$$P_{\min}(z) = Q\left(\sqrt{\frac{E_s}{N_0}(1 - \rho_g(z))}\right) \quad (5)$$

其中  $\rho_g(\tau) = \frac{1}{E_s} \int_{-\infty}^{\infty} g_{RX}(t) g_{RX}(t - \tau) dt$ , 表示接收波

形的自相关函数.相比于  $CRLB$ ,  $ZZLB$  不易给出显示表达,但能提供更紧密的下界.同样,  $ZZLB$  可以推广到适用于多径的情形,由于其推导较为繁琐,这里不做详细讨论.

## 3 NLOS 定位和协作定位

### 3.1 NLOS 定位和鉴别

多径传播是 UWB 通信与定位中的典型信道环境<sup>[1,3]</sup>,由于直射路径  $DP$  对应收发两端信号时延,便于通过测时来测距定位,且 LOS 条件下  $DP$  等同于最强路径 (Strongest Path,  $SP$ ). NLOS 环境下仍以检测  $DP$  为出发点,但定位时存在较大区别,主要表现在两方面:

(1) NLOS 环境下  $DP$  往往不再表现为最强路径,其他多径分量的存在将影响  $DP$  检测,在相同噪声和干扰等条件下,影响程度要高于 LOS 环境<sup>[18]</sup>;

(2) NLOS 环境中  $DP$  的衰减程度与所透射的障碍物材质有关,在 DARPA 的一份 NETEX 规划报告中指出在某些介质 (如 Ply Wood) 中<sup>[21]</sup>,由于衰减严重可能造成  $DP$  无法检测,因此带来 NLOS 定位误差.

此外,  $DP$  在穿透障碍物时会引入难以确定的附加时延. LOS 和 NLOS 还可进一步分为 DDP (Dominant Direct Path)、NDDP (Non-Dominant Direct Path) 和 UDP (Undetectable Direct Path)<sup>[22]</sup>.这种划分参照  $DP$  和其他多径分量的关系,依据为  $DP$  是否作为多径成分中的主径分量. LOS 环境可以理解为 DDP,此时  $DP$  等同于  $SP$ ,其他多径分量影响不明显; NDDP 表示仍能检测到  $DP$  的 NLOS,但  $DP$  无法体现出明显主径的地位; UDP 则对应严重的 NLOS 环境,此时无法检测  $DP$ .

通常,设置误差消除方法降低 NLOS 给定位带来的影响是常见思路<sup>[23-25]</sup>.同时与之密切相关的非视距状态鉴别 (NLOS Identification) 方法也得到了广泛研究,如利用 UWB 信道统计特性来进行 NLOS 鉴别是最为常见的算法<sup>[26]</sup>.对于上述问题本文不再详述,下文将讨论协作式定位,也将从另一个角度来论述 NLOS 定位问题.定位系统中节点间协作能提供 NLOS 定位的可行方案,不仅如此,这种协作特性还有助于完成复杂场景下的 UWB 测距定位.

### 3.2 协作式定位

UWB 定位时的“协作”是指除了各节点之间定位测量,还包括定位参数、状态更新和位置解算等信息在定位系统各组成部分间的交互<sup>[27]</sup>,此外,协作式定位还可用于解决 NLOS 定位问题.将 UWB 定位协作方式归结为三种: RN-RN 间的协作定位,多个 RNs-UNs 间的协作定位,以及 RN-散射体 (Scatterer)-UN 间的协作定位.

#### 3.2.1 RN-RN 协作定位

RN 间进行定位信息的交互是最为常见的协作定

位方式,如进行位置解算时以某个  $RN$  作为主站来处理各个  $RN$  测得的定位信息就属于这种方式.具备主从关系的  $RN$  设置有利于对整个网络的控制管理或建立多跳结构,适合于可将 UWB 作为物理层技术的无线网络应用<sup>[28,29]</sup>.

不仅如此, $RN$ - $RN$  间协作定位也是解决 NLOS 定位的方法之一.基本思想是从多个  $RNs$  中选择能对  $UN$  进行 LOS 定位的  $RN$ ,这样尽可能的使用 LOS 定位,避免了 NLOS 定位时带来较大误差的情况,选择 LOS 条件下的  $RN$  来定位可以利用 NLOS 鉴别来完成,也可对  $RN$  设置 WLS 算法(Weighted Least Square)<sup>[26]</sup>,通过  $LS$  代价函数来优化非视距  $RN$  的使用.同时,在应用时也应当注意  $RN$  的几何分布对定位性能的影响.

### 3.2.2 $RNs$ - $UNs$ 协作定位

$RN$  在和  $UN$  定位的同时,与其他  $RNs$  ( $UNs$ ) 进行数据通信,实时交流各个  $UNs$  的定位信息,以达到  $RNs$ - $UNs$  间协作定位的效果<sup>[30]</sup>.

此外, $RNs$ - $UNs$  也可视为一种典型的自定位方式,适用于一些特定应用,如大地测绘、搜索救援和探测器定位等.这些应用的共同点是不存在预先设置的  $RN$ ,此时  $RN$  与  $UN$  的角色是可以互换的,以火星探测器定位为例,当探测器以设定的姿态降落于火星表面后,探测器在移动中需要完成相互定位.实际上,这要求定位能对周围环境和自身位置进行高清晰的辨识(High Definition Situational Awareness, HDSA)<sup>[31]</sup>,是一种更为自主和智能的定位方式.

### 3.2.3 $RN$ -Scatterer- $UN$ 协作定位

定位时除收发两端外,散射体(Scatterer)也是不应忽视的环节.各种类型的散射体或障碍物的存在是引起多径效应和 NLOS 的根本原因,这对实际的无线传播场景而言是无法避免的.应注意到的是,散射体对定位同样可提供有用信息,而  $RN$ -Scatterer- $UN$  协作方式能提供一种 UDP 情形下完成定位的可行方案<sup>[32]</sup>.

图 2 中给出了该协作式定位的示意图.假定  $DP$  由于受到  $RN$  与  $UN$  间障碍物阻挡,衰减过大而无法检测(即 UDP 情形). $RN$  通过定向天线以发射角度  $\alpha$  发射信号,信号经由散射体  $S_1$  反射,设  $RN$  与  $S_1$  的距离为  $l_1$ , $UN$  接收由  $S_1$  反射的信号,并通过 AOA 方式估计信号的到达角度  $\beta$ ,设  $S_1$  与  $UN$  的距离为  $r_1$ ,信号从  $RN$  至  $UN$  的传播距离  $D = l_1 + r_1$ .显然在参量  $(\alpha, \beta, l_1, r_1, D)$  中,  $(l_1, r_1)$  是无法确定的,但参量  $(\alpha, \beta, D)$  可

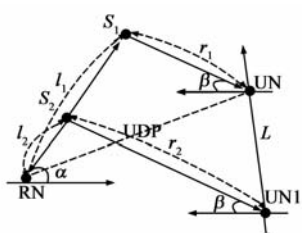


图2  $RN$ -Scatterer- $UN$  协作定位

以利用 AOA 和 TOA 方法测定.由于散射体的位置未知,因此在  $\alpha$  方向上散射体的位置也可能位于图中的  $S_2$ ,类似地,如图中所示设  $S_2$  与  $RN$  和  $UN_1$  的距离为  $(l_2, r_2)$ .此时若  $S_2$  反射的信号仍然以  $\beta$  到达  $UN_1$  端,则同样可得  $D = l_2 + r_2$ .这说明对于  $2D$  定位时,若能测得一组  $(\alpha, \beta, D)$  值,根据空间位置关系, $UN$  (或  $UN_1$ ) 就能确定在图中直线  $L$  上.当  $RN$  变换发射角度, $UN$  接收其他散射体反射的信号,进而测得另一组  $(\alpha, \beta, D)$  值,同理可将  $UN$  确定在另一直线上,由于发射角度不同,该直线与  $L$  存在交点,这说明单个  $RN$  也能完成对  $UN$  的  $2D$  定位.

$RN$ -Scatterer- $UN$  协作定位方式不需要考虑散射体的位置,并灵活利用了散射体的反射作用,但定位时信号经散射体单次反射才适用,根据 UWB 多径分量的簇到达特性<sup>[9,11]</sup>,可近似认为 NLOS 下的最强路径  $SP$  经过单次反射到达  $UN$ .当然,AOA 和 TOA 技术的联合使用将导致定位过程较为复杂.但相比于其他方法,如 NLOS 误差消除等,都不是主动或直接完成定位,其性能还取决于误差模型等诸多因素, $RN$ -Scatterer- $UN$  协作至少可作为一种能主动完成 NLOS (特别是 UDP) 定位的方式.

## 4 MB-OFDM-UWB 和其他超宽带定位

UWB 技术有两种基本的技术提案:DS-UWB 和 MB-OFDM-UWB.其中 DS-UWB 体制保留了 IR-UWB 信号的特点,UWB 定位研究大部分都是以 IR-UWB 这种信号形式为基础的.MB-OFDM-UWB 与传统 OFDM 系统存在许多相似之处,并且也可作为测距定位应用时的信号形式<sup>[33,34]</sup>.同时,本节内容还将讨论其他超宽带定位方式及其在定位应用中的推广.

### 4.1 MB-OFDM-UWB 定位

#### 4.1.1 MB-OFDM-UWB 时延估计

设 MB-OFDM 符号在  $M$  个子带上传输,其子带可表示为:  $[A_1\omega_0, B_1\omega_0], \dots, [A_M\omega_0, B_M\omega_0]$ , 其中  $\omega_0$  为频带间隔,  $\{A_i, B_i\}_{i=1}^M$  都为整数.若定义  $K: = (\sum_{m=1}^M B_m - \sum_{m=1}^M A_m + B)$ , 则可用  $\{\omega_k\}_{k=1}^K$  表示 MB-OFDM-UWB 系统的子载波.多径信道可表示为:

$$h(t) = \sum_{l=1}^L \alpha_l \delta(t - \tau_l) \quad (6)$$

上式中  $L$  为多径数目,  $\{\alpha_l, \tau_l\}_{l=1}^L$  表示多径分量的幅度和时延参量.MB-OFDM-UWB 方案中对应第  $k$  个子载波  $\omega_k$  的频域接收信号  $R(k)$  为:

$$R(k) = H(k) * S(k) + W(k)$$

式中  $S(k)$  为发射信号,  $W(k)$  表示频域高斯白噪声,  $H(k)$  为信道频域响应:

$$H(k) = \sum_{l=1}^L \alpha_l \exp(-j\omega_k \tau_l) \quad (8)$$

基于 DP 检测的时延估计就是求得首达分量  $\tau_1$  的估计值  $\hat{\tau}_1$ , 接收端恢复的多径信道表示为  $h(t) = \sum_{l=1}^L \alpha_l \delta(t - \hat{\tau}_l)$ .  $T_p = T_h/L$  表示多径间隔,  $T_h$  是多径时延扩展. 则时延估计  $\hat{\tau}_1$  可利用下述过程获得<sup>[34]</sup>:

**Step 1** 将时延估计初始值设为  $\hat{\tau}_1 = 0$ ;

**Step 2** 设置  $l \in [L_1, L_2]$  最大化信道能量比:

$\gamma(\hat{\tau}_1, l) = |\alpha_l|^2 / \left( \sum_{n=l-1}^{l-M} |\alpha_l|^2 / M \right)$ , 这里  $[L_1, L_2]$  表示初始同步时的时间模糊度,  $\gamma(\hat{\tau}_1, l)$  的分母项表示信道平均能量;

**Step 3** 改变  $\hat{\tau}_1$  初始值, 令  $\hat{\tau}_1 \in [0, T_p]$ , 重复 Step 2, 利用最大化过程可求得参数  $\hat{l}$  和  $\hat{\tau}_l$ , 则最终的时延估计  $\hat{\tau}_1 = \hat{\tau}_l$ .

合并所有子带的导频信息  $\{H(k)\}_{k=1}^K$  来恢复  $h(t)$  是 MB-OFDM-UWB 中的通用做法. 对于 IR-UWB 定位时带宽的优势, MB-OFDM-UWB 定位则可利用多带导频设计来弥补带宽的不足.

#### 4.1.2 MB-OFDM-UWB 时延估计性能界

AWGN 信道下的时延估计, 单子带的 CRLB 可表示为:

$$\text{var}(\tau_{\text{Subband}}) = \frac{1}{8\pi^2 \gamma \beta^2} \quad (9)$$

类似地, 这里  $\gamma = E_s/N_0$  为该子带中信噪比,  $\beta$  是等效带宽. 对采用  $M$  个子带的 MB-OFDM 系统, 假定每个子带都以能量  $E_s$  发射信号, 则接收端信号能量为  $M \cdot E_s$ , 带宽为  $M \cdot \beta$ , 此时的 CRLB 为<sup>[34]</sup>:

$$\text{var}(\tau_{M-\text{Sub}}) = \frac{1}{8\pi^2 (M * E_s / N_0) (M * \beta)^2} = \frac{1}{8\pi^2 \gamma \beta^2 M^3} \quad (10)$$

MB-OFDM-UWB 可分别对各个子带进行时延估计, 若各子带中噪声是独立的, 可采用平均的方式来降低噪声等的影响,  $M$  个子带平均后的 CRLB 为:

$$\text{var}(\tau_{M-\text{AVER}}) = \text{var}(\tau_{\text{Subband}}) / M = \frac{1}{8\pi^2 \gamma \beta^2 M} \quad (11)$$

上式说明, 与单子带系统相比, MB-OFDM 系统子带数目为  $M$  时, 时延估计误差会降低为  $1/M^3$ ; 当采用  $M$  个子带平均进行时延估计时, 其估计误差降低为  $1/M$ . 对于实际的 MB-OFDM-UWB 系统,  $M$  值不宜选取过大, 因为当子带数目增加时, 频率合成器 (Frequency Synthesizer) 电路会变得非常复杂, 通常在 3.1 ~ 10.6GHz 的民用 UWB 频带, 只采用 3.1 ~ 4.8GHz 频带间的 3 个子带.

## 4.2 其他形式的超宽带定位

### 4.2.1 24GHz UWB 定位

除 3.1 ~ 10.6GHz 之外, FCC 为 UWB 设备分配了高频段 22 ~ 29GHz. MEIER C 等人设计并实现了工作在 24GHz 左右的 UWB 定位系统<sup>[35]</sup>, 利用 PN 码的延迟相关来进行时延估计, 实现时利用了宽带扩频和高速数字信号处理技术. 实验中  $RN$  与  $UN$  端相距 1m ~ 2.5m,  $UN$  以 5cm/s 的速度在该范围内移动, 其定位精度达到 2mm 左右, 在使用了相位误差纠正算法、并利用卡尔曼滤波对定位误差 (视为高斯分布) 进行平滑处理后, 定位精度可达 mm 级.

在这个高频段 UWB 定位系统中, 要求 1.6GHz 的 Chip 速率, 这有利于抑制其他 MPCs 对 DP 检测的影响, 只是 GHz 的码片速率远远超出了一般扩频系统的承受能力, 实现起来成本相当高. 而对比现有文献资料, 达到 mm 级是相当高的定位精度, 该系统展示了 UWB 在小范围内的高精度定位和跟踪能力, 因此在某些特定场合具有应用价值.

### 4.2.2 调频连续波 UWB 定位

调频连续波利用了线性扫频 (linear frequency sweeps) 在雷达中得到广泛应用, 但易受到多径效应干扰, 且室内定位能力较差. 将调频连续波与 UWB 技术结合, 一方面可满足 UWB 规范, 另一方面可利用脉冲波形的选择来进行脉冲频率调制 (Pulsed Frequency Modulated, PFM), PFM-UWB 的接收设计较为简单. 文献<sup>[36]</sup>中设计的 PFM-UWB 定位系统工作在 7.5GHz, 扫频宽度为 1GHz, 采用雷达中常见的 RTT 定位方式, 定位距离在 10m 内时精度可达 2cm.

### 4.2.3 声学超宽带定位及其推广

从 FCC 对 UWB 信号相对带宽的定义, 声学信号也可以视为超宽带 (Acoustic UWB) 信号. 尽管 A-UWB 信号带宽通常在 kHz 以下, 但考虑到声音传播速度, 也可认为具备了和 UWB 同等的距离分辨率: 空气中传播时光速为  $3 \times 10^8$  m/s, 声速为 340m/s, 其传播速度比值约为  $1.13 \times 10^6$ , 因此当 A-UWB 信号带宽在 3.6 ~ 12.2kHz 时就能相当于 3.1 ~ 10.6GHz 的 UWB 信号, A-UWB 定位系统相对 UWB 系统易于实现, 且同样能反映超宽带条件下的定位性能, 初步实验结果表明 A-UWB 可以获得厘米级的定位精度<sup>[37]</sup>.

应当注意到 A-UWB 是机械波的形式, 其原理与通常 UWB 无线电信号存在很大差别, 但其应用要远早于电磁波方式的 UWB, 例如自然界中的蝙蝠 (Bat) 就是成功运用 A-UWB 的典型代表, 它发送超声波通过 RTT 定位方式, 能在运动中辨识空间位置和周围环境, 事实上这种自主式的测距定位导航一直是研究者们梦寐以求的目标之一.

## 5 UWB 定位应用和进一步研究方向

本节内容将首先介绍常见的 UWB 定位应用<sup>[38]</sup>, 然后讨论 UWB 定位新的应用趋势, 并归纳当前 UWB 定位研究中的下一步研究方向。

### 5.1 UWB 定位应用现状和趋势

#### 5.1.1 UWB 测距应用

最新的 FCC 报告为 UWB 雷达与传感器应用开放了更宽的频带: 5.925 ~ 7.250GHz, 16.2 ~ 17.7GHz, 23.12 ~ 29.0GHz. UWB 定位研究的著名学者 FONTANA 总结了近年来 UWB 测距应用<sup>[6,38]</sup>, 从不同精度需求和应用场合, 可分为入侵检测系统、防冲撞系统和精确测距系统. 其中入侵检测 (Intrusion Detection) 属于粗略测距应用, 不要求精确坐标, 便于对特定区域内的目标监控, 对区域外物体进行示警。

防冲撞 (Obstacle Avoidance) 系统可用于智能交通管理、自动巡航系统等, 目标检测灵敏度要比入侵检测系统高得多. SPIDER 是一种典型的防冲撞系统, 工作频率在 6.35GHz 左右, -3dB 带宽达到 500MHz, 高功率段 (0.8W) 的 SPIDER 的测距范围可达 300m, 利用 DP 检测其精度可接近 0.3m。

PALS (Precision Asset Location System) 是以测距为基础的精确定位系统. 2003 年美国海军研究机构开发了符合 FCC 民用规范的 PALS650<sup>[6]</sup>, 工作频段范围包括在 3.1 ~ 10.6GHz 之间. 定位方式采用 TDOA, 在 LOS 环境下定位范围可达 200m, 接收 SNR 较高时采用平均处理后的定位精度接近 0.08m。

#### 5.1.2 雷达探测、成像和跟踪等应用

雷达探测、遮挡目标检测是 UWB 测距定位技术的传统应用方式<sup>[5,6,39]</sup>, 此类应用还可以推广至雷达探地和透墙检测系统<sup>[40]</sup>. 医学成像也是 UWB 定位应用较多的领域之一, 最近英国 University of Bristol 的研究者首次给出了该项应用的临床结果<sup>[41]</sup>, 成功地利用 UWB 定位技术完成了乳腺癌检测和成像。

跟踪是一种实时性要求较高的定位应用. DARPA 的研究者利用 UWB 定位技术, 实现对空间飞行器舱外摄像机的位置跟踪<sup>[42]</sup>, 采用的是 TDOA 定位方式. 当然这种应用场景接近理想化: 几乎不存在多径效应, 实际上 UWB 定位跟踪同样可应用于诸多复杂环境。

#### 5.1.3 业界 UWB 定位系统的发展

2005 年初 UWB 被 CNN 评为 2004 年十大热门技术之一, UWB 的产品化进程也一直是研究者和业界所关注的议题. 这里介绍 3 种近年来有代表性的 UWB 定位示范性系统。

##### (1) Localizers 定位系统

Localizers 是由 AETHER WIRE & LOCATION 开发的

室内定位系统. 通过 UWB 信号的伪码时延进行 TDOA 测量, Localizers 节点具备低功耗和微型化特性, 具备一定的穿透能力、可在高噪声条件下工作, 定位范围 30m, LOS 下定位精度可达 5cm。

##### (2) Sapphire 定位系统

Sapphire 系统是由 Multispectral Solutions 开发的 UWB 定位系统, 同样采用 TDOA 方式, 中心频率为 6.2 GHz, 10dB 带宽 1.25GHz. 其最大特点是实时定位系统 (Real-time Location System, RTLS), 位置更新速率为 200 次/s, 即时定位精度可达到 0.3m。

##### (3) Unbise 室内定位系统

Unbise 是由 Ubisense 公司开发的 UWB 室内定位系统, 定位方式为 AOA 和 TDOA 的联合使用, 完成 3D 定位只需两个参考端, 理论上其定位精度可达 0.15m. 定位节点每 6.25 $\mu$ s 可更新一次位置信息, 也可视为实时定位系统 (RTLS)。

#### 5.1.4 UWB 定位的应用趋势

根据当前频谱使用情况, EHF 频段上资源丰富, 宽带或超宽带应用都可独自占用频带, 这是未来无线通信发展可能的方向之一, 极高频段的 UWB 定位系统正反映了这一趋势<sup>[35,39]</sup>。

利用 UWB 定位技术进行仿生学应用是目前较新的应用领域, 如根据 UWB 信号特点进行类似于蝙蝠 (Bat-type) 的定位成像<sup>[43]</sup>, 配置单个发射机和两个接收机作为感应器, 发射 UWB 信号并接收由墙面、边缘和角落等目标的反射信号来确定距离, 根据不同的反射特征来识别不同目标, 这是将定位、成像和特征分类等技术的综合使用。

这与 3.2.2 节中提到的 HDSA 在一定程度上类似, UWB 由于自身的技术特点, 具备定位时对周围环境和自身位置高清晰辨识能力, 因此可在某些极端环境下对视觉损伤 (Visually Impaired) 起到恢复与支撑作用<sup>[44]</sup>。

略感遗憾的是, 由于对 UWB 定位的应用研究起步较晚和一些技术规范等原因, 还未能见到国内自主研发出 UWB 定位系统的相关报导. 但可喜的是, 信息与工业化部已经对我国 UWB 的预开放频段进行公示, 公示频段包含了低频段的 4.2 ~ 4.8GHz 和高频段的 6 ~ 9GHz, 并且已经有相关科研机构研制出了 UWB 数据传输系统, 这预示着我国 UWB 定位系统 and 应用都将为期不远。

## 5.2 UWB 定位的下一步研究方向

近十多年来, 由于探测、导航跟踪、目标识别等众多领域对精确定位的需求, 使得 UWB 定位再次成为了广受关注的前沿课题, 目前 UWB 定位研究仍在持续发展中. 本小节将讨论 UWB 定位值得进一步探讨的方向。

### 5.2.1 UWB 定位的精确性与实时性

实际中,定位精度并不是判断定位系统优劣的唯一标准,如在跟踪等应用场合中定位实时性往往也是非常重要的指标,这体现了 UWB 定位系统中精确性与实时性的矛盾.一般地,获得更多的测量数据来进行后处理能改善定位精度,当然数据处理时间的相应增加,无法满足快速定位的需求.因此未来的 UWB 定位系统应当同时满足精确性和实时性的要求,这对 UWB 定位系统设计和高速数据处理是一个巨大挑战.

### 5.2.2 高精度定位时的压缩感知

UWB 信号可以达到纳秒级的时间分辨率,信号带宽在 GHz 级别,要获得高精度定位的优势依赖于宽带信号检测,因此需要高采样率的 ADC.对一些需要更高的精确定位的场合,则需要 GHz 甚至更高的采样率,尽管 10GHz 以上的 ADC 器件已经出现,但由于成本很高,功耗也非常大,难以应用到 UWB 定位系统中.

高采样率的 ADC 在实际应用时的困难将会限制 UWB 定位精度,压缩感知(Compressed Sensing, CS)理论是解决该问题的一种可行方案<sup>[45]</sup>.CS 方法通过寻找合适的基函数来进行信号重构,能在表示信号的同时去除冗余性.CS 框架重构的条件是信号在某个“域”中表现出稀疏性,如光滑信号和分片光滑(piecewise smooth)信号能在 Fourier 域(即频域)和 Wavelet 域稀疏表示,UWB 信号多径分量具备时域稀疏性,并且定位应用中信息速率较低,这为 CS 在 UWB 定位应用中提供了有利前提,理论上,基于感知压缩的 UWB 多径分量检测算法可以在保证定位精度的同时,降低 ADC 采样速率.

### 5.2.3 复杂场景下的 UWB 定位与通信功能集成

文献[46]提出了这样一种 UWB 定位跟踪系统,在突发事件中(如大楼火灾),无法利用现有的设施了解现场情况来组织救援,此时通过 UWB 设备快速组网,进行低速通信和定位追踪,完成搜索、引导和监控等.这反映出 UWB 定位、通信和网络协议一体化是未来发展的趋势,欧洲的 EUROPCOM 计划已经着手制定复杂突发场景中 UWB 应用的规范<sup>[47]</sup>.

### 5.2.4 认知 UWB 定位与无缝定位

UWB 信号在一定程度上具备了认知无线电(CR: Cognitive Radio)的特性:IR-UWB 方式利用脉冲成形、MB-OFDM-UWB 通过选择子带,两种信号体制都能有效使用频谱空洞,最大化频谱利用率.更为重要的是,不同的定位场合要求不同的定位精度,而定位系统中所占用带宽是影响精度的关键因素.若将 CR-UWB 用于定位<sup>[48]</sup>,则可根据探测到的频谱空洞来调节不同级别的定位精度,这种利用 CR 的思想来构建 UWB 定位精度自适应机制,将是一个极具吸引力的研究方向.

无缝定位(Seamless Positioning)是未来通信导航定

位系统的首要目标之一<sup>[49]</sup>,与大范围的定位系统相比,如 GPS、无线蜂窝定位等,UWB 作为局部范围内的精确定位技术有其独特的优势,是无缝定位中的重要环节.此外,UWB 与惯性器件等的结合使用也将有助于支持系统的运动估计<sup>[50]</sup>.而 UWB 频谱共存、定位机制和空中接口等是需要研究的关键问题.

## 6 结束语

UWB 技术由于具有极大的信号带宽和良好的时间分辨率,凸显了其在定位应用中的优势.本文主要从不同 UWB 信号定位及其定位方式、TOA 时延估计理论、协作式定位等方面,系统回顾了近年来 UWB 定位研究历程,讨论了 UWB 定位系统应用的发展现状和趋势,指出了 UWB 定位的进一步研究方向,旨在吸引更多研究者对这一领域的关注,以期推动 UWB 定位在理论研究和实际应用中取得更加深入和实质性的进展.

### 参考文献:

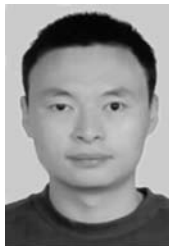
- [1] Roy S, Foerster J R, Somayazulu V S. Ultrawideband radio design: The promise of high-speed short-range wireless connectivity[J]. IEEE Proceedings, 2004, 92(2): 295 - 311.
- [2] Scholtz R A. Multiple access with time-hopping impulse modulation[A]. MILCOM Proceeding[C]. Bedford, MA, 1993. 447 - 450.
- [3] Yang L Q, Giannakis G B. Ultra-wideband communications an idea whose time has come[J]. IEEE Signal Processing Mag, 2005, 11: 26 - 54.
- [4] Molisch A F. Ultra-wide-band propagation channels[J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(2): 353 - 371.
- [5] Win M Z, Dardari D, Molisch A F, et al. History and applications of UWB[J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(2): 198 - 204.
- [6] Fontana R J. Recent system applications of short-pulse ultrawideband (UWB) technology[J]. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, 2004, 52(9): 2087 - 2104.
- [7] Gezici S, Tian Z, Giannakis G B. Localization via ultra-wideband radios-A look at positioning aspects of future sensor networks[J]. IEEE Signal Processing Mag, 2005, 22(4): 70 - 84.
- [8] Dardari D, Conti A, Fener U, et al. Ranging with ultrawide bandwidth signals in multipath environments[J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(2): 404 - 426.
- [9] Molisch A F, Balakrishnan K, Chong C C. IEEE 802. 15. 4a channel model-final report [EB/OL]. <http://www.ieee802.org/15/pub/TG4a.html>. 2005 - 03.
- [10] Feng K T, Chen C L, Chen C H. GALE: An enhanced geometry-assisted location estimation algorithm for NLOS environments[J]. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2008, 7(2): 199 - 213.

- [11] Lay K T, Chao W K. Mobile positioning based on TOA/TSOA/TDOA measurements with NLOS error reduction[A]. Proceedings of 2005 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems, ISPACS2005 [C]. Hong Kong, 2005. 545 – 548.
- [12] Zhen B, Li H B, Kohno R. Clock management in ultra-wideband ranging[A]. 16th IST Mobile and Wireless Communications Summit [C]. Budapest, 2007. 1 – 5.
- [13] LEE J Y, SCHOLTZ R A. Ranging in a dense multipath environment using an UWB radio link[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2002, 20(9): 1677 – 1683.
- [14] GUVENC I, SAHINOGLU Z, ORLIK P V. TOA estimation for IR-UWB systems with different transceiver types[J]. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, 2006, 54(4): 1876 – 1886.
- [15] 吴绍华, 张乃通. 基于 UWB 的无线传感器网络中的两步 TOA 估计法[J]. 软件学报. 2007, 18(5): 1164 – 1172.  
WU Shao-hua, Zhang Nai-tong. A two-step TOA estimation method for UWB based wireless sensor networks[J]. Journal of Software, 2007, 18(5): 1164 – 1172. (in Chinese)
- [16] GUVENC I, Gezici S, Sahinoglu Z. Ultra-wideband range estimation: Theoretical limits and practical algorithms[A]. Proc. of International Conference on Ultra-Wideband, ICUWB '08 [C]. Hannover, Germany, 2008. 93 – 96.
- [17] Antonio A. D'Amico, Umberto Mengali, Lorenzo Taponecco. Energy-based TOA estimation[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2008, 7(3): 838 – 847.
- [18] Dardari D, Chong C C, Win M Z. Threshold-based time-of-arrival estimators in UWB dense multipath channels[J]. IEEE Trans on Communications, 2008, 56(8): 1366 – 1378.
- [19] Cardinali R, Nardis L D, Benedetto M. UWB ranging accuracy in high and low-data-rate applications[J]. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, 2006, 54(4): 1865 – 1875.
- [20] Dardari D, Chong C C, Win M Z. Improved lower bounds on time-of-arrival estimation error in realistic UWB channels [A]. International Conference on Ultra-Wideband, ICUWB '06 [C]. Waltham, Mass, USA, 2006. 531 – 537.
- [21] Ahmad S J, Sedki M, Rian A M. Ultra-wideband propagation measurements and channel modeling. DARPA NETEX Program. Report on Through-the-wall propagation and material characterization[EB/OL]. <http://www.darpa.mil/ato/solicit/netex/docs/models.pdf>, 2002 – 11.
- [22] Schroeder J, Galler S, Kyamaky K. NLOS detection algorithms for ultra-wideband localization[A]. The 4th Workshop on Positioning, Navigation and Communication. WPNC2007 [C]. Hannover, Germany, 2007. 159 – 166.
- [23] Lee J Y, Yoo S. Large error performance of UWB ranging in multipath and multiuser environments[J]. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, 2006, 54(4): 1887 – 1895.
- [24] Yu K G, Guo Y J. Improved positioning algorithms for non-line-of-sight environments [J]. IEEE Trans. on Vehicular Technology, 2008, 57(4): 2342 – 2353.
- [25] 吴绍华, 张钦宇, 张乃通. 密集多径环境下 UWB 测距的 NLOS 误差减小方法[J]. 电子学报. 2008, 36(1): 39 – 45.  
Wu Shao-hua, ZHANG Qin-yu, ZHANG Nai-tong. A NLOS error mitigation method for UWB ranging in dense multi-path environments[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(1): 39 – 45. (in Chinese)
- [26] GUVENC I, Chong C C, Watanabe F. NLOS Identification and mitigation for UWB localization systems[A]. Wireless Communications and Networking Conference, WCNC '07 [C]. Hong Kong, 2007. 1573 – 1578.
- [27] Wymeersch H, Lien J, Win M Z. Cooperative localization in wireless networks[J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(2): 427 – 450.
- [28] 杨庚, 王江涛, 程宏兵, 等. 基于身份加密的无线传感器网络密钥分配方法[J]. 电子学报, 2007, 35(1): 180 – 184.  
Yang Geng, Wang Jiang-tao, Cheng Hong-bing, et al. A key establish scheme for WSN based on IBE and diffie-hellman algorithms[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(1): 180 – 184. (in Chinese)
- [29] Shi Y, Hou Y T, Sherali H D. Cross-layer optimization for data rate utility problem in UWB-based ad hoc networks[J]. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2008, 7(6): 764 – 777.
- [30] Conti A, Dardari D, Win M Z. Experimental results on cooperative UWB based positioning systems[A]. Proc. of International Conference on Ultra-Wideband, ICUWB '08 [C]. Hannover, Germany, 2008, 1. 191 – 195.
- [31] Ferner U, Wymeersch H, Win M Z. Cooperative anchor-less localization for large dynamic networks[A]. Proc. of International Conference on Ultra-Wideband, ICUWB '08 [C]. Hannover, Germany, 2008, 2. 181 – 185.
- [32] Seow C K, Tan S Y. Non-line-of-sight localization in multipath environments[J]. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2008, 7(5): 647 – 660.
- [33] Xu H L, Chong C C, GUVENC I, et al. High-resolution TOA estimation with multi-band OFDM UWB signals[A]. IEEE International Conference on Communications, ICC08 [C]. Beijing, China, 2008. 4191 – 4196.
- [34] Saberinia E, Tewfik A H. Ranging in multiband ultrawideband communication systems[J]. IEEE Trans. on Vehicular Technology, 2008, 57(4): 2523 – 2530.
- [35] Meier C, Terzis A, Lindenmeier S. A robust 3-D high precision radio location system[A]. IEEE/MTT-S International Microwave Symposium [C]. Honolulu, Hawaii, 2007. 397 – 400.
- [36] Waldmann B, Weigel R, Gulden P, et al. Pulsed frequency modulation techniques for high-precision ultra wideband rang-



- ing and positioning [A]. Proc. of International Conference on Ultra-Wideband, ICUWB'08 [C]. Hannover, Germany, 2008. 2. 133 – 136.
- [37] Yan J, Bellusci G, Tiberius C, Jassen G. Analyzing non-linear effect for indoor positioning using an acoustic ultra-wideband system [A]. The 5th Workshop on Positioning, Navigation and Communication, WPNC'08 [C]. Hannover, Germany, 2008. 95 – 101.
- [38] Fontana R J, Foster L A, Fair B, Wu D. Recent advances in ultra wideband radar and ranging systems [A]. IEEE International Conference on Ultra-Wideband (ICUWB) [C]. Singapore, 2007. 19 – 25
- [39] Cemin Zhang, Michael J Kuhn, Brandon C Merkl, Aly E Fathy, et al. Real-time noncoherent UWB positioning radar with millimeter range accuracy: Theory and experiment [J]. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, 2010, 58 (1): 9 – 20.
- [40] Aftanas M, Rovnakova J, Drutarovsky M, et al. Efficient method of TOA estimation for through wall imaging by UWB radar [A]. Proc. of International Conference on Ultra-Wideband, ICUWB'08 [C]. Hannover, Germany, 2008, 2. 101 – 104.
- [41] Klemm M, Craddock I, Leendertz J, et al. Experimental and clinical results of breast cancer detection using UWB microwave radar [A]. International Symposium on Antennas and Propagation Society, APS'08 [C]. San Diego, USA, 2008. 1 – 4.
- [42] Ni J, Arndt D, Ngo P. UWB tracking system design for free-flyers [A]. Space 2004 Conference and Exhibit, AIAA [C]. San Diego, California, 2004. 1 – 9.
- [43] Seitz J, Schaub M, Hirsch O, et al. UWB feature localization for imaging [A]. Proc. of International Conference on Ultra-Wideband, ICUWB'08 [C]. Hannover, Germany, 2008, 2. 199 – 202.
- [44] Riehle T H, Lichter P, Giudice N A. An indoor navigation system to support the visually impaired [A]. The 30th Annual Int. Conf. on Engineering in Medicine and Biology Society [C]. Vancouver, BC, 2008. 4435 – 4438.
- [45] Paredes J L, Arce G R, Wang Z. Ultra-wideband compressed sensing: Channel estimation [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2007, 1(3): 383 – 395.
- [46] Liang X, Lo A, Niemegeers I, et al. An ultra-wide band based ad hoc networking scheme for personnel tracking in emergencies [A]. Second International Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare, PervasiveHealth'08 [C]. Tampere, Finland, 2008. 78 – 81.
- [47] Harmer D, Russell M, Frazer E, et al. EUROPCOM: Emergency ultrawideband radiO for positioning and communications [A]. Proc. of International Conference on Ultra-Wideband, ICUWB'08 [C]. Hannover, Germany, 2008, 3. 85 – 88.
- [48] Celebi H, Arslan H. Cognitive positioning systems [J]. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2007, 6 (12): 4475 – 4483.
- [49] Guolin Sun, Jie Chen, Wei Guo, et al. Signal processing techniques in network-aided positioning: A survey of state-of-the-art positioning designs [J]. IEEE Signal Processing Mag, 2005, 22(4): 12 – 23.
- [50] Jeroen D Hol, Fred Dijkstra, Henk Luinge, et al. Tightly coupled UWB/IMU pose estimation [A]. Proc. of International Conference on Ultra-Wideband, ICUWB'09 [C]. Vancouver, Canada, 2009. 688 – 692.

#### 作者简介:



肖 竹 1981 年生于湖南涟源, 博士, 讲师, 主要研究方向为超宽带通信技术、无线网络通信、测距与定位技术. Email: jr329@163.com

王勇超 1975 年生于河北衡水, 博士, 副教授, 主要研究方向为通信信号处理.

田 斌 1971 年出生于山东菏泽, 博士, 教授, 主要研究方向为通信信号处理、平流层通信.

于 全 1975 年生于江西九江, 博士, 博士生导师, 研究员, 中国工程院院士, 主要研究方向为无线通信与网络、软件无线电.

易克初 1943 年生于湖南涟源, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为无线通信、扩频通信和卫星通信.