

## Design of Wireless Synchronization Power-on System in Shock Wave Measurement

YUE Yao, ZHANG Yu, LIU Shuangfeng\*

(Key Laboratory for Instrumentation Science and Dynamic Measurement, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** In order to improve the power-on flexibility and reliability of shock wave testing system and provide a unified time-base for the study of shockwave transmission arriving time of different distances, considering the numbers of testing nodes and their scattered distributions, this paper proposed a synchronous power-on system based on Zigbee wireless technology. First, the hardware structure of wireless module was presented and MATLAB simulation analysis and field testing have been done to show its performance. Then a specific Zigbee wireless communication protocol has been designed. Finally, 1kg TNT explosion experiment's result was shown to prove the synchronicity and reliability of this synchronization power-on system.

**Key words:** measurement; wireless synchronous power-on; Zigbee; shockwave measurement

EEACC: 7320; 6250

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2013.07.026

## 冲击波测试中无线同步上电系统的设计

岳瑶, 张瑜, 刘双峰\*

(中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051)

**摘要:** 冲击波超压测试中, 由于测试节点分布数量较多且相对分散, 为了提高测试系统的上电灵活性和可靠性, 同时为整个测试系统提供统一时基, 以研究不同距离的冲击波到达时间, 本文提出了一种基于 Zigbee 技术的节点无线同步上电技术。首先介绍了无线模块的硬件组成, 并且对无线模块的性能进行了 MATLAB 仿真分析和实地测试。然后设计了节点间的 Zigbee 无线通信协议, 最后通过 1 kg TNT 爆炸的实验结果证明了此无线同步上电系统具有良好的同步性和可靠性。

**关键词:** 测试; 无线同步上电; Zigbee; 冲击波测试

中图分类号: TN98

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2013)07-1030-04

为了衡量大当量战斗部的杀伤力, 需要冲击波测试系统来测量这类武器的空气静爆威力, 冲击波测量目前常用的方法主要是存储测试法<sup>[1-2]</sup>, 但是冲击波超压测试系统中, 由于测试节点众多并且呈辐射状分布, 传统采用人工方法对各个测试节点分别上电的方式, 不仅准备工作量大、布置现场花费时间长, 并且对于本身能量有限的电池供电的测试系统来说, 造成了大量的能量浪费。在文献[3-4]中提出了一种无线式的冲击波超压测试系统, 但是该方案中无线模块往往使用封装好私有通信协议的无线芯片, 虽然使用简便但是功能较为单一, 尤其是在网络拓扑方式上缺乏灵活性, 通常使用星型组网方式由 1 km 之外的中心节点进行周期性重复广播发送命令, 在实际靶场测试中, 由于过远的传输距离和

重复性的广播, 无法保证令所有测试节点同时触发, 偶尔会出现未触发成功的节点。因此, 本文基于 IEEE802.15.4 标准的 Zigbee 协议设计了专用于冲击波超压测试的一种无线通信协议, 该协议能够根据冲击波超压测试的实际需求, 很好地解决了终端节点和时基节点的同步上电问题, 通过分析所测的数据可以得出冲击波波阵面由爆心至测试节点的近似时间, 具有一定的参考意义。

### 1 系统总体构成

冲击波超压测试系统设计总体框图如图 1 所示。

信号的采集与存储电路是整个测试系统的核心。整个系统的逻辑时序控制芯片采用 FPGA, 传感器选择 PCB 公司的 113B28 型号的 ICP 压电式压

力传感器。A/D 模块采用 14 bit A/D 转换器 AD7484,最高采样频率为 3 MHz,可以满足系统工作的最高采样频率 1 MHz。光纤模块采用 OCB6343/OCB2343 型收发合一模块,可以有效地防止外界噪声导致系统误触发以及外界噪声叠加在信号中进入 A/D 采集电路中<sup>[5-6]</sup>。

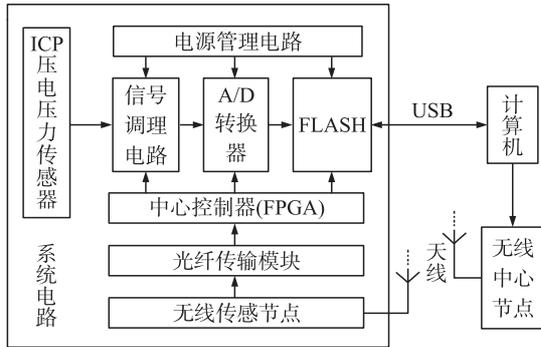


图 1 系统设计总体框图

无线通信模块选择具有低功耗、低成本特点的 ZigBee 芯片 CC2530。无线模块的作用主要是完成控制中心与终端测压节点之间的无线命令传输,从而对终端测压节点进行参数设置和无线上电。

## 2 无线模块

### 2.1 硬件构成

无线模块主要由射频芯片 CC2530 和射频前端芯片 CC2591 组成,该模块的各项参数特点如表 1 所示。

表 1 无线模块各个参数

调制方式	DSSS+OQPSK
工作频率	2.4 GHz
发射功率	22 dBm
接收灵敏度	-98 dBm
发射电流	≤150 mA
接收电流	≤30 mA
传输速率	250 kbit/s

### 2.2 误码率仿真

CC2530 的 Zigbee 技术基于 IEEE802.15.4 标准,该标准的 2.4 GHz 物理层使用了 16 相准正交调制,即使用 DSSS(直接序列扩频)技术将原始比特流映射成准正交 PN 序列然后通过 O-QPSK(偏移-四相相移键控)调制方式,再将调制信号混频到 2.4 GHz 频段进行发送和接收。CC2530 内部编码及调制部分流程图如图 2 所示<sup>[7]</sup>。

在 MATLAB 中对调制系统的各个环节进行仿真,得到了使用 DSSS 和 O-QPSK 调制的信号在加性高斯白噪声信道(AWGN)中的误比特率(BER)和信噪比( $E_b/N_0$ )的关系<sup>[8-9]</sup>,如图 3 所示,从图中可以看

出,在信噪比 20 dBm 时误比特率只有不到  $10^{-5}$ 。

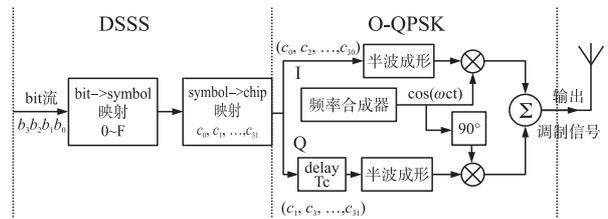


图 2 CC2530 内部信号编码及调制方式

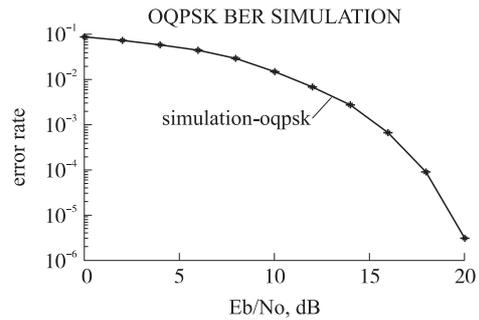


图 3 OQPSK 在 AWGN 信道中误码率仿真

### 2.3 信道建模

为了得到 2.4 GHz 无线信号在平坦陆地上 LOS (Line of Sight) 视距传输的损耗,在比较了传统的无线近地传播模型(自由空间模型、Plane-Earth 模型和 Egli 模型)后,基于实测数据,得到了一种基于单斜率模型的改进型——双斜率模型<sup>[10]</sup>:

$$L(d) = \begin{cases} L(d_b) + 10n_1 \lg(d/d_b) + \epsilon_1 & d \leq d_b \\ L(d_{b+1}) + 10n_2 \lg(d/d_b) + \epsilon_2 & d > d_b \end{cases} \quad (1)$$

其中  $L(d)$  为收发点距离  $d$  时的链路损耗,  $d_b$  为突变点距发送点的距离,  $\epsilon_1, \epsilon_2$  为均值为零标准差为  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  的高斯随机变量,具体各个参数值详见文献<sup>[10]</sup>。

接收节点接收到的信号强度为:

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L(d) \quad (2)$$

$G_t$  和  $G_r$  分别为发送端和接收端的增益,这里都使用 3 dBi 的增益天线。 $P_r$  (dBm) 随传输距离的变化情况如图 4 所示。

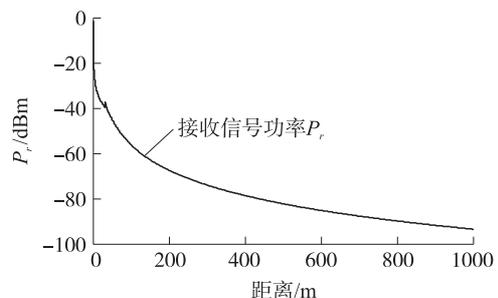


图 4 接收功率  $P_r$  (dBm) 与距离 (m) 的关系

### 2.4 实地测试

为了测试无线模块的实际性能,选取了一条平直空旷的公路,并且在行人较少的时间段进行测试,

天线高度为距离地面 1 m, 发送和接收天线之间视距传输, 测试丢包率如下表 2 所示。

表 2 测试距离和丢包率

距离/m	100	300	500	700	900
丢包率/%	0	0.3	2.6	4.8	8.1

当接收端存在误码时, 校验和判断错误并且自动丢弃该数据包, 所以数据包越大, 有可能产生的丢包率也就越大, 由表中可以看出, 当距离为 100 m 时, 没有丢包产生, 300 m 时能够以极低的丢包率传输, 700 m 时的丢包率虽然达到 4.8%, 但是在对于传输速率要求不高的情形时, 可以通过丢包重传的方式, 来稳定地进行通信。当距离达到 900 m 时, 信号能量衰减所产生的丢包率已经很高。

### 3 系统关键技术

#### 3.1 无线通信协议

为了保证测试人员的安全, 系统设计要求控制中心距离爆心 1 km 的范围之外, 而过远的距离会导致信号的大幅度衰减和严重的误包率, 因此需要一个中继节点, 来延长并保证信号强度。由测试数据分析, 选取汇聚节点到中继节点间的距离为 700 m, 中继节点距爆心的距离为 300 m。系统节点分布如图 5 所示。

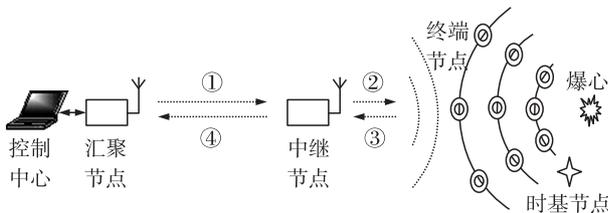


图 5 无线控制系统分布示意

此无线上电触发系统使用一种类似星形的网络拓扑结构, 总共分为三个工作流程。

流程一: 对应图 5 中①。控制中心通过串口将终端节点编号帧和上电配置帧传输至汇聚节点, 汇聚节点将其单播至中继节点, 中继节点接收成功并向汇聚节点回馈 ACK 应答帧, 否则发送失败, 汇聚节点通过 ARQ(自动请求重传)模式重新发送。

流程二: 对应图 5 中②和③。中继节点接收到来自汇聚节点的命令帧后, 向终端测压节点和时基节点广播一次上电配置帧, 上电配置帧包括触发电平和采样频率的配置。终端测压节点和时基节点成功接收后, 开启内部计时器同时向中继节点回馈 ACK 应答帧。

流程三: 对应图 5 中④。中继节点接收到所有

终端节点和时基节点的 ACK 应答帧后, 即认为所有节点上电成功, 并将成功帧单播至汇聚节点。否则认为上电失败, 中继节点向汇聚节点发送失败帧, 同时向终端测压节点广播下电命令帧, 终端测压节点复位至低功耗空闲模式同时时基节点计时器清零。

本方案使用的无线广播同步模式类似于 RBS (Reference Broadcast Synchronization) 同步算法, 当广播范围相对较小, 电磁波的传播速度约为光速, 误差的来源主要是接收时间的不确定性, 其误差范围在  $10 \mu\text{s} \sim 60 \mu\text{s}^{[11]}$ 。

#### 3.2 超压到达时间

终端测压节点用来记录冲击波超压数据, 在无线触发上电前, 处于低功耗空闲模式, 系统处于接通电源态, 但未开始循环采样, 处于待采样状态。当终端测压节点通过无线接收到上电配置帧后, 对 FPGA 进行参数配置同时开启内部计时器, 延迟 5 s 后关闭无线模块防止爆轰区对测试电路的影响, 并进入 2 MB 的负延迟循环采样状态, 待冲击波超压信号到来后, 存储 8 MB 超压数据和 2 MB 的负延迟到 FLASH 中, 采样结束并停止内部计时器, 系统进入低功耗待读数状态。

时基节点被安置在距离爆心不远处, 此节点使用光敏传感器来触发定时结束, 记录起爆点的爆炸时刻, 通过终端节点计时模块的计时时长减去时基节点的计时时长, 可得到冲击波波阵面传播至终端节点的近似时间。

### 4 实验结果

为了测试该系统的性能, 选取一爆炸试验场地对测试系统进行 1 kg TNT 实验, 选取 3 个终端测试节点和 1 个时基节点分别安置于距离爆心 4 m 的圆弧上, 无线控制中心位于距爆心 1 km 的远处, 中继节点距离爆心 300 m。

实验数据通过 MATLAB 整理<sup>[12]</sup>如图 6 所示, 三个节点的超压峰值到达时间分别是 6.716 ms、6.388 ms、6.428 ms, 各测点测得的时间不确定度在 0.3 ms 以内, 对于研究冲击波波阵面的传播到达时间, 具有一定的参考意义。

该方法通过设计了合理的网络拓扑结构和通信协议, 并将时基节点和计时模块引入测试系统, 利用了无线广播低延迟的同步特性, 提高了系统整体上电的同步性和可靠性并且降低了准备阶段的节点功耗, 得到了波阵面传播至终端测试节点时间的近似值, 而且测试节点越多, 越能显示出无线组网的优越性, 具有一定的应用价值。

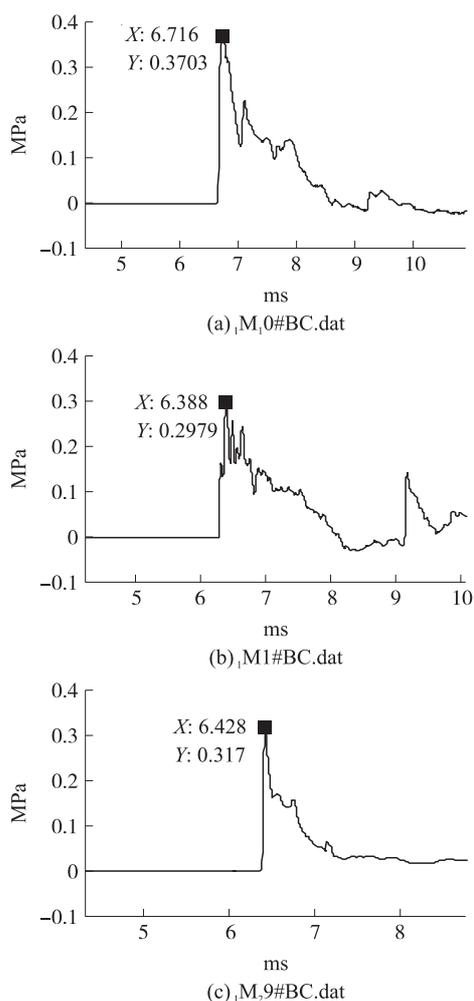
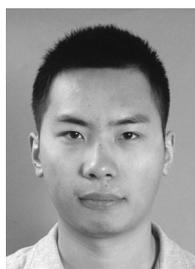


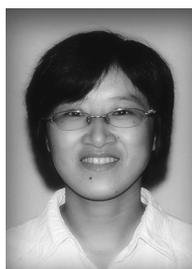
图6 实验结果

## 参考文献:

- [1] 祖静,申湘南,张文栋. 存储测试技术[J]. 测试技术学报,1994(2):28-34.
- [2] 马铁华,祖静. 冲击波超压存储测试技术研究[J]. 仪器仪表学报,2004,25(4):134-136.
- [3] 董冰玉,杜红棉,祖静. 基于无线控制的冲击波超压测试系统[J]. 传感技术学报,2010,23(2):279-281.
- [4] 王成帅. Zigbee 无线传感器网络在冲击波测试中的应用研究[D]. 太原:中北大学信息与通信工程学院,2010.
- [5] 赵岩,马铁华,杜红棉,等. 基于 FPGA 和无线通信的冲击波超压采集系统设计[J]. 工程设计学报,2011,18(6):449-452.
- [6] 杨泽望,潘保青,孙鹏举. 基于存储测试技术的强冲击波测量系统的设计与应用[J]. 飞行器测控学报,2005,24(03):84-88.
- [7] IEEE 802 Working Group. Standard for Part15. 4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)[S]. ANSI/IEEE802. 15. 4,2006.
- [8] 刘述钢,刘宏立,詹杰,等. 基于 IEEE802. 15. 4 的低复杂度 OQPSK 全数字调制方法[J]. 传感技术学报,2010,23(5):691-695.
- [9] 邵玉斌. MATLAB/SIMULINK 通信系统建模与仿真实例分析[M]. 北京:清华大学出版社,2008:327-330.
- [10] 王代华,宋林丽,王宇龙,等. 平坦地面无线信道的大尺度衰落特性[J]. 计算机工程与设计,2012,33(6):2141-2145.
- [11] 周贤伟,韦炜,覃伯平. 无线传感器网络的时间同步算法研究[J]. 传感技术学报,2006,19(1):20-25.
- [12] 张衍芳. 冲击波信号处理方法的研究[D]. 太原:中北大学信息与通信工程学院,2011.



岳瑶(1988-),男,汉族,河北石家庄人,中北大学硕士研究生,主要研究方向为无线传感网络,nucyueyao@sina.com;



张瑜(1979-),女,汉族,博士研究生,研究方向为动态测试与智能仪器,snow-zhang@nuc.edu.cn;



刘双峰(1971-),男,汉族,副教授,硕士生导师,主要从事动态测试和新型传感器技术研究,liusf@nuc.edu.cn。