

DOI: 10.3979/j.issn.1673-825X.2011.06.015

## 基于延时线模型的 UWB 混沌调频信号测距技术的研究

龚 帅, 孔 龙, 徐哲鑫

(厦门大学 通信工程系, 福建 厦门 361005)

**摘 要:** 提出一种新型的基于延时线模型的超宽带混沌调频信号测距技术, 从理论上推导了该信号的测距克拉美-罗界, 结果表明测距精度与信噪比(SNR)、调频指数以及载波中心频率成正比。仿真并分析了该技术在测距系统中和多用户干扰存在时的测距均方根误差性能, 结果表明, 该技术相比于一般的高斯脉冲雷达检测技术在对抗多用户干扰时有着明显的性能优势。

**关键词:** 超宽带混沌调制信号; 克拉美-罗界; 延迟线测距; 多用户干扰

中图分类号: TN98

文献标识码: A

文章编号: 1673-825X(2011)06-0722-06

### FM chaos UWB signal ranging technology based on delay line model

GONG Shuai, KONG Long, XU Zhe-xin

(Department of Communication Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, P. R. China)

**Abstract:** A new ranging technology based on delay lines model for frequency-modulated chaos ultra-wideband pulse(FMC-UWB) is proposed in this paper. The ranging Cramer-Rao bound(CRB) of this system is derived theoretically. The bound shows that the ranging accuracy is related to Signal-to-Noise Ratio(SNR), frequency modulation index and the center frequency of the carrier signal. The root mean square error(RMSE) performance and multi-user interference of this system is simulated and analyzed. Results show that the performance of this proposed system is more efficient than that of the traditional UWB radar detection system based on Gaussian pulse since the former possesses better capacity of anti-multi-user interference(MUI).

**Key words:** UWB chaos FM signal; Cramer-Rao bound; delay-line ranging; multi user interference

## 0 引 言

混沌信号是混沌系统中某一变量随时间的变化关系、形状与噪声极为相似、具有宽阔且连续频谱分布的非周期信号, 具有长期的不可预测性, 具有各态历经的特性。混沌信号本质上的确定性, 使信号的产生系统更加简单<sup>[1]</sup>, 具有易于产生和控制等特点, 尽管受到作用距离有限、匹配滤波困难等因素的限制, 但因其良好的低截获和抗干扰特性, 正逐渐成为研究的热点<sup>[2]</sup>。

传统的窄带波形限制了检测系统的测距性能,

为获得系统性能的高灵敏度、高分辨率, 需要拓展频率的带宽来获得丰富的高质量信息。超宽带技术解决了困扰传统无线技术多年的有关传播方面的重大难题, 它具有对信道衰落不敏感、发射信号功率谱密度低、低截获能力、系统复杂度低、能提供数厘米的定位精度等优点。正是由于超宽带技术的种种优点使其在无线通信方面具有很大的潜力, 近几年来国外对超宽带(ultra wideband, UWB)信号应用的研究比较热门, 主要用于通信、雷达以及精确定位等<sup>[3-4]</sup>。此外, UWB技术能够与其余电子设备共享频谱, 不会对其他电子设备造成干扰, 无须专有频谱

收稿日期: 2011-06-23 修订日期: 2011-10-10

基金项目: 重庆市科技攻关计划项目(CSTC, 2010AC3060)

Foundation Item: The Technology Research Foundation Project of CQ CSTC (CSTC, 2010AC3060)

资源,也因此不必支付高昂的频谱使用费。

鉴于这 2 种技术特有的优势,混沌超宽带技术已逐渐成为学术界研究的热点,比如频率调制差分混沌键控技术(frequency modulated differential chaos shift keying, FM-DCSK)<sup>[5]</sup>,UWB 混沌雷达图像处理技术等等,但是将这 2 种技术运用于测距还极为少见。本文提出的基于延迟线模型的超宽带混沌调频信号测距系统,从传统的将 UWB 用于通信的视角中跳出,创先将其应用到智能交通(intelligent transport system,ITS)领域<sup>[6-7]</sup>,以检测为切入点,为 UWB 的研发提供了一个新的应用方向。鉴于其精确的定位能力以及低廉的实现成本,该技术相较其他现有技术具有显著优势<sup>[8-10]</sup>。与此同时,其独有的性能优势将触发交通信息采集潜在的巨大需求,推动城市智能交通实用化进程。

### 1 系统架构及原理

图 1a 给出了超宽带混沌调制信号的发射机原理图。混沌信号发生器产生混沌信号,然后经过调制指数为  $K$ ,中心频率为  $f_0$  的 FM 调制器调制产生超宽带混沌调频信号,再由时钟控制每个发射脉冲信号的持续时间和占空比,最后发送信号一方面传送到接收机延时单元模块,另一方面经过功率放大器送至天线末端。

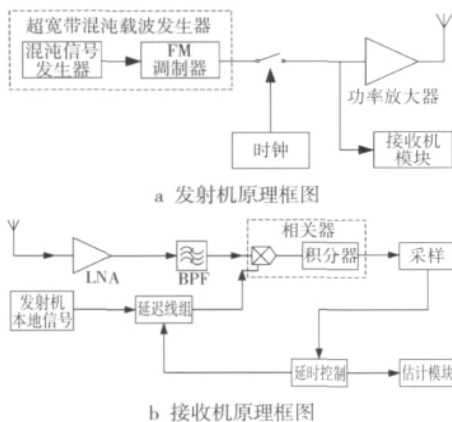


图 1 基于延迟线测距模型的收发机原理框图

Fig.1 T-R ranging system based on delay line

图 1b 给出了基于延迟线测距模型的接收机原理框图。接收信号由超宽带天线接收<sup>[11-15]</sup>,通过射频前端的低噪声放大器(low noise amplifier,LNA)和带通滤波器(band pass filter,BPF)处理得到高信噪比的信号。与此同时,延时控制模块控制本地信号的延迟时间,然后本地延时信号与接收信号进行相

关积分,每一次的相关都会产生一个相关值。最后由估计模块对相关系列值进行峰值检测,最终找到最大相关峰值即接收混沌信号与本地模板信号完全对齐时,根据其对应的时延就可以估计出目标与收发器之间的距离。

### 2 Cramer-Rao 界(CRB)理论分析

本节主要分析超宽带混沌调频信号的测距克拉美-罗界。混沌 FM 信号的数学表达式可以表示为

$$S(t) = A \exp\{j2\pi(f_0 t + K \int_0^t x(\zeta) d\zeta)\} \quad (1)$$

(1) 式中:  $A$  为信号幅度常数;  $x(t)$  为连续混沌信号。为了方便讨论,考虑基带等效信号为

$$S(t) = A \exp\{j2\pi K \int_0^t x(\zeta) d\zeta\} \quad (2)$$

其自相关函数可以表示为

$$R_{ss}(\tau) = E\{S(t + \tau) S^*(t)\} = E\{\exp(j2\pi K \int_t^{t+\tau} x(\zeta) d\zeta)\} \quad (3)$$

(3) 式中:  $\tau$  为时延;  $S^*(t)$  为随机过程  $S(t)$  的复共轭形式。

我们知道,信号的均方根带宽定义为

$$\beta^2 = \frac{\int f^2 S_0(f) df}{\int S_0(f) df} \quad (4)$$

由维纳辛钦定理可知,自相关函数  $R_{ss}(\tau)$  和功率谱  $S_0(f)$  互为傅里叶变换对,即

$$R_{ss}(\tau) = \int S_0(f) \exp(j2\pi f\tau) df \quad (5)$$

对(5)式的  $R_{ss}(\tau)$  进行 2 次求导,得

$$R''_{ss}(\tau) = - \int (2\pi f)^2 S_0(f) \exp(j2\pi f\tau) df \quad (6)$$

对比(4) — (6) 式,不难得到

$$\beta = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{R''_{ss}(0)}{R_{ss}(0)}} \quad (7)$$

混沌信号  $x(t)$  可看作随机过程,由于混沌信号对初值非常敏感,若将积分区间分为  $N$  个子区间  $[t_i, t_{i+1}]$  ( $0 < t_1 < t_2 < \dots < t_i < T$ ),当  $N \rightarrow \infty$  时,则  $x_i(t)$  近似独立同分布,令  $g(t) = \int_0^t x(\zeta) d\zeta \approx \sum_i x_i(t_{i+1} - t_i)$ ,则随机过程  $g(t)$  可以看作  $N$  个独立同分布的和,根据中心极限定理,  $g(t)$  近似服从  $(\mu, \sigma)$  的正态分布,调频信号也近似服从  $(\mu_s, \sigma_s)$  的正态分布。通常混沌信号的均值为 0,设其自相

关函数为  $R_x(\tau)$  ,则

$$\mu_s = E\{2\pi K \int_0^{t+\tau} x(\zeta) d\zeta\} = 2\pi K \int_0^{t+\tau} E\{x(\zeta)\} d\zeta = 0 \quad (8)$$

$$\sigma_s = E\{(2\pi K \int_0^{t+\tau} x(\zeta) d\zeta)^2\} = 4\pi^2 K^2 E\{(\int_0^{t+\tau} x(\zeta) d\zeta)^2\} = 8\pi^2 K^2 \int_0^\tau (\tau-t) R_x(\tau) dt \quad (9)$$

我们知道,正态分布变量的特征函数是

$$E\{\exp(j2\pi K \int_0^{t+\tau} x(\zeta) d\zeta)\} = \exp(-\sigma_s^2/2) \quad (10)$$

将(9)式带入(10)式可得

$$R_{ss}(\tau) = \exp(-\sigma_s^2/2) = \exp(-4\pi^2 K^2 \int_0^\tau (\tau-t) R_x(t) dt) \quad (11)$$

对(11)式自相关函数求二阶导数得到

$$R''_{ss}(\tau) = 4\pi^2 K^2 \int_0^\tau R_x(t) dt \cdot R'_{ss}(\tau) - 4\pi^2 K^2 R_x(\tau) \cdot R_{ss}(\tau) = \{-4\pi^2 K^2 \int_0^\tau R_x(t) dt \cdot R'_{ss}(\tau) - 4\pi^2 K^2 R_x(\tau) \cdot R_{ss}(\tau)\} \quad (12)$$

将(11),(12)式带入(7)式可得

$$\frac{R''_{ss}(0)}{R_{ss}(0)} = (-4\pi^2 K^2 \int_0^\tau R_x(t) dt) - 4\pi^2 K^2 R_x(\tau) |_{\tau=0} = -4\pi^2 K^2 R_x(0) \quad (13)$$

由此调频信号的均方根带宽为  $\beta = K \sqrt{R_x(0)}$  。考虑到对于均值为 0 的随机过程,自相关函数在零点的值就等于方差,即  $R_x(0) = \sigma_x^2$  ,所以均方根带宽可改写为  $\beta = K \sqrt{R_x(0)} = K\sigma_x$  。

扩展到一般情况,即有载频  $f_0$  时,用  $x_1 = x + f_0/K$  代替上式,即

$$R_{x_1}(\tau) = E\{x_1(t+\tau)x_1^*(t)\} = E\{(x(t+\tau) + f_0/K) \cdot (x^*(t) + f_0/K)\} = E\{x(t+\tau)x^*(t)\} + f_0/K \cdot E\{x(t+\tau) + x^*(t)\} + (f_0/K)^2 = R_x(\tau) + (f_0/K)^2 \quad (14)$$

(14)式,  $x^*(t)$  为随机过程  $x(t)$  的复共轭形式。所以中心频率为  $f_0$  时均方根带宽为

$$\beta = \sqrt{\sigma_x^2 K^2 + f_0^2} \quad (15)$$

超宽带信号在无多径 AWGN 信道下的测距理论 CRB 界<sup>[12]</sup>为

$$CRB = \frac{1}{8\pi^2 \beta^2 SNR} \quad (16)$$

(16)式中:  $\beta$  为信号的均方根带宽;  $SNR$  为信噪比。

(15)式代入(16)式,得超宽带混沌调制信号的理论 CRB 界为

$$CRB = \frac{1}{8\pi^2 \beta^2 SNR} = \frac{1}{8\pi^2 SNR} \cdot \frac{1}{\sigma_x^2 K^2 + f_0^2} \quad (17)$$

对应的测距分辨率为

$$\sqrt{\text{var}(\hat{d})} \geq \frac{c}{\sqrt{8\pi^2 SNR}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\sigma_x^2 K^2 + f_0^2}} \quad (18)$$

图 2a 给出了在混沌脉冲信号长度为 1.6 ns,调频灵敏度为 0.2 GHz/V,采样频率为 30 GHz,载波中心频率分别为 3.35 GHz,6.70 GHz,13.40 GHz 下的克拉美-罗理论界;图 2b 给出了在混沌脉冲信号长度为 1.6 ns,载波中心频率为 3.35 GHz,采样频率为 30 GHz,不同调频灵敏度的克拉美-罗理论界。可以看出,对于给定的混沌调频信号,其测距精度可达厘米级,并且其主要与信噪比 SNR,调频因子以及载波频率有关,载波中心频率对测距精度的影响比较大,而调频因子对它的影响较小,并且测距精度随着载波中心频率或者调频因子的增加而提高。

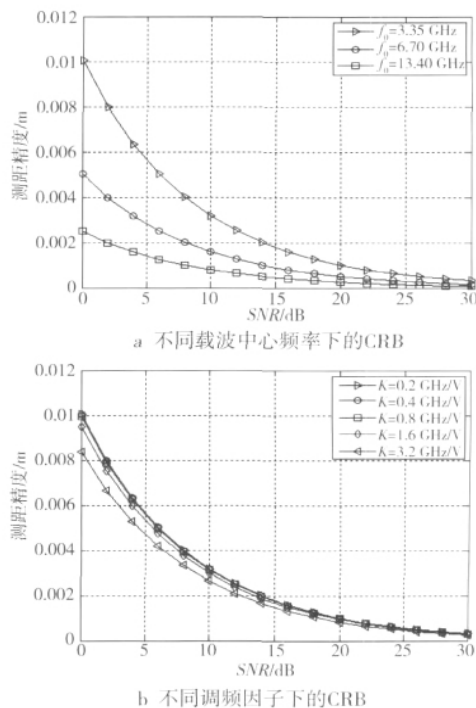


图 2 混沌超宽带调频信号的测距 CRB  
Fig.2 CRB of UWB chaos FM signal

### 3 系统性能仿真分析

从前面的系统架构不难看出,本系统是对反射信号与本地模板信号相关卷积然后计算相关峰值,

根据相关峰值出现的位置估计延迟线时间来进行测距的,简单的延迟线模型可由 FPGA 来实现。

图 3a 给出了距离为 5 m 时,UWB 混沌调频测距系统在延时步长分别为  $T_c, 2T_c, 4T_c$  和  $8T_c$  时的测距均方根误差(RMSE)性能。其中,  $t_0$  是延时线延时间隔,  $T_c$  为信号的采样周期,  $f_c$  为信号的采样率,且  $T_c = 1/f_c$ 。从图 3a 中可以看出,基于 UWB 混沌调频脉冲的测距性能受延时间隔或者信噪比(SNR)的影响比较大。随着信噪比的增加,测距性能有着明显的提高,同时,测距精度随着时间延时间隔的增加而降低。

图 3b 给出了在信噪比 SNR 分别为 10, 15, 20, 25 dB 的条件下,UWB 混沌调频测距系统 RMSE 性能与距离的关系图。图 3b 中延时线的延时间隔取为信号的采样周期,从图 3b 中不难看出,系统的检测性能与信噪比成正比。在信噪比较低,比如 10 dB 的时候,检测性能受信号衰减程度的影响比较大,所以随着距离的缩短,测距 RMSE 随之降低。在高信噪比时,系统的测距性能受距离因素的影响不明显,信噪比为 15 dB 时,测距均方根误差大概在 0.25 左右;信噪比为 20 dB 时,测距均方根误差大概在 0.127 左右;信噪比为 25 dB 时,测距 RMSE 大概在 0.003 左右。

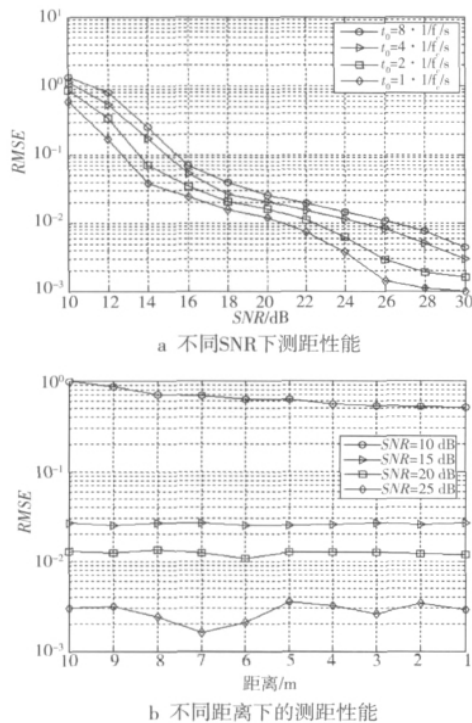


Fig. 3 Performance of UWB chaos FM ranging system

## 4 多用户干扰分析

由于超宽带信道的多径效应或者存在多用户干扰的情况,接收到的信号往往是掺杂着很强的信道干扰噪声或者多用户干扰信号<sup>[14-15]</sup>。当信号与干扰噪声混合后,信号有可能完全淹没在噪声干扰中。利用 UWB 混沌信号的自相关特性,经过相关处理后,在信号处出现峰值,因此可以完成信号延时的估计。此外,由于混沌信号极低的互相关值,即使在有多用户干扰的情况下,其他用户的信号与本信号的相关性也和噪声几乎一样。而传统的高斯脉冲检测雷达虽然具有较明显的自相关特性,但是对于不同的高斯脉冲,其互相关特性极差。所以,UWB 混沌调频信号的优势就非常明显地体现了出来。

图 4 给出了混沌信号与超宽带混沌调频信号的归一化自相关特性和互相关特性对比图。从图 4 可以看出,其自相关函数的峰值旁瓣比超过了 15 dB,超宽带混沌调频信号保留了混沌信号原有的非常好的自相关特性以及很小的互相关值,这就为 UWB 混沌调频信号的抗多用户干扰性能提供了强有力的理论依据。

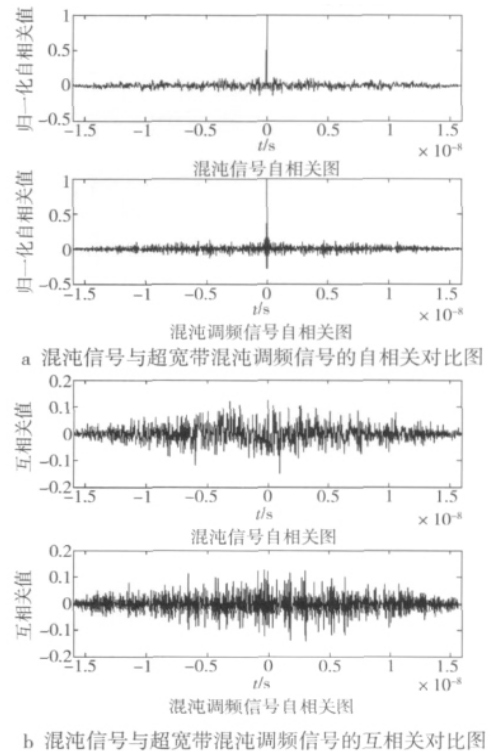


图 4 混沌信号与超宽带混沌调频信号的自相关、互相关特性对比图

Fig. 4 Auto-correlation and cross-correlation of chaos and chaos FM signal

图 5 给出了 UWB 混沌调频系统与传统的高斯脉冲 UWB 系统的接收延迟信号波形图和延时相关峰值图在 2 个多用户下的对比。从仿真图 5a 可以看出,传统的脉冲 UWB 系统在无多用户干扰时自相关特性比 UWB 混沌调频系统明显,但是其自相关特性受信号能量影响比较大。当接收干扰信号幅度大于原信号时,其相关值反而大于原信号。也就是说,当多用户干扰信号存在特别是当信号强度大于目标接收信号强度时,系统就不能区别原信号和干扰信号,因此导致系统的性能急剧下降,从而产生非常高的测距误差。而超宽带混沌调频系统并不存在这一现象,如图 5b 所示,干扰用户 a 和 b 先于测距信号 signal 到达并且强度大于目标信号强度,但是相关最大峰值仍然出现在 signal 处,说明混沌调频信号存在着良好的对抗多用户干扰性能。

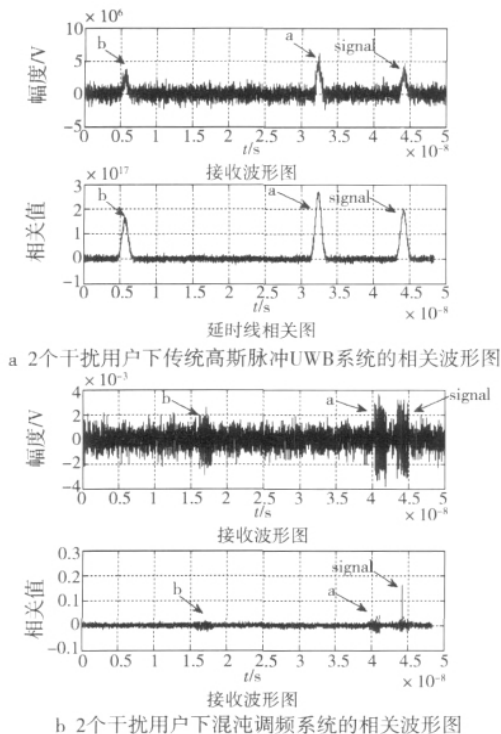


图 5 2 个干扰用户下, UWB 混沌调频系统与传统的脉冲 UWB 系统的对比

Fig. 5 MUI analyze of different system

图 6 是 UWB 混沌调频系统和传统的高斯脉冲检测系统在 2 个干扰用户环境中的测距 RMSE 性能对比。从图 6 中可以看出,对于延时间隔取  $t_0 = 8T_c$  时,基于 UWB 混沌调频系统性能在信噪比为 30 dB 以下时都比传统的系统差;当延时间隔  $t_0 = 4T_c$  时,本系统在信噪比高于 26 dB 后,测距性能比后者好;在延时间隔为  $t_0 = 2T_c$  或者  $t_0 = T_c$  时,前者性能明

显要好于传统的高斯脉冲测距系统。这说明存在 2 个多用户干扰时,传统的高斯脉冲检测系统在信噪比小于 14 dB 时的测距性能好于本系统,并且受延时间隔的影响比较小;基于延时线的 UWB 混沌调频系统的测距性能受延时间隔的影响比较大,但是在较高的信噪比和较小的延时间隔下,基于混沌调制 UWB 脉冲技术的系统性能明显好于传统高斯脉冲检测系统。

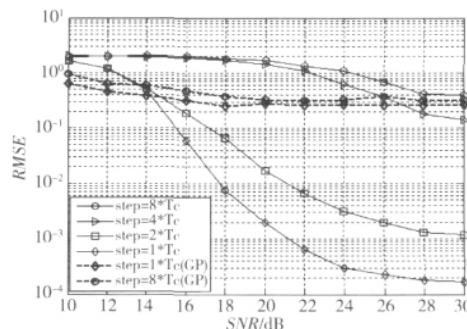


图 6 2 个干扰用户下的系统测距性能

Fig. 6 Ranging performance with 2 MUI

## 5 结束语

面向低成本和低功耗应用场合,如 ITS 的车辆检测系统,研究了超宽带混沌调频信号的测距技术。分析了测距克拉美-罗的理论下界,由于调频因子和载波中心频率对信号带宽的影响,其测距性能随着调频因子和载波中心频率的增加而变好。通过对系统的仿真分析可知,基于 UWB 混沌调频的测距技术的检测性能受延时间隔影响比较大,在对抗多用户干扰时,在较高的信噪比和较小的延时间隔下,本系统比传统的 UWB 脉冲雷达测距技术有着较明显的优势。因此,增加少量的硬件成本便可以换取明显的性能改善。鉴于这一特点,使得 UWB 混沌调频技术在多目标、协作检测等领域相比于其他雷达技术存在着潜在的技术优势和应用前景。

### 参考文献:

- [1] SPROTT J C. Simple chaotic systems and circuits [J]. Am J Phys, 2000, 68(8): 758-763.
- [2] STEPHEN Harman. The Diversity of Chaotic Waveforms in Use and Characteristics [C] // Waveform Diversity and Design in Communications, Radar and Sonar, The Institution of Engineering and Technology Forum on, 22 Nov. London: IET Press, 2006: 33-40.
- [3] BARRETT W. History of Ultra Wide Band( UWB) radar

- & communications: pioneers and inventors [M]. Cambridge: Electromagnetics Academy, 2000: 8-11.
- [4] ARSIAN Huseyin, CHEN Zhi-ning, BENEDETTO Maria Gabriella Di. Ultra Wideband Wireless Communication [M]. England: John Wiley & Sons Ltd, 2006: 463-468.
- [5] MIN Xin, XU Wei-kai, WANG Lin, et al. Promising Performance of an FM-DCSK UWB System under Indoor Environments [J]. IET Transaction on Communications, 2010, 4(2): 125-134.
- [6] ZHU Jing, ROY Sumit. MAC for Dedicated Short Range Communications in Intelligent Transport System [J]. Topics in wireless communications, 2003, 41(12): 60-67.
- [7] VENKATASUBRAMANIAN Vijayaraghavan, LEUNG Henry. A Robust Chaos Radar for Collision Detection and Vehicular Ranging in Intelligent Transportation Systems [C]//2004 IEEE intelligent Transportation Systems Conference. Washington D C: IEEE Press, 2004: 548-552.
- [8] AXELSSON Sune R J, Axelsson. Random Noise Radar/Sodar With Ultrawideband Waveforms [J]. IEEE Transaction on geoscience and remote sensing, 2007, 45(5): 1099-1114.
- [9] 郑慧芳, 邓云凯. 随机噪声调频信号带宽分析 [J]. 科学技术与工程, 2009, 9(15): 4351-4357.  
ZHENG Hui-fang, DENG Yun-kai. Analysis of Random Noise Frequency Modulation Signals Bandwidth [J]. Science Technology and Engineering, 2009, 9(15): 4351-4357.
- [10] FLORESB C, SOLIS E A, THOMAS G. Assessment of chaos-based FM signals for range-Doppler imaging [J]. Radar, Sonar and Navigation, IEE Proceedings, 2003, 150(4): 313-22.
- [11] 周超, 曹海林, 杨力生. 一种改进的共面波导馈电超宽带天线设计 [J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2008, 20(1): 39-41.
- ZHOU Chao, CAO Hai-lin, YANG Li-sheng. Design of an improved CPW-fed UWB antenna [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications: Natural Science Edition, 2008, 20(1): 39-41.
- [12] DARDARID, CONTI A, FERNER U, et al. Ranging With UWB signal in multipath channel environments [J]. proceedings of IEEE, invited paper, 2009, 97(2): 404-426.
- [13] ZHAN Hai, AYADI Jaouhar, FARSEROTU John, et al. Impulse Radio Ultra-Wideband Ranging under Multi-User Environments [C]//IEEE 69<sup>th</sup> Vehicular technology conference. Barcelona: IEEE Press, 2009: 1-5.
- [14] 马英杰, 周正, 范晓红. 认知干扰抑制超宽带自适应脉冲设计 [J]. 北京邮电大学学报, 2011, 34(4): 1-5.  
MA Ying-jie, ZHOU Zheng, FAN Xiao-hong. Cognitive UWB Adaptive Pulse Design for Interference Suppression [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2011, 34(4): 1-5.
- [15] 翁呈祥, 高玉良, 许明, 等. 超宽带双脊喇叭天线的设计 [J]. 压电与声光, 2011, 33(2): 336-338.  
WENG Cheng-xiang, GAO Yu-liang, XU Ming, et al. Design of UWB Double-ridged Horn Antenna [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2011, 33(2): 336-338.

## 作者简介:



龚 帅(1987-),男,四川绵阳人,硕士研究生,研究方向为超宽带混沌信号的测距与定位技术。E-mail: gongshuai86@163.com。

(编辑:王敏琦)