

基于射频相位的两步测距法

赵阳¹, 黄建尧², 刘德亮^{1,3}, 刘开华^{1*}, 马永涛¹

(1. 天津大学 电子信息工程学院, 天津 300072; 2. 天津七一二通信广播有限公司, 天津 300462;

3. 机械工程学院 导弹工程系, 石家庄 050003)

(* 通信作者电子邮箱 liukaihua@tju.edu.cn)

摘要:针对多径传播造成基于射频信号相位信息测距不准确问题,提出了一种基于双标签的两步测距法。每一待定位目标上附着两个标签。在单频副载波调幅调制方式下,首先,提取载波信号的卷叠相位信息,计算标签在载波半波长范围内与阅读器的距离值,得到细测距估计值;然后,提取副载波信号的展开相位信息,根据展开相位估计标签与阅读器相距距离中包含的载波半波长的整数倍;其次,计算两个标签对应整数倍的平均值,将该平均值倍的载波半波长距离作为两个标签与阅读器之间距离的粗测距估计值;最后,将粗测距与细测距的估计值相叠加得到双标签最终的测距估计值。另外,为了降低硬件设施成本,提出了基于单阅读器和双标签的几何定位方法。仿真实验结果表明,在复杂多径传播环境中,与直接基于副载波信号相位信息测距相比,基于双标签的两步测距法平均测距误差约降低了35%,最终平均定位误差约为0.43 m,最大误差约为1 m,有效提高了相位法在定位技术中的精度,并降低了硬件成本。

关键词:超高频射频识别;射频相位;整周期模糊;多径传播环境;双标签

中图分类号: TP212.9 **文献标志码:** A

Radio phase-based two-step ranging approach

ZHAO Yang¹, HUANG Jianyao², LIU Deliang^{1,3}, LIU Kaihua^{1*}, MA Yongtao¹

(1. School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Tianjin 712 Communication and Broadcasting Corporation, Tianjin 300462, China;

3. Department of Missile Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang Hebei 050003, China)

Abstract: Concerning the ranging inaccuracy problem based on radio signal phase information under multi-path environments, a two-step ranging approach based on double tags was proposed. Each target was attached with double tags. Through single frequency subcarrier amplitude modulation, firstly, the wrapped phase information of carrier signal was extracted, the distance between reader and tag within half wavelength of carrier signal was calculated and fine ranging estimation value was achieved. Secondly, the unwrapped phase information of subcarrier signal was extracted, and the integral multiple of half wavelength within the distance of reader and tag was calculated. Thirdly, the average multiple was calculated between double tags, the distance of average multiple of half wavelength was used as coarse ranging value. Finally, the final ranging result was estimated by the sum of the fine ranging value and coarse ranging value. Additionally, single reader and double-tag based geometric localization method was introduced to reduce the cost of hardware facilities. The simulation results show that, under multi-path environments, compared with the directly ranging with subcarrier phase, the average ranging error of double tags based two-step ranging approach is reduced by 35%, and the final average localization error is about 0.43 m, and the maximum error is about 1 m. The proposed approach can effectively improve the accuracy of phase based localization technology and also reduce the hardware cost.

Key words: Ultra-High Frequency Radio Frequency Identification (UHF RFID); radio phase; whole-cycle ambiguity; multi-path propagation environment; double tags

0 引言

随着科技的不断进步,基于位置的服务已经成为提高生活和生产水平的关键因素。由于无源超高频射频识别(Ultra-High Frequency Radio Frequency Identification, UHF RFID)技术具有低功耗、长寿命以及易维护的特点,使得其成为无线定

位技术的关键技术之一。无源 UHF RFID 定位系统中,常用的测量信息有两种,即能量信息和相位信息。基于能量信息的定位技术^[1-4]具有低功耗,且简单易实现的特点,因此该技术的研究比较普遍。但是由于建立信号能量衰减与传播距离的数学模型非常困难,且能量很容易受到传播环境的影响,再加上标签方向的影响,使得最终的定位精度并不理想。

收稿日期:2015-01-30;修回日期:2015-03-30。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61401301);天津市科技支撑计划重点项目(13ZCZDGX02800)。

作者简介:赵阳(1988-),女,河北石家庄人,博士研究生,主要研究方向:信号处理、无线定位;黄建尧(1981-),男,天津人,高级工程师,博士,主要研究方向:通信技术;刘德亮(1982-),男,山东蓬莱人,博士研究生,主要研究方向:无线定位;刘开华(1956-),男,天津人,教授,博士,主要研究方向:信号与信息处理;马永涛(1979-),男,山东潍坊人,副教授,博士,主要研究方向:通信技术、室内定位。

在基于相位信息的定位技术中,无源射频阅读器类似于连续波(Continuous Wave, CW)雷达。相位信息可以比较精确地估计出信号的传播距离,前提是传播距离不超过信号波长的一半。超高频信号的波长约为几十厘米,而实际应用时信号的传播距离一般为几米甚至几十米,这使得这一应用在测量时必然存在信号传播周期模糊问题。为了提高定位精度,必须将相位信息展开,因此,消除相位周期模糊成了基于相位信息定位技术的关键。文献[5]将标签设计为均匀线性阵列,利用远场阵列信号间几何关系建立误差模型,通过最大似然估计得到位置信息的估计值,最终估计的均方根误差为 0.011 m,最大误差为 0.032 m,但该方法中在 $3.5 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$ 的监测空间中布置了 8 个天线,使得相应的硬件成本较高。文献[6]指出相位信息对标签方向不敏感,利用阅读器天线阵列消除周期模糊所带来的影响,最终平均误差精度为 0.128 m。文献[7]采用多频载波形式,利用中国剩余定理(Chinese Remainder Theorem, CRT)确定唯一准确传播距离,以减弱相位周期模糊引入的距离估计误差。文献[8]引入双频副载波调幅的方式解决相位周期模糊问题,并利用欠采样相位信息直接估计阅读器和标签间的直接距离。文献[9-10]利用单频副载波调幅方式,经过零中频变换,直接获取副载波相位信息。文献[11]提出了将双频连续波和单频连续波相结合的测距方法,但要求双频连续波之间频率的差异要足够大,很明显不适用于无源 RFID。目前关于无源 RFID 定位技术的研究中,虽然关于相位周期模糊问题提出了很多解决方案,但由于多径传播的影响使得最终提取出的展开相位信息存在很大的误差,影响了最终的定位精度,而且为了提高精度增加了阅读器天线的使用数量使得硬件成本增加。

本文提出了一种新的基于双标签的无源超高频定位方法,通过单频副载波调幅的方式,利用双标签的副载波信号的相位信息估计阅读器与标签距离中包含载波信号半波长的倍数,获得距离的粗略估计值,再利用载波相位计算半波长范围内距离的精确值,最后在单阅读器天线利用双标签估计目标的位置信息。

1 射频相位

无源超高频射频识别技术中,射频信号的波长约为几十厘米,而射频信号的覆盖范围可达几米甚至几十米,因此,射频信号的相位在信号传播过程当中不可避免地存在周期模糊问题,给基于相位的测距技术带来了巨大的测量误差。文献[9-10]使用了单频副载波调幅的方法,仅使用不存在周期模糊的副载波的展开相位信息进行测距,而忽略了载波处的卷叠相位信息。在单频副载波调幅方式的基础上,本文将副载波展开相位信息和载波卷叠相位信息相结合,首先,简单介绍相位信息提取过程。假设信号传输过程中,信号衰减一致,则发送信号和接收信号如式(1)~(2)所示:

$$s(t) = A[1 + m_a \cos(\omega_s t + \varphi_s)] \cos(\omega_c t + \theta_s) \quad (1)$$

$$r(t) = A'm(t)[1 + m_a \cos(\omega_s t - \varphi_r)] \cdot \cos(\omega_c t - (\theta_r + 2\pi k)) + n(t) \quad (2)$$

其中: ω_s 表示副载波信号的角频率, ω_c 表示载波信号的角频率, φ_s 表示副载波信号的初始相位, θ_s 表示载波信号的初始相

位, φ_r 表示副载波信号的展开相位, θ_r 表示载波信号的卷叠相位, k 表示整周期数, m_a 表示调制系数, A 和 A' 分别表示发送和接收时载波信号的振幅, $m(t)$ 则表示标签的反向散射信号, $n(t)$ 表示高斯噪声信号。

对接收信号 $r(t)$ 进行两路处理:第一路就是进行带通采样,并对采样序列利用 All-phase 算法^[12] 直接提取载波信号的卷叠相位 θ_r ;第二路就是提取副载波信号的展开相位,可通过分别提取载波信号上下边带信号,即频率为 $\omega_c - \omega_s$ 和 $\omega_c + \omega_s$ 的两个信号的相位值,并计算二者相位差获得 φ_r ,假设 φ_s 和 θ_s 已知,则可以通过计算接收相位与发送相位之差估计距离。

2 信道模型

阅读器发射的射频信号的传播路径包括视距传播路径以及非视距传播路径两种情况:其中视距传播路径是指信号在阅读器和标签之间沿着信号射线发射方向直接传播;而非视距传播路径是指信号在传播过程中会遇到障碍物,经障碍物反射之后才能到达标签。假设阅读器与标签均处于静止状态,可利用时不变的复值线性低通滤波器来建立信道模型,则相应的信道冲激响应可表示为:

$$h(t) = a_{\text{los}} \cdot \delta(t - d_{\text{los}}/c) + \sum_{i=1}^P a_i \cdot \delta(t - d_i/c) \cdot e^{j\theta_i} \quad (3)$$

其中: a_{los} 和 d_{los} 分别表示视距传播路径下信号的衰减系数以及传播距离; a_i 和 d_i 分别表示非视距传播路径下信号的衰减系数以及传播距离,并假设非视距传播路径有 P 条; θ_i 表示障碍物反射引入的相位偏移; c 表示电磁波的传播速度。忽略天线方向性的影响,根据 Friis 自由空间公式可推得信号衰减系数分别为:

$$a_{\text{los}} = \lambda / (4\pi d_{\text{los}}) \quad (4)$$

$$a_i = [\lambda / (4\pi d_i)] \cdot |\Gamma_i| \quad (5)$$

其中: λ 表示信号波长; $\Gamma_i = |\Gamma_i| \cdot e^{j\theta_i}$ 表示非视距传播路径下障碍物的反射系数。假设阅读器与标签之间前向链路和后向链路相同,则整个通信过程中信号传输函数为 $H(\omega)$:

$$H(\omega) = \left(\frac{\lambda}{4\pi d_{\text{los}}} \right)^2 \cdot e^{-j2kd_{\text{los}}} \cdot E \quad (6)$$

其中: ω 为信号角频率, $k = \omega/c$; E 表示多径传播信道增益:

$$E = \left(1 + \sum_{i=1}^P (d_{\text{los}}/d_i) \cdot \Gamma_i \cdot e^{-jk(d_i - d_{\text{los}})} \right)^2 = |E| \cdot e^{j\beta} \quad (7)$$

多径信道增益 E 使得信号的相位信息产生偏移,偏移量为 β 。

在单频副载波调幅方式下,阅读器发射出角频率分别为 3 个信号: $\omega_c - \omega_s$ 、 ω_c 和 $\omega_c + \omega_s$,在多径传播信道中,3 个信号的相位偏移量分别为 β_{c-s} 、 β_c 和 β_{c+s} 。阅读器从接收信号中提取出的 3 个信号的相位信息分别为:

$$\theta_r + 2\pi k = 2 \cdot (\omega_c/c) \cdot d_{\text{los}} - \beta_c \quad (8)$$

$$\theta_r + 2\pi k - \varphi_r = 2 \cdot (\omega_{c-s}/c) \cdot d_{\text{los}} - \beta_{c-s} \quad (9)$$

$$\theta_r + 2\pi k + \varphi_r = 2 \cdot (\omega_{c+s}/c) \cdot d_{\text{los}} - \beta_{c+s} \quad (10)$$

式(10)与式(9)相减,即可求得副载波相位 φ_r 。从式(8)~(10)可以得出,载波信号和副载波信号的相位值均受到多径传播信道的影响,存在一定偏移误差。由于载波信号中

只能读取 $(0, 2\pi)$ 区间内的相位信息,因此,多径传播中相位偏移引入的测距误差较少。而副载波信号中少量的相位偏移量也会引入很大的测距误差,不能直接用于测距。

3 基于双标签的测距法

本文将副载波展开相位与载波卷叠相位相融合,提出基于双标签的两步测距算法。

3.1 相位分析

由于载波和副载波信号的发送相位与接收相位已知,通过信号相位差估计信号的传播距离可表示为:

$$\tilde{d} = \frac{\varphi_r - \varphi_s}{2\omega_s} c \quad (11)$$

$$\tilde{d}_0 = \frac{\theta_r - \theta_s}{2\omega_c} c \quad (12)$$

其中: c 表示电磁波的传播速度, \tilde{d} 和 \tilde{d}_0 分别表示利用副载波展开相位和载波卷叠相位估计出的信号传播距离。副载波展开相位是不存在周期模糊问题的,而载波信号的卷叠相位则是信号单周期内的相位值,因此可有式(13) 和式(14):

$$\tilde{d} = d + n_d \quad (13)$$

$$\tilde{d}_0 = d - k \cdot (\lambda_c/2) + m_d \quad (14)$$

其中: d 表示阅读器与标签间的实际距离, k 表示整周期数, n_d 和 m_d 表示多径传播以及噪声带来的测距误差, λ_c 表示载波波长。在多径传播环境下, n_d 的误差可能会达到 λ_c 的整数倍,使得直接利用副载波相位信息进行测距时会存在一定误差。

3.2 测距法

理论上副载波信号的展开相位不存在周期模糊,但是由于多径传输的影响,使得依据展开相位估计出的载波相位周期数存在一定误差。本文中通过在待定位目标上附着双标签的方式并结合载波信号的卷叠相位,提出了基于双标签的两步测距算法。算法步骤介绍如下。

第1步 根据式(11),利用副载波相位计算出距离 \tilde{d}_i ,并根据式(15),计算出正整数 k_i :

$$k_i = \left\lfloor \frac{\tilde{d}_i}{\lambda_c/2} \right\rfloor \quad (15)$$

其中: $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示下取整; $i \in \{1, 2\}$,表示双标签编号。对于双标签分别计算出各自对应的正整数 k_1 和 k_2 ,由于 k_1 和 k_2 均偏离式(14) 中准确的正整数值 k ,为了减少影响选择 k 为 k_1 和 k_2 二者的平均值,即 $k = (k_1 + k_2)/2$ 。

第2步 根据式(12),利用载波相位计算出距离 $\tilde{d}_{0,i}$,并连同第1步计算出的 k 估计出距离为:

$$\hat{d}_i = \tilde{d}_{0,i} + k \cdot \lambda_c/2 \quad (16)$$

则 \hat{d}_i 即为标签 i 最终的距离估计值。

4 双标签定位法

在基于距离的定位算法中,根据三角定位原理,需要3个以上阅读器天线才能实现定位。为了进一步降低硬件成本,本文提出了单阅读器天线条件下的双标签定位法,如图1所示,待定位目标上附带两个无源标签。

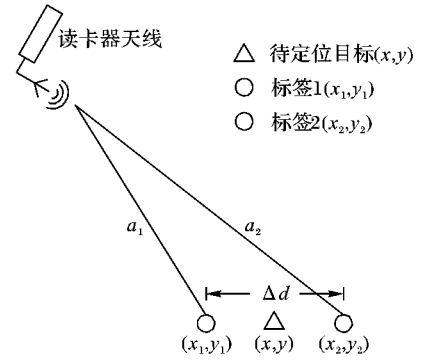


图1 双标签定位法

图1中,假设待定位目标坐标 (x, y) ,标签1和标签2坐标分别为 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) ,标签1和标签2之间的间隔为 Δd ,且本方法中假设 $\Delta d = \lambda_c/2$,利用两步测距法得到标签1和标签2关于阅读器天线 $(0, 0)$ 的距离为 a_1 和 a_2 ,则:

$$\begin{cases} x_1^2 + y_1^2 = a_1^2 \\ x_2^2 + y_2^2 = a_2^2 \end{cases} \quad (17)$$

且标签1和标签2的坐标关系满足式(18):

$$\begin{cases} x_2 = x_1 + \Delta d \\ y_2 = y_1 \end{cases} \quad (18)$$

则计算出的标签1的坐标解为:

$$\begin{cases} x_1 = (a_2^2 - a_1^2 - \Delta d^2)/(2\Delta d) \\ y_1 = \sqrt{a_1^2 - x_1^2} \end{cases} \quad (19)$$

标签2的坐标可利用式(18) 得出,因此关于待定位目标的坐标可表示为:

$$\begin{cases} x = (x_1 + x_2)/2 \\ y = (y_1 + y_2)/2 \end{cases} \quad (20)$$

关于式(17) 中,如果出现坐标 $x_1 < 0$ 的情况,由于标签2与阅读器的距离总是大于标签1的距离,在这种情况下,需要将标签2的距离 a_2 补上载波波长的一半值,即 $a_2 = a_2 + \lambda_c/2$ 。

5 实验与分析

在Matlab 仿真软件中设计仿真实验,如图2所示,仿真场景为一楼道或者仓储入口处,大小为 $4\text{ m} \times 8\text{ m}$;阅读器天线位于坐标原点 $(0, 0)$,假设有100个待定位目标,每个待定位目标上附着的两个标签关于入口中心线对称,待定位目标与阅读器在 y 轴方向上的距离为任意长度;信噪比为10 dB,分别仿真100次。阅读器载波频率为910 MHz,副载波频率为2 MHz。

利用式(21) 计算待定位标签 i 测距估计值 $\hat{d}_{i,j}$ 与实际值 $d_{i,j}$ 之间的平均测距误差 f :

$$f = \left[\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \text{abs}(\hat{d}_{i,j} - d_{i,j}) \right] / (NM) \quad (21)$$

其中: N 表示仿真次数, M 表示标签数。

利用式(22) 计算待定位目标 i 估计值 (x_0, y_0) 与实际值 (x, y) 之间的定位均方根误差 e_i :

$$e_i = \sqrt{\left[\sum_{i=1}^N (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 \right] / N} \quad (22)$$

其中 N 表示仿真次数。平均定位误差 e_{ave} 可表示为:

$$e_{ave} = \left(\sum_{i=1}^Q e_i \right) / Q \quad (23)$$

其中 Q 表示待定位目标数。

如图2所示,假设多径传播的路径数分为两条和三条两种情况:两条路径即一条视距传播路径和一条来自墙壁的单次反射路径,三条路径即增加一条来自墙壁的双次反射路径。

图2中,浅灰色方框表示标签,相邻的标签表示标签对,如标签1和标签2则表示一个待定位目标上附着的双标签。

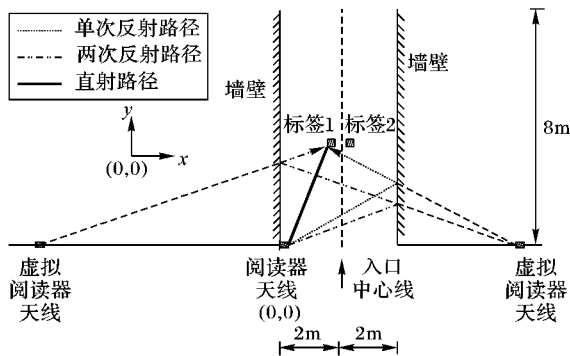


图2 仿真场景

仿真结果与分析如下。

计算标签的平均测距误差 f , 并统计 100 个待定位目标定位均方根误差 e 的累积分布函数 (Cumulative Distribution Function, CDF)。图3中, 对比本文提出的两步测距法以及直接利用副载波信号相位测距的单步测距法两种方法的测距误差, 结果显示, 在两条传播路径中, 两步测距和单步测距平均测距误差分别约为 0.20 m 和 0.32 m; 在三条传播路径中, 对应约为 0.23 m 和 0.31 m, 说明两步测距有效降低了单步测距法的测距误差。图4中, 对应两种传播路径数, 100 个待定位目标的平均误差分别约为 0.43 m 和 0.44 m, 最大误差分别为 0.82 m 和 1.04 m。仿真结果说明, 本文算法降低了测距误差, 且大大减少了硬件使用成本, 算法操作简单, 说明本文算法简单、有效。

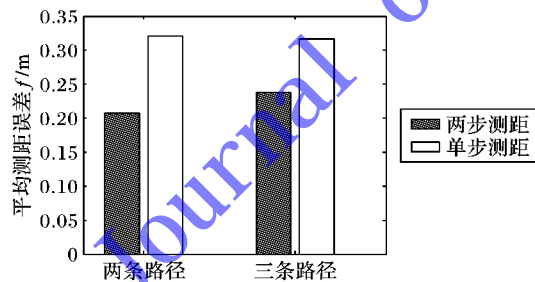


图3 测距误差

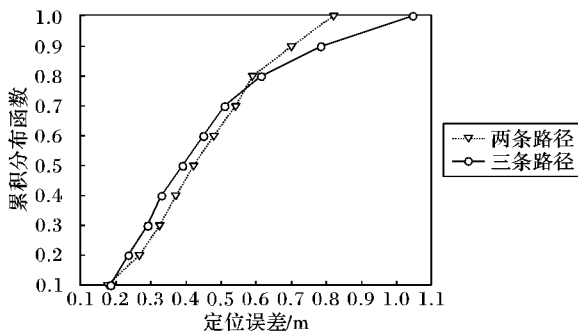


图4 累积分布函数

6 结语

本文采用基于双标签的两步测距方法, 减少了多径传播环境中基于相位信息的测距误差, 提高了定位精度。另外, 本文提出的双标签定位的思想, 与以往采用的三角定位技术相比, 仅需要单个阅读器天线便可实现定位, 降低了硬件成本。

参考文献:

- [1] KO C-H. RFID 3D location sensing algorithms [J]. Automation in Construction, 2010, 19(5): 588-595.
- [2] ERRINGTON A F C, DAKU B L F, PRUGGER A F. Initial position estimation using RFID tags: a least-squares approach [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2010, 59(11): 2863-2869.
- [3] SHIREHJINI A A N, YASSINE A, SHIRMOHAMMADI S. An RFID-based position and orientation measurement system for mobile objects in intelligent environments [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2012, 61(6): 1664-1675.
- [4] ZHANG Z, LU Z, SAAKIAN V, et al. Item-level indoor localization with passive UHF RFID based on tag interaction analysis [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(4): 2122-2135.
- [5] SCHERHAUFL M, PICHLER M, STELZER A. UHF RFID localization based on phase evaluation of passive tag arrays [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2014, 64(4): 913-922.
- [6] LIU T, YANG L, LIN Q, et al. Anchor-free backscatter positioning for RFID tags with high accuracy [C]// IEEE INFOCOM 2014: Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Computer Communications. Piscataway: IEEE, 2014: 379-387.
- [7] LI X, ZHANG Y, AMIN M G. Multifrequency-based range estimation of RFID tags [C]// Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on RFID. Piscataway: IEEE, 2009: 147-154.
- [8] SHI W, LIU K, FANG J, et al. UHF RFID location algorithm based on dual frequency subcarriers amplitude modulation [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(3): 81-86. (史伟光, 刘开华, 房静静, 等. 双频副载波调幅的 UHF RFID 定位研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(3): 81-86.)
- [9] ZHAO Y, LIU K, MA Y, et al. An improved k-NN algorithm for localization in multipath environments [J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2014, 2014: 208.
- [10] MA Y, ZHOU L, LIU K, et al. Iterative phase reconstruction and weighted localization algorithm for indoor RFID-based localization in NLOS environment [J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(2): 597-611.
- [11] ZHOU C, DOWNEY J, STANCIL D, et al. A shoe to shoe RF ranging sensor for aiding inertial navigation [C]// Proceedings of the 2011 IEEE Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE, 2011: 1-5.
- [12] WANG Z, HUANG X, YANG W. The measuring phase method of all-phase FFT [J]. World Sci-Tech R & D, 2007, 29(4): 28-32. (王兆华, 黄翔东, 杨尉. 全相位 FFT 相位测量法 [J]. 世界科技研究与发展, 2007, 29(4): 28-32.)