

# 空间精密 OFDM 测距技术

任光亮, 孙垂强, 倪浩, 常义林

(西安电子科技大学综合业务网理论及关键技术国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

**摘要:** 根据 OFDM 的时频特性, 提出了一种新的空间测距方法. 首先在时域对 OFDM 信号进行相关处理, 得到距离的粗估计, 在粗估计的基础上, 利用 OFDM 不同子载波数据之间的相位差, 得到距离的精确估计, 根据精确估计的结果对粗估计的结果进行校正, 从而得到最终的距离估计值. 仿真结果表明, 该方法的测距精度比采用延迟锁定环的伪码测距方法至少提高了 4 倍, 并且在信噪比大于 20 dB 时, 可以达到厘米级.

**关键词:** 正交频分复用; 相关处理; 相位测量; 测距精度

**中图分类号:** TN919      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-2400(2009)02-0203-04

## OFDM based precise ranging technique in space

REN Guang-liang, SUN Chui-qiang, NI Hao, CHANG Yi-lin

(State Key Lab. of Integrated Service Networks, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

**Abstract:** According to the properties of OFDM in the time and frequency domains, a novel ranging method in space is proposed. The coarse estimation of range can be obtained from the correlation of the waveforms of OFDM signals in the time domain, and the fine estimation is obtained from the phase differences between the sub-carriers in the frequency domain. The fine estimation is then adopted to correct the coarse estimation, and the final estimation of range is achieved. Simulation results show that the ranging accuracy of the proposed method is more than 4 times better than that of pseudo-code ranging. Furthermore, the ranging accuracy is close to the centimeter level when the signal-to-noise ratio is beyond 20 dB.

**Key Words:** orthogonal frequency division multiplexing; correlation processing; phase measurement; ranging accuracy

无线电测距技术是卫星测控系统、导航系统和高精度空间测距系统等的关键技术<sup>[1]</sup>. 随着新一代卫星系统测控技术的发展和导航系统研究的深入开展, 对测距系统提出了更高的要求, 要求测距系统具有更高的测距精度和更大的不模糊测距范围. 针对卫星测控系统和航天导航系统发展的要求, 近年来在测距技术领域开展了大量的研究<sup>[2-3]</sup>.

伪随机码测距技术是近年来在无线通信、卫星测控和导航系统中应用研究的热点. 它具有抗干扰、抗噪声、抗多径衰落、保密性强、功率谱密度低, 隐蔽性好和截获概率低、可多址和任意选址等特点, 并与第三代无线通信、卫星通信和测控中的扩频调制技术兼容. 但由于伪随机码的码片速率和数字化处理中码片采样相位的误差等因素严重地影响到到达时间(TOA)或时延差的测量精度, 使得伪随机码测距技术的测距精度不高. 如果要进一步提高其测距精度, 就需要非常高的伪随机码码片速率, 这会大大增加系统实现的技术难度. 采用伪随机码测距技术与其他测距技术结合会使测距系统变得非常复杂<sup>[4]</sup>. 采用延迟锁定环的测距方法使得测距精度主要取决于延迟锁定环的跟踪精度<sup>[5]</sup>, 因而, 这些伪随机码测距技术都很难满足现代测距系统的要求.

收稿日期: 2008-02-10

基金项目: 国家自然科学基金资助(60602063); 陕西自然科学基金资助(2006F28)

作者简介: 任光亮(1971-), 男, 教授, 博士, E-mail: glren@mail.xidian.edu.cn.

相位测距是一种性能优越的测距方法,但由于相位的周期为  $2\pi$ ,这种方法的测距精度与测距范围存在一定的矛盾,即精度较高时,其测距范围较小.文献[6]提出了可以在一定程度上缓解相位模糊问题的测距方案,使测量距离范围变大,但是并没有完全消除相位模糊,测距范围还是存在一定的限制.

多载波调制技术是近年来在无线通信领域研究的热点,它具有高的频带利用率、强的抗多径衰落和窄带干扰能力.正交频分复用(OFDM)是多载波调制技术中应用最为广泛的一种,OFDM系统的最大特点是利用FFT和IFFT建立了时域和频域之间的联系,为系统进行时频处理提供了框架,也为开展新测距理论与技术的探索提供了研究思路[7].OFDM信号的时域相关处理与伪随机码的相关处理类似,而在频域上利用各个子载波数据可以获得各个子载波之间的相位信息,因而可以利用OFDM信号的时频二维特点,在时域上采用与伪随机码类似的相关法进行测距,获得大的不模糊测距范围,在频域上利用各个子载波的数据进行相位测距,获得高精度的测距精度.基于OFDM的测距方法可将伪随机码和相位测距进行有效结合,克服伪随机码和相位测距存在的问题,同时又简化发送和接收设备的复杂度.子载波之间的正交性,可以避免多频测距方法可能存在的载频间干扰,子载波数据可根据测距精度和最大不模糊距离的需要灵活选择.通过选取CAZAC序列作为发送数据,可以使OFDM信号达到较小的峰均比,从而可以解决OFDM信号固有的峰均比问题.

笔者根据OFDM所具有的时频特性,在时域和频域分别利用相关检测和相位测距的高精度特性,提出了一种新的测距方案.该方案首先在时域利用相关技术进行距离粗估计,然后在频域利用相位进行距离精确估计,从而实现大范围的精密测距.

## 1 OFDM 精密测距系统

笔者提出的OFDM测距方案中的系统模型如图1所示,测距系统主要分为发送端、转发端和接收端3部分.在发送端先产生调制序列,经过IFFT变换,频域序列转换为时域数据,生成测距信号并发送出去,待测目标接收到测距信号后,存储并进行转发,接收端接收到转发端发出的信号,首先在预处理单元对信号在传播过程中出现的扩散、失真等进行相应的处理,如频偏校正等,然后进行时域粗估计和频域精估计,从而估计出所测距离.

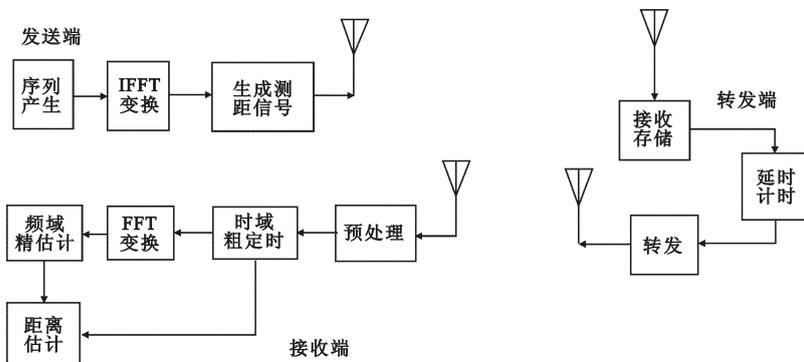


图1 OFDM测距系统原理框图

设发送的OFDM复基带信号为

$$x(t) = \sum_{i=0}^{N-1} X_i \exp\left(j2\pi \frac{i}{T}t\right), \quad (1)$$

式中,  $X_i = \exp(j\varphi_i)$  为分配给每个子载波的频域数据符号,是具有良好自相关特性的相位编码序列(本文中采用CAZAC序列),  $\varphi_i$  为数据的相位,  $N$  为序列长度,  $T$  为一个OFDM符号持续时间.该信号经过无线信道传输,在测距终端进行转发处理,最后由接收端接收到的信号为

$$y(t) = \alpha x(t - \tau) + n(t), \quad (2)$$

式中,  $\alpha$  为幅度衰减因子,  $\tau$  为时延,  $n(t)$  为高斯白噪声.在空间中信号传播环境为时变高斯白噪声信道.由于OFDM符号周期非常小,在一个OFDM符号周期内,可以近似认为信道传输系数  $\alpha$  是时不变的.

## 2 OFDM 测距方案

在笔者提出的 OFDM 测距方案中,充分利用了 OFDM 信号的时频特性,在时域上利用相关技术检测接收信号并进行粗估计,频域上在相关值最大对应时刻对接收信号进行 FFT 变换后,通过求出由时延引起的相位偏移,进行精确估计.既利用了相关测距抗噪声干扰的特性,又利用了相位测距的高精度,通过时频的联合处理,从而大大提高了定位估计的精度.

### 2.1 时域相关处理粗估计

对接收端的接收信号以间隔  $T_s = T/N$  进行采样,得到:

$$y(kT_s) = \alpha x(kT_s - \tau_f) + n(kT_s) \quad , \quad (3)$$

其中,  $\tau_f$  为不足一个采样间隔的时延,称为小数时延.将采样后的信号与本地序列进行时域离散相关处理,相关处理可表示为

$$R(m) = \sum_{k=0}^{N-1} y_{k+m} x_k^* \quad , \quad (4)$$

式中,  $y_k$  为接收信号的离散采样,  $x_k$  为发送信号的采样序列.记  $\hat{d}$  为相关值最大时对应的采样序号,即

$$\hat{d} = \arg\{\max_m |R(m)|\} \quad , \quad (5)$$

$\hat{d}$  就是发送端发送的 OFDM 测距信号的起始点,即进行频域解调时 FFT 窗口起始点.整数倍时延估计为

$$\hat{\tau}_c = \hat{d}T_s \quad . \quad (6)$$

### 2.2 频域精确估计

在粗估计后,对接收数据进行 FFT 变换,得到频域数据  $Y_i$ . 令

$$Z_i = Y_i X_i^* \quad , \quad (7)$$

$X_i$  为频域形式的发送数据,  $i = 0, 1, \dots, N-1$ . 令

$$W = \sum_{i=0}^{N-\Delta-1} Z_{i+\Delta} Z_i^* \quad , \quad (8)$$

则  $W$  的相位为

$$\hat{\varphi} = \text{angle}\{W\} \quad , \quad (9)$$

其中,  $\hat{\varphi}$  即为间隔  $\Delta$  个子载波的相位偏移之差的估计值.

由于小数时延  $\tau_f$  导致频域数据发生相位偏移,在接收数据中,第  $i$  个子载波上的数据相对于发送数据的相位偏移为

$$\theta_i = 2\pi(i/T)\tau_f \quad . \quad (10)$$

则第  $i+\Delta$  个子载波相位偏移与第  $i$  个子载波相位偏移之差为

$$\theta_{i+\Delta} - \theta_i = 2\pi \frac{i+\Delta}{T} \tau_f - 2\pi \frac{i}{T} \tau_f = 2\pi \frac{\Delta}{T} \tau_f \quad . \quad (11)$$

结合式(9),便可得到小数时延的估计:  $\hat{\tau}_f = \hat{\varphi} / (2\pi\Delta/T)$  . (12)

假设在接收转发过程中,转发端的固有时延为  $\tau'$ ,则实际的 TOA 估计值为

$$\hat{\tau} = (\hat{\tau}_c + \hat{\tau}_f - \tau')/2 \quad . \quad (13)$$

从而求得距离估计值为  $\hat{R} = \hat{\tau}C = ((\hat{\tau}_c + \hat{\tau}_f - \tau')/2)C$  , (14)

其中,  $C=3 \times 10^8$  m/s,为电波在自由空间中的传播速度.

### 2.3 测距方案的性能

测距的性能可以通过均方误差(MSE)或均方根误差(RMSE)表示,而克拉美-罗界(Cramer-Rao Bound)则是性能评价的标准.本测距方案包括时域粗估计和频域精估计两个部分,其测距的精度取决于频域精估计的性能,即相位估计的性能.

在高斯白噪声条件下,相位估计的克拉美-罗界为<sup>[8]</sup>

$$B_{CR}(\hat{\varphi}) = 1/(\Delta \text{SNR}) \quad , \quad (15)$$

因而采用笔者所提出的测距方案,其距离估计的克拉美-罗界可以近似表示为

$$B_{CR}(\hat{R}) \approx T^2 c^2 / (16\pi^2 \Delta^3 \text{SNR}) \quad (16)$$

### 3 计算机仿真结果

为了验证笔者所提出的测距方案的性能,根据以上的理论分析,进行了计算机仿真.在仿真中,系统参数有:子载波数目为1024,采用长度为1024的CAZAC序列,采样频率为10 MHz,即采样间隔  $T_s$  为  $0.1 \mu\text{s}$ ,并且  $\Delta = N/2$ ,信道模型为高斯白噪声信道.为了与伪码测距和连续波相位测距技术进行对比,设定伪码测距参数有:伪码速率为10 MHz,扩频序列采用长度为1024的伪随机序列,采用文献[5]提出的方法进行仿真.延迟锁定环的跟踪精度为码片宽度的1/20,相位测距采用间隔5 MHz的双频信号.

在信噪比为 20 dB 时,伪码测距、连续波相位测距和笔者提出的测距方案测得的距离随实际距离的变化曲线如图 2 所示.由图 2 可以看出,由于相位存在周期,相位测距的范围只有 30 m,当距离超过 30 m 时就会发生测距模糊,本方法和伪码测距没有产生测距模糊.由于本方法中粗距离估计与伪码测距相同,因而其测距范围与伪码的测距范围是一致的.

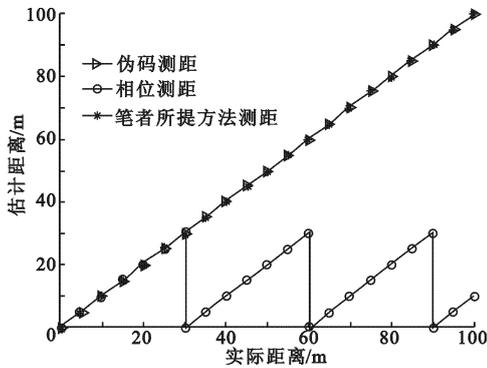


图 2 估计距离随实际距离的变化曲线

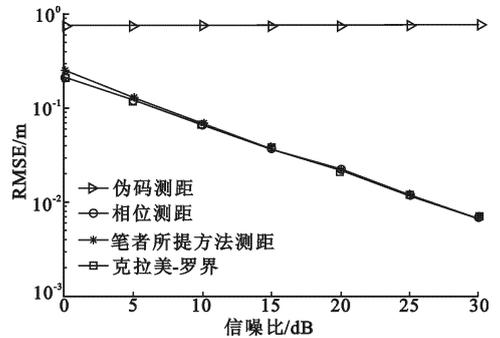


图 3 距离为 25 m 时的 RMSE 曲线

由于相位测距的不模糊距离只有 30 m,为了比较本方法与相位测距方法的精度,在所测距离为 25 m 时进行了计算机仿真.信噪比在 0 dB 到 30 dB 变化时的 RMSE 曲线如图 3 所示.由图 3 可以看出,由于伪码测距精度主要取决于延迟锁定环的精度,随着信噪比的增加,伪码测距精度基本不发生变化,本方法和相位测距方法具有同样高的测距精度,相对于伪码测距的精度至少提高了四倍以上,并且在高信噪比下趋于克拉美-罗界.当所测距离大于 30 m 时,由于相位测距方法存在距离模糊,其性能恶化.

图 4 给出了信噪比为 20 dB,伪码测距、连续波相位测距和本测距方案的 RMSE 曲线,为了仿真方便和性能分析,图 4 只给出了所测距离在 100 m 到 10 000 m 之间变化时的曲线.在图 4 中,由于相位测距存在测距模糊,因而其测距误差较大,且随着距离的增加而增大,本方法和伪码测距在距离变化时, RMSE 基本不变,本方法的 RMSE 约为 20 mm,约为伪码测距的 2%,即其测距精度提高了大约 50 倍.由图 2~图 4 可以看出,本测距方法不但具有良好的测距精度,而且具有较大的测距范围,并且在本文中的仿真条件下,信噪比大于 20 dB 时,测距精度可以达到厘米级.

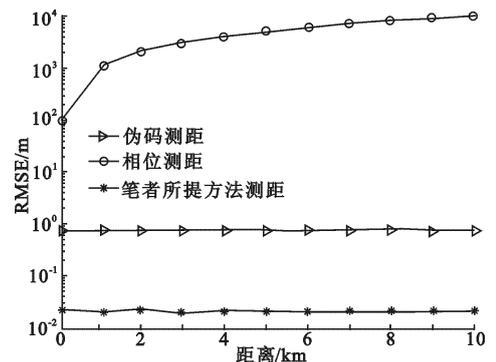


图 4 信噪比为 20 dB 时的 RMSE 曲线

本方法相对于伪码测距在算法复杂度上多进行了  $\frac{N}{2} \log_2 N$  次乘法和  $N \log_2 N + \frac{N}{2}$  次加法运算,在现代信号处理技术的条件下,这些运算量很容易实现.