

文章编号: 1672-2892(2009)04-0269-05

## 基于游标内插原理的多脉冲测距方法

房永强, 董晓盈, 李琳, 郭东辉

(厦门大学 电子工程系, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 将游标内插原理和多周期测量技术应用于脉冲测距方式, 提出一种适用于近距离高精度电波或激光脉冲测距仪的方法, 即: 在多周期脉冲工作方式下, 利用2个时钟信号的微小周期差, 将收发脉冲的时间间隔扩展放大以提高测量精度, 有效测量范围由主时钟周期决定。设计了相应的时钟控制电路和时间间隔测量电路, 并将该方法实际应用于近程网线电缆测距, 达到了厘米量级的测量误差。

**关键词:** 游标内插; 多周期脉冲; 网线测距

**中图分类号:** TH761.2

**文献标识码:** A

## Multi-period pulses ranging method based on vernier interpolation principle

FANG Yong-qiang, DONG Xiao-ying, LI Lin, GUO Dong-hui

(Department of Electronic Engineering, Xiamen University, Xiamen Fujian 361005, China)

**Abstract:** Utilizing time-interval measurement of vernier interpolation principle in the multi-period pulses ranging, this study proposed a method suitable for electric wave or laser distance measuring instruments of short distance and high precision. Based on the tiny difference between the periods of two clocks, the time interval between transmitter pulse and received pulse was expanded to improve the accuracy in the multi-period pulses mode. In addition, the effective range was decided by the period of the master clock. The clock control circuit and the time-interval measuring circuit were designed. The proposed method had been practically applied to the measurement of network cables, and the measuring error of centimetre-sized was approached.

**Key words:** vernier interpolation; multi-period pulses; measuring of network cables

工业生产和民用建筑等特定领域, 经常需要进行高精度的近距离测量, 出于要求测距仪能长时间在线工作的考虑, 测距信号通常采用脉冲调制方式, 以降低功耗和成本。与连续波调制方式相比, 脉冲式测距在信号处理上通常可以省去频谱分析时复杂的傅里叶运算, 其实现的关键在于收发脉冲时间间隔的精确测量<sup>[1]</sup>。由于电磁波传播速度接近光速, 近距离传输时相应的时间间隔很短, 1 ns的时间差就会引起15 cm的测距误差, 很难直接进行时间量的测量, 因此需要从时间间隔测量方法上寻求解决途径。

时间间隔测量的基本方法是时钟计数法, 其原理上存在量化误差<sup>[2]</sup>, 由于器件工作速度、系统功耗等因素限制, 无法无限地增加计数时钟频率, 从而影响短时间间隔的测量精度。在时钟计数法基础上引入内插测量技术是提高时间分辨力的有效手段, 国内外学者将其应用于微小时间的扩展测量, 经实践证明是切实可行的<sup>[3-5]</sup>, 实现的方法主要有: 模拟内插, 延迟线内插和游标内插, 这些方法的应用使得近距离脉冲测距的精度大大提高。

现有的脉冲测距系统大多采用单脉冲工作方式, 即向待测目标发射单个脉冲信号并接收反射脉冲。多周期测量技术是一种灵活的频率测量方法, 若将其应用于脉冲测距, 则能在要求相同测量分辨率的条件下, 比单脉冲测距方式系统工作频率低, 并且利用统计学原理, 通过多次测量取平均值能提高测量精度<sup>[6]</sup>。而在时间间隔测量方法中, 游标内插法原理简单, 可以实现很高的时间分辨力, 但要求信号是连续重复的。因此在多周期脉冲工作方式下引入游标内插原理, 通过设置主时钟控制发射脉冲以产生连续且周期固定的发射信号, 设置游标时钟作为采样时钟, 分别对发射和接收信号采样判别以确定发射、接收时刻, 利用两时钟的微小周期差细分脉冲传输时间以提高测时精度, 从而确保高精度的距离测量。

## 1 原理分析

为便于研究,以下的理论分析和公式推导是基于无调制且恒定频率的脉冲发射形式,采用基本的脉冲前沿时刻鉴别<sup>[7]</sup>确定发射、接收时刻,适用于发射电波或激光脉冲的测距仪。分析的基本思路也适用于经高频载波调制的脉冲发射形式,如微波测距仪<sup>[8]</sup>,在工程实现上还需考虑调制信号的波形及相应的信号处理。

测量原理如图1所示:首先设置2个周期相差很小的时钟信号,1个作为主时钟,周期为 $T_1$ ,利用主时钟控制发射单元以保证发射周期为 $T_1$ 的脉冲信号;另1个时钟作为游标时钟,周期为 $T_2$ ,且 $T_2 > T_1$ ,则游标时钟上升沿对发射脉冲前沿每次采样都将存在一小段延迟时间 $\Delta T$ :

$$\Delta T = T_2 - T_1 \quad (1)$$

启动测量时,先由游标时钟对发射脉冲信号进行前沿时刻鉴别,当时钟上升沿到来时鉴别到发射脉冲前沿,则确定 $t_1$ 为发射开始时刻,启动对游标时钟的计数。而后切换到对接收信号的处理,当 $t_2$ 时刻鉴别到相应的接收脉冲前沿则停止计数,至此完成

一次测量过程。此过程相当于将待测的短时间间隔 $t$ 进行一定比例的扩展放大,因此可利用计数器测量扩展时间内游标时钟个数,得到一个相关的扩展系数。由于进行多周期的连续测量,当再次启动时间间隔测量单元时,可在 $t_3 \sim t_4$ 时刻得到下一个扩展测量时间,即实现了对同一待测距离的多次测量,并且通过比较多次测量值大小可以去除偏差大的值,从而降低随机干扰信号对测量结果的影响,最后再计算测量的平均值,进一步提高了测量精度。

以下推导距离换算公式:如测量原理图1所示,假设一段传输延迟 $t$ 经游标内插扩展测量后放大了 $N$ 倍,即:

$$t_2 - t_1 = Nt \quad (2)$$

在 $t_2 - t_1$ 时间段内,设游标时钟的计数值为 $k$ ,则又有:

$$t_2 - t_1 = kT_2 = kT_1 + k\Delta T = kT_1 + t \quad (3)$$

由式(2)、式(3)可得:

$$t = kT_2/N = k(T_2 - T_1) = k\Delta T \quad (4)$$

式(4)表明,时间间隔 $t$ 被时间差所量化, $k$ 为待测的扩展系数, $\Delta T$ 即游标测时的时间分辨率,在两时钟周期足够接近时,量化的分辨率可以达到很高。当考虑发射信号往返传播的路程时,实际待测距离:

$$D = \frac{1}{2}ct = \frac{1}{2}ck\Delta T \quad (5)$$

因此,在信号传播速度和两时钟周期差已知的情况下,通过测量 $k$ 可换算待测距离。当 $k=1$ 时,最小距离分辨力 $\Delta D = \frac{1}{2}c\Delta T$ ,即距离分辨力与游标测时分辨力 $\Delta T$ 有关,因此可根据所期望实现的距离分辨力设定两时钟周期差。

由原理图1进一步得出,当初始收发脉冲的时间间隔 $t > T_1$ 时,存在测距模糊<sup>[11]</sup>,因此在未考虑解测距模糊的情况下,本方法的无模糊测量距离 $D_u$ 取决于主时钟周期,即: $D_u \leq \frac{1}{2}cT_1$ ,由此可根据无模糊测量距离的要求进一步确定系统测距频率,即主时钟信号频率。

在游标内插法测时原理中,两个频率稳定且周期差很小的时钟信号是实现的关键<sup>[9]</sup>,这对时钟信号频率稳定度提出一定要求。按式(4)可分别推导出:

$$\Delta t/t = k(\Delta T_2 - \Delta T_1)/(kT_2/N) = N(\Delta T_2 - \Delta T_1)/T_2 \quad (6)$$

$$\Delta T_2 = N(\Delta T_2 - \Delta T_1) \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)可得:

$$\Delta t/t = \Delta T_2/T_2 = [1/(f_2 + \Delta f_2) - 1/f_2]/(1/f_2) = -\Delta f_2/(f_2 + \Delta f_2) \approx -\Delta f_2/f_2 \quad (8)$$

同样也可推导出: $\Delta t/t \approx -\Delta f_1/f_1$ 。而由式(4)可得: $\Delta T/t = 1/k$ 。因此 $(\Delta t/t)/(\Delta T/t) = \Delta t/\Delta T \approx -k\Delta f_1/f_1 \approx -k\Delta f_2/f_2$ ,即 $\Delta t \approx -\Delta T(k\Delta f_1/f_1) \approx -\Delta T(k\Delta f_2/f_2)$ ,要使测时误差 $\Delta t$ 不超过一个单位的时钟周期差 $\Delta T$ ,则要求晶体振荡器输出信号的频率稳定度应达到 $1/k_{\max}$ 数量级,其中 $k_{\max}$ 为在最大无模糊距离情况下时间间隔对应的最大扩展系数,由式(4)可得 $k_{\max} = t_{\max}/\Delta T$ 。

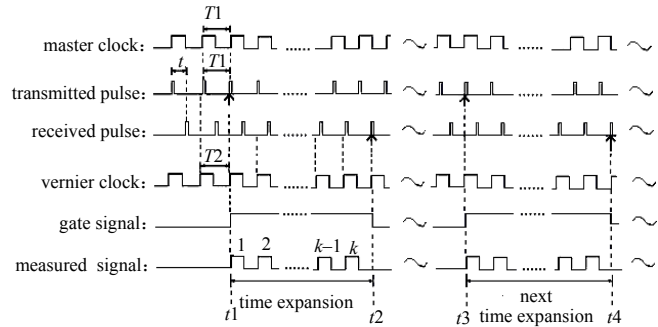


Fig.1 Principle of measurement

图1 测量原理图

在实际的测量中，测距误差除了要考虑影响测时误差的因素外，还要考虑系统误差、噪声及其它干扰带来的测量误差，测量精度会比理论预期有所下降。

### 2 时间测量电路设计

脉冲测距系统通常包括：发射单元、接收单元、时间测量单元、微控制器及终端显示器。根据发射脉冲不同的载波形式，如电波脉冲、激光脉冲等，前端发射/接收单元的结构会相应不同，但时间测量主要是由时间测量电路和微控制器信号处理完成的。设计基于游标内插原理的多脉冲测距系统时，时间测量电路应包括时钟控制单元和时间间隔测量单元。

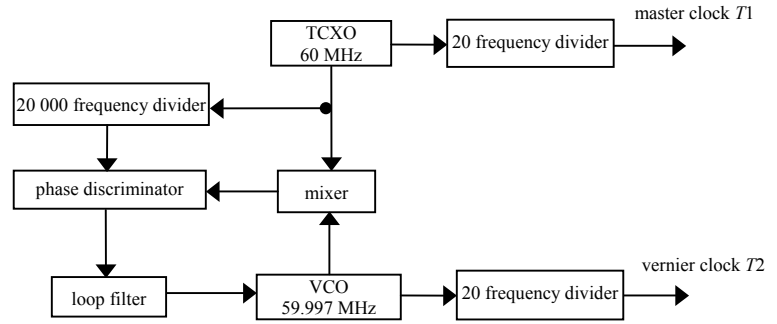


Fig.2 Schematic diagram of clock controlling unit  
图2 时钟控制单元原理图

如原理分析中所述，要实现高精度测距，则要求主时钟和游标时钟有稳定且微小的周期差，采用成熟的锁相及频率合成技术设计相应的时钟控制单元如图2所示。

晶振频率和分频器参数要依据不同的测量指标进行设定，以满足实际应用的要求。根据原理分析中的公式推导，本文按理论上 50 m 的无模糊测量距离设定系统测距频率(即主时钟频率)为 3 MHz；按在不考虑系统误差、噪声及干扰因素的情况下，理论达到 2.5 mm 测量精度的要求设定测时分辨率(即两时钟周期差)为 16.67 ps，此时游标时钟频率约为 2.999 85 MHz；最后依据对时钟频率稳定度分析的结论，选择稳定度为  $10^{-6}$  量级的温度补偿晶体振荡器 TCXO。图2的工作原理如下：温补晶振的标称频率为 60 MHz，压控晶体振荡器 VCO 的中心频率调在 59.997 MHz，2 个晶振信号送到数字混频器产生的差频约为 0.003 MHz，与 60 MHz 晶振信号经 20 000 分频产生的 0.003 MHz 信号进行鉴相，输出鉴相电压经环路滤波控制压控晶振，以保证压控晶振输出时钟为 59.997 MHz。之后利用 60 MHz 温补晶振经 20 分频产生需要的主时钟信号 T1，利用中心频率 59.997 MHz 的压控振荡器经 20 分频产生需要的游标时钟信号 T2，两者用于控制时间间隔测量单元以完成延迟时间测量的目的。

设计相应的时间间隔测量单元如图3中虚线框内所示，输入端 S、R 分别对应原理图1中周期 T1 的发射脉冲与接收脉冲信号，CON 为启动测量的控制信号，K 为待测的扩展信号。

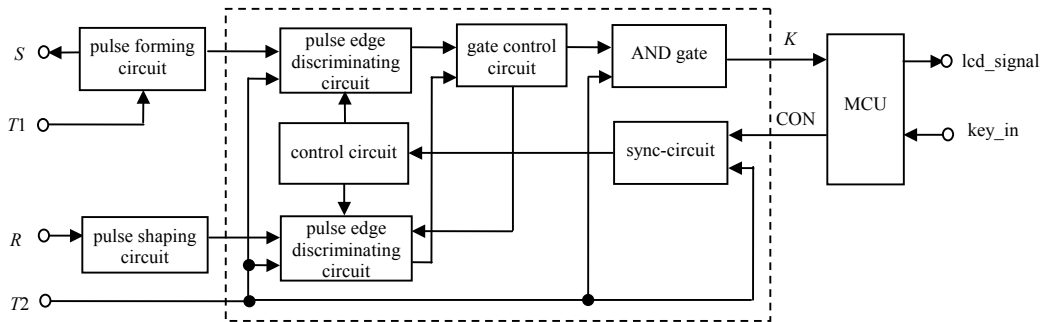


Fig.3 Schematic diagram of time interval measuring unit  
图3 时间间隔测量单元原理图

各主要单元的实现思路为：1) 主时钟 T1 之后利用单稳态触发器形成窄脉冲周期信号 S，作为前沿时刻鉴别电路的输入并送至发射单元。脉冲宽度在满足工作电路对建立和保持时间要求的基础上尽可能窄，以利于信号发射及前沿时刻鉴别。接收的脉冲信号 R，利用带施密特触发输入的反相器整形后输入至前沿时刻鉴别电路。2) 前沿时刻鉴别电路可利用快速型 D 触发器实现，游标时钟作为触发器的时钟输入，在时钟上升沿到来时，判断输入脉冲信号电平是否高于所设定的阈值，从而确定脉冲前端上升沿是否到来。3) 根据前沿时刻鉴别电路确定的发射与接收时刻，门控电路用于将工作时序从发送信号处理切换至接收信号处理，同时产生门控信号与游标时钟形成待测的扩展测量信号 K，送至单片机内部计数器的时钟输入。4) 控制电路起到启动测量和在下一次测量前将电路复位到初始状态的作用，其输出信号作用于前沿时刻鉴别电路中 D 触发器的逻辑控制端，以实现单片机

输出 CON 信号变为高电平时启动测量，变为低电平时复位电路并等待下一次测量的功能。5) 单片机主要实现测量控制、公式换算及控制 LCD 显示的功能。电路工作时，单片机首先等待并判断按键 key\_in 的输入状态，当按键输入时使 CON 变为高电平以启动测量，并利用内部计数器对扩展测量信号内游标时钟的个数进行计数，得到的计数值代入公式(5)换算待测距离，而后存储并送 LCD 显示。当按键弹起时，使 CON 变为低电平以复位测量电路。如图 1 所示，在完成一次扩展系数测量后，可再次输出测量信号 CON 进行下一次测量，对同一距离自动多次测量之后，去除偏差大的值再计算平均值，以进一步减小随机误差的干扰。

根据以上设计思路，用数字电路的形式即可实现后端时间间隔测量功能，因此可利用分立的通用型集成电路芯片设计，也可以利用FPGA器件单片集成的可编程资源实现。设计时间间隔测量单元信号处理的数字电路如图4所示。

为确保数字逻辑设计的正确性，利用数/模电路仿真软件Pspice对图4进行仿真。由于两时钟周期差过小会使计数周期很长，不便于观察结果，仿真时设定 T1 为 280 ns，T2 为 278 ns。发射脉冲 S 与接收脉冲 R 分别用脉冲信号源模拟，设定脉宽 30 ns，两者的时间间隔 120 ns。如图 5 所示，显示波形自上而下依次是测量控制信号 CON、发射脉冲 S、接收脉冲 R、游标时钟 T2、门控信号及扩展测量信号 K，仿真结果符合图 1 的信号时序。

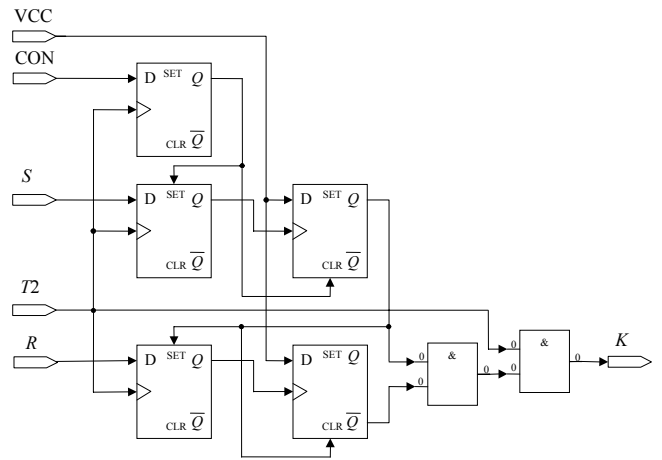


Fig.4 Digital logic circuit of signal processing  
图4 信号处理的数字电路图

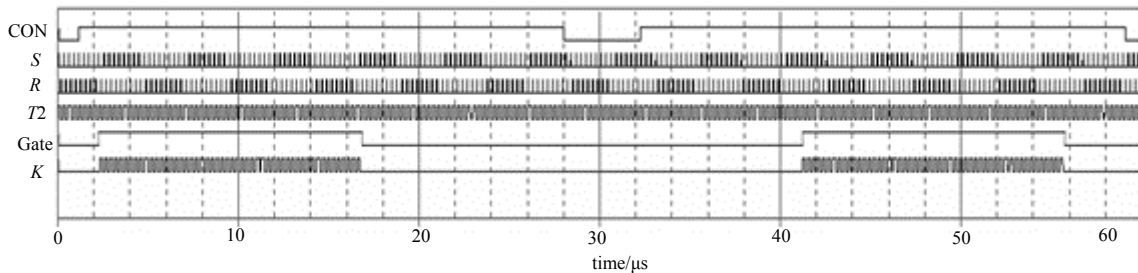


Fig.5 Simulation result of signal processing circuit  
图5 信号处理电路的仿真结果

### 3 网线电缆测距实验

将基于游标内插原理的多脉冲测距法应用于网线电缆测距，设计如图6所示的测量实验。电波脉冲信号利用双绞线作为长距离传输线，实验中采用标准5类UTP双绞线电缆，其特征阻抗为 100 Ω，由于测试时只用到网线中的一对绞线，因此不需要考虑线对间的串扰，在信号的收发上选择容易实现的双绞线非平衡传输方式，在终端并联电阻以实现与传输线的阻抗匹配。

依据原理图 2 设计时钟控制单

元，将主时钟频率设置在 3 MHz，将输出的游标时钟频率调整到 2.999 85 MHz，即两时钟周期差  $\Delta T=16.67$  ps。依据原理图 3 采用分立的 74LS 及 74F 系列集成电路设计时间间隔测量单元，并选用盛群半导体公司的 HT46R24 型单片机实现测量控制、公式运算及控制 LCD 显示的功能。由于电波在网线电缆中传播速度  $v$  相对于光在真空中速度以百分比表示， $62\%c \leq v \leq 72\%c$ <sup>[10]</sup>，通常情况下取  $v=66.7\%c \approx 2.0 \times 10^8$  m/s。实验中通过网线电缆直接收发信号，无待测目标反射的情况，因此将距离公式(5)修改为： $D=vt=vk\Delta T$ 。取若干条长度递增的网线进行测试，由于接收

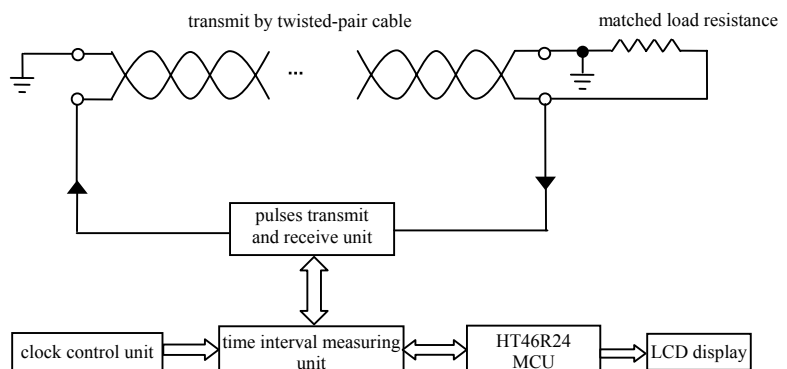


Fig.6 Results of measuring network cables  
图6 网线电缆测量示意图

电路信号处理存在一定的延迟,使得测量得到的时间间隔会大于实际收发脉冲之间的时间间隔。因此测量前先用短导线直接连接收发端,对所制作实验电路的器件延迟进行多次测量后取平均值,在实际测量的单片机软件处理中对实测的扩展系数 $k$ 进行修正,以得到正确的距离值,测量结果如表1所示。

网线测距结果表明,利用基于游标内插原理的多脉冲测距法测量距离是可行的,目前设计的网线测距实验测量误差可达到厘米量级,能初步满足近程网线布线的实际需求。要进一步减小网线测距误差,可从以下3方面进行:

1) 依据文中的实现思路改进电路设计,利用FPGA器件单片集成的可编程资源实现时间测量的功能;2) 传输的距离越长会使接收信号质量随之下落,实际应用时可选择抗干扰性更好的双绞线平衡传输方式,精心设计电路以减小脉冲传输后边沿不规整的变化,确保信号完整性;3) 单片机数据运算时会产生截尾误差,即数据位数过多时,超出运算单元所能容纳的位数,出现略去数据尾数的情况。因此可考虑运算处理功能更强的单片机,以提高数据运算时尾数处理的精度。

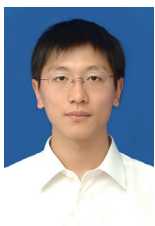
#### 4 结论

通过测量网线电缆长度,已初步验证了基于游标内插原理的多脉冲测距法的可行性,根据测量原理,在电路良好的情况下,调整两时钟信号周期差能进一步提高测量精度,以满足高精度测距的要求。该方法可应用于近距离激光测距仪,通过发射并接收激光多周期脉冲信号,利用游标内插原理测量脉冲飞行时间,从而提高激光脉冲测距的精度。

#### 参考文献:

- [1] 袁宇正. 电磁波测距技术基础[M]. 北京:国防工业出版社,1990.
- [2] 孙杰,潘继飞. 高精度时间间隔测量方法综述[J]. 计算机测量与控制,2007,15(2):145-148.
- [3] Yue Liu,Vollenbruch U,Yangjian Chen,et al. Multi-stage pulse shrinking time-to-digital converter for time interval measurements[C]// Microwave integrated circuit conference,Europe,2007:267-270.
- [4] Kalisz J,Szplet R,Pelka R. Single-chip interpolating time counter with 200-ps resolution and 43-s Range[J]. Transactions on Instrumentation and Measurement,1997,46(4):851-856.
- [5] 叶超,冯莉,欧阳艳晶. 基于FPGA的精密时间间隔测量仪设计[J]. 信息与电子工程,2009,7(2):159-163.
- [6] Van Etten W. Distance Determination by Means of Accurate, Periodic Time Interval Measurement[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,1988,37(1):155-157.
- [7] 陈千颂,杨成伟,潘志文,等. 激光飞行时间测距关键技术进展[J]. 激光与红外,2002,32(1):7-10.
- [8] 郭东辉,陈华君. 微波测距仪:中国,200710009863.5[P]. 2008-04-16.
- [9] 陈尚松,郭庆,雷加. 电子测量与仪器[M]. 2版. 北京:电子工业出版社,2004.
- [10] 尚晓航,解文彬,马颂阳. 介质长度对五类非屏蔽双绞线电气性能的影响[J]. 北京联合大学学报(自然科学版),2006,20(3):64-68.

#### 作者简介:



房永强(1983-),男,福建省厦门市人,在读硕士研究生,研究方向为集成电路设计与应用.email:fang\_yq@126.com.

董晓盈(1982-),女,黑龙江省鸡西市人,在读博士研究生,研究方向为射频电路与天线设计.

李琳(1982-),女,福建省福安市人,助理教授,研究方向为语音识别、集成电路设计.

郭东辉(1967-),男,福建省莆田市人,教授,博士生导师,研究方向为人工智能、网络通信和集成电路设计等.

表1 网线测量结果

length of network cables/m	spreading factor $k$ (circuit delay has been considered)	distance value/m
1.61	1 189	1.59
5.82	4 340	5.82
8.62	6 455	8.65
16.08	12 062	16.16
20.13	15 066	20.18
30.00	22 470	30.11