

基于 TDMA 的战场无线传感器网络节点低功耗通信协议实现

穆磊, 姜春兰, 李明

北京理工大学机电工程学院, 北京 100081

摘要 为迎接新军事变革下的信息化战争, 武器系统平台网络化已成为网络中心战(NCW)的发展趋势, 战场无线传感器网络已受到世界各军事强国的重视。时分多址(TDMA)技术将无线信道按时隙分配给不同用户, 因其可靠性和稳定性在无线通信领域得到广泛应用。针对战场无线传感器网络通信协议低开销低功耗的要求, 分析了 TDMA 通信协议的原理和实现的难点, 结合单片机 MSP430F449 和无线收发芯片 CC2500 设计并实现了一种适合战场应用环境的低功耗 TDMA 通信协议, 详细介绍了战场无线传感器网络节点平台的组成和低功耗通信协议软件实现。经过实验验证, 该协议运行可靠, 扩展性、灵活性好, 代码量小, 在无数据收发时处于低功耗模式, 适合各种低功耗的无线传感器网络应用。

关键词 无线传感器网络; 低功耗; TDMA; MSP430F449; CC2500

中图分类号 TN92

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)18-0075-05

Implementation of Low-Power Communication Protocol Based on TDMA for Battlefield Wireless Sensor Network Nodes

MU Lei, JIANG Chunlan, LI Ming

School of Mechatronical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract To meet the needs of information warfare for the Revolution in Military Affairs (RMA), networked weapon system platforms become a development trend of Network Centric Warfare (NCW). The battlefield wireless sensor networks have attracted much attention of the world's military powers. Time Division Multiple Access (TDMA) technology allows several users to share the same frequency channel by dividing the signal into different time slots, and it is widely used in the wireless communication for its reliability and stability. Considering the lightweight and low-power requirements of the communication protocol for battlefield wireless sensor networks, the principles and difficulties in the applications of TDMA communication protocol are analyzed in the aspects of hardware and software separately. A low-power TDMA communication protocol for battlefield environments is designed and implemented with MSP430F449 mixed signal microcontroller and CC2500 low-cost 2.4GHz RF transceiver. The battlefield wireless sensor network nodes platform and the implementation of the low-power communication protocol are discussed in detail. The experimental results have verified the reliability, scalability and flexibility of the protocol. Also, it is shown to require a small amount of codes and to stay in a low-power state when there is no wireless communication data. Thus, it is suitable for various low-power wireless sensor network applications.

Keywords wireless sensor networks; low-power; TDMA; MSP430F449; CC2500

0 引言

战场环境中, 各武器系统之间的通信可以实现信息共享, 提高作战能力。战场网络化武器系统通常以无线传感器

网络(Wireless Sensor Networks, WSN)为基础, 采用对等网络体系架构, 每个无线传感器网络节点软硬件结构、功能均相同, 完全无须借助外界设施就可以进行独立的操作和协同。

收稿日期: 2010-03-10; 修回日期: 2010-09-01

作者简介: 穆磊, 博士研究生, 研究方向为武器系统信息化技术、无线传感器网络, 电子信箱: truemoller@gmail.com; 姜春兰(通信作者), 教授, 研究方向为弹药系统信息化技术, 电子信箱: jiangchunwh@bit.edu.cn

战场无线传感器网络节点通常随机布设,由于部署之后无法更换电源,有限的能量资源就显得尤为珍贵^[1-3]。

战场无线传感器网络节点通信的时序是整个系统运行的基础,决定系统的节拍,在节点自定位和目标定位识别等应用中都有重要作用。多个节点共享同一无线信道,难免会出现相互之间的干扰和碰撞,因此需要通过媒介访问控制(MAC)协议协调各个节点对无线网络的访问。针对战场无线传感器网络的特点和要求,本文结合 MSP430F449 单片机和无线收发芯片 CC2500 设计实现了低功耗的时分多址(TDMA)协议,实现对无线信道的访问和控制。

1 TDMA 原理

TDMA^[4-6]将时间分割成周期性的时帧,每一时帧再分割成若干个时隙(时帧或时隙均互不重叠),并根据一定的时隙分配原则,使各个节点在每个时帧内只能按指定的时隙发送信号,在满足定时和同步的条件下,其他节点可以分别在各时隙中接收到发送节点的信号而互不混扰。同时,发送节点发送至多个接收节点的信号都按顺序安排,在预定的时隙中传输。各节点只要在指定的时隙内接收,就能将发给它的信号区分出来。

基于 TDMA 的节点通信时序在每个时隙只有一个节点进行发送,不需节点之间来回应答握手,便于控制,节省了频谱资源,大大减少系统开销,降低系统整体的功耗。

在 TDMA 时帧中,时间被均分为 N 段时隙。时隙作为通信的基本单位时间,其大小根据每个节点所要发送的数据量决定,同时为了避免由于时隙同步误差带来的无线信道访问冲突,要考虑在时隙内设计一定的裕量作为保护。 N 由节点的多少决定,分配的原则是既能保证在该时段内能尽量发送多的数据,又不至于将时段闲置过久,充分利用信道资源。

分配通信控制权时,按照时隙分配表的序号进行循环,当某个节点获得通信控制权时,该节点能发送数据到通信范围内的其他节点,根据发送队列中待发送的数据量,尽可能多地发送数据。通信时段结束时,必须立即释放对无线信道的控制权。若当前数据尚未发送完,则等到下一个时隙重新发送该数据。

图 1 给出了无线传感器网络节点 TDMA 时帧时序。在

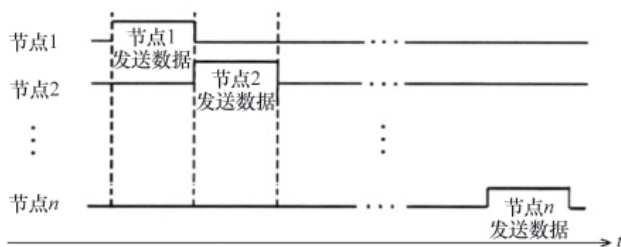


图 1 无线传感器网络节点 TDMA 时帧时序图

Fig. 1 Time sequence of TDMA frame in WSN nodes

TDMA 的一个时帧内,随着时间的推移,各节点按照规划分配好的时序依次发送自己的信息。在某时隙间隔内,只有一个节点发送数据,其他节点均处于接收状态。如果时隙同步精度满足要求,每个节点的收发将不受干扰地有序进行。

如何实现时隙的规划分配,即时间片的产生和控制,是 TDMA 实现的难点。在嵌入式系统应用中,常用的方法有延时和定时器中断。

延时法的误差会出现累积,在延时期间无法进行其他操作,浪费了资源,且不利于控制,扩展性和可维护性较差。

中断是解决高速微处理器(MCU)与低速外设矛盾的途径,容易控制,便于维护和扩展^[7]。定时器中断可以采用外部独立晶振为计数源,到固定时间间隔产生中断。在低功耗状态下,可以用低频时钟作为定时器中断计数源。当定时器中断未到时,MCU 可以处理其他事情,实时性较好。本文采用定时器中断来实现时间片。

2 节点硬件设计

2.1 器件选择

战场无线传感器网络的节点采用低功耗单片机+无线收发芯片的模式进行节点之间的通信和交互,协同完成特定的功能任务。

单片机采用 TI MSP430F449^[8-9],16 位 RISC 结构,具有工作模式(AM)和 5 种低功耗模式(LPM)。低功耗模式下,CPU 可以被中断唤醒,响应时间小于 6ps。在 8MHz 时钟驱动下,指令周期可达 125ns;内部包含硬件乘法器和大量寄存器,以及多达 64KB 的 Flash 程序空间和 2KB 的 RAM,为数据和运算提供了保证。丰富的外设包括看门狗定时器,基本定时器,比较器,16 位定时器(TA、TB),串口 0、1,液晶显示驱动器,6 个 8 位的 I/O 端口,可以方便地构建一个较为完整的系统。充分利用计数器的多路任意波形产生功能和中断控制功能,保证了一些复杂的时序控制任务的完成。MSP430F449 是 Flash 型器件,片内有调试接口和电可擦写的 Flash 存储器,由 JTAG 接口读取片内信息,不需要仿真器和编程器,调试十分方便。

无线收发芯片采用 Chipcon CC2500,体积小,外围电路简单。CC2500 只有 20 引脚,4×4mmQFP 封装。相对于其他射频芯片的封装,其在手工焊接上更容易一些,典型电路需要很少的外部组件。图 2 给出了 CC2500 典型应用电路图^[10]。

CC2500 硬件支持数据包处理,数据接收时,有缓冲、信息同步字自动检测、地址检测、信息长度分析和 CRC 校验等功能,支持前向纠错,内部集成温度传感器。具有数字 RSSI 输出,载波感应指示及自动消除通道评价功能(CCA),硬件支持 CSMA/CA 功能,扩展应用灵活方便。耗流量极低,灵敏度高,无线传输速率高,适合低功率产品使用。MSP430F449 和 CC2500 的无线应用组合在兼容性和开发支持上具有很大的优势。

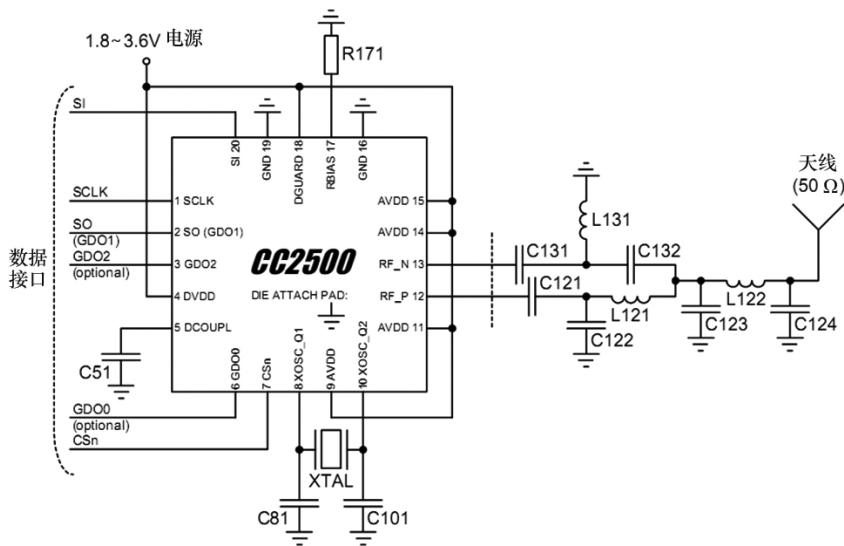


图 2 CC2500 典型应用和评估电路图

Fig. 2 Typical application and evaluation circuit of CC2500

2.2 硬件连接及资源分配

在一个典型的系统中,CC2500 和 MCU 通过数字接口相接,MCU 必须通过 4 线 SPI 总线控制接口 (SI、SO、SCLK 和 CSn) 编程控制 CC2500 进入不同模式,读/写缓冲区数据,从通用控制状态引脚 GDO0 和 GDO2 读回状态信息,对无线通信的进程进行判断和控制。

MSP430F449 和 CC2500 连接方式如图 3 所示,采用具有中断能力的 P2 口作为与 CC2500 交互的数字接口,通过软件 bitbang 方式控制 P2 口的 P2.0 到 P2.3 引脚模拟 SPI 工作。P2.4、P2.5 和通用控制状态引脚 GDO0、GDO2 连接,MCU 获取引脚信息,判断无线通信的状态,进行逻辑控制。

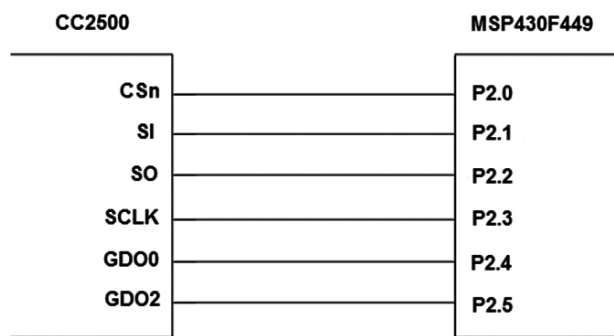


图 3 CC2500 和 MSP430F449 系统硬件接口

Fig. 3 CC2500 and MSP430F449 hardware interface

定时器 TA 产生时间基准,若在定时器中断程序中直接处理判断时隙,并且按不同情况发送不同数据,时间控制要求很高。按照中断程序不易太过复杂的原则,只在定时器中断程序中处理判断时隙,处理各种标志位。通过定时中断程序和主程序中 main 函数的逻辑处理实现对时隙的动态分配和控制。

3 基于 TDMA 的低功耗通信协议软件设计

3.1 标志位介绍

时隙分配的逻辑控制过程中,准确判断系统当前所处的状态非常重要。通常的做法是在程序中设定若干标志,系统状态变化时,将对应的标志位进行修改,这样就可以在程序中通过访问标志位,获取目前系统的状态。

为了节省空间和便于管理与扩展,采用状态字的方式来集中读写各个标志位。状态字由若干标志位组成,每一个标志位可以自定义。本文采用一个状态字,使用其中的 6 个标志位:本机是否参考时间标志 TIME_CENTER (BIT7),是否修正时间标志 TIME_CHAGED (BIT6),时间片到标志 TX_OK (BIT5),发送校正命令帧时隙标志 SEND_SYNC_SLOT (BIT4),本节点时隙标志 ME_SLOT (BIT3),发送结束标志 TX_END (BIT2)。其他 2 个标志位 BIT1 和 BIT0 未定义。

3.2 时隙同步处理

时隙同步是指整个系统的时钟要相同,网内所有节点对时隙的划分必须有统一的标准,使每一次发射都以统一的时隙起点作为定时基准,每一次接收都能正确识别出接收到的信息数据流中时帧排列的规律,以保证正确地发射和接收。

每个时帧中第一个时隙是控制时隙,在这个时隙中,系统完成对 TDMA 流程的控制,包括时隙的同步、时隙分配表的建立与分发等操作。

在控制时隙中进行时隙同步的方法如下:假设某个节点 A 作为通信发起节点,则由节点 A 作为无线通信的协调节点,进行时隙同步,同步过程分为粗同步和精同步实现。

1) 粗同步。节点 A 启动本地定时器 TA,开始时隙计时,记下此时的本地时间 t_1 ,发送粗同步命令帧,发送结束后,记下本地时间 t_2 ,可以得到发送包时延 $Delay_a=(t_2-t_1)$ 。各接收节

点收到无线信号会产生中断,此时记下本地时间 r_1 ,待数据包接收完成,判断是粗同步命令帧,则启动本地定时器 TA,记下本地时间 r_2 ,可以得到接收包时延 $Delay_{rx}=(r_2-r_1)$ 。

2) 精同步。下一个控制时隙到来时,可进行精同步。节点 A 发送精同步命令帧,将 $Delay_{rx}$ 广播到各个接收节点。接收节点判断数据包类型,若为精同步命令帧时,得到无线信道传播总时延为 $Delay_{tx}+Delay_{rx}$ (无线电传输速率为光速,战场无线传感器网络节点间距较小,其传播时延忽略不计),修改本地时间与节点 A 同步。

随着时间的推移,晶振漂移等因素给节点带来的时钟偏差会逐渐累积,并超出了误差允许的范围,可以重复采用精同步进行时隙同步,将误差维持在可接受的范围内。为了提高同步的精度,还可以在控制时隙中加入性能较好的时间同步算法。

3.3 TDMA 无线网络通信协议软件流程

首先为全网的每个节点分配一个唯一的 ID,系统中利用定时器 TA 进行时段的跟踪,将定时器的溢出时间设置为时隙的大小。

基于事件触发型的思想,当战场无线传感器网络节点发现感兴趣的事件,需要进行无线通信时,最先探测到事件的节点采用竞争机制获得通信控制权。假设节点 A 获得通信控制权,首先进行时隙的同步,然后全网广播网络搜索命令,获得网络内所有需要进行通信的节点 ID。得到参与无线通信的所有节点 ID 后,按照一定的规则,建立时隙分配表,通过广播时隙分配表,各个节点将获得自己的时隙分配信息。

中断服务程序里,用变量 $Flag$ 作为时隙的控制计数器,每次进入中断, $Flag$ 值增 1,表示当前的时隙序号, $Flag$ 值在 main 主程序中初始化为 0。通过判断 $Flag$ 值与本地时隙分配表的关系,产生各个标志位,处理完成后退出中断,转入 main 函数中的 while 循环进行判断。

主程序 main 初始化各部分完毕后,转为低功耗模式 LPM3^[11]。在 LPM3 模式下,CPU 停止活动,外围模块继续运行,允许中断和复位请求,所有内部总线停止活动,I/O 端口的全部引脚以及 RAM 和寄存器保持不变。MCLK 信号停止,ACLK 信号活动,所有被允许的、不依赖于 MCLK 的中断事件可以从此状态唤醒。在 $V_{cc}=3V$ 的情况下,LPM3 模式下消耗的电流只有 $1.3\mu A$ 。

使用一个 while 循环,在低功耗模式和查询标志位状态之间切换。如有定时器中断发生,即下个时隙到来时,查询各标志位状态,转入相应的处理程序,否则保持低功耗模式状态,开总中断等待下个时隙或者数据接收中断。

若本节点的时段到了,则调用发送函数,尽可能多地发送正在等待发送的数据。收到应答后可将数据从发送缓冲区中清除。否则,若等待一段时间后,仍未能收到应答,则必须重新发送该消息。如果在时隙内未完成数据的发送,则将数据放到下个时隙内继续发送。无线网络通信协议流程如图 4 所示。

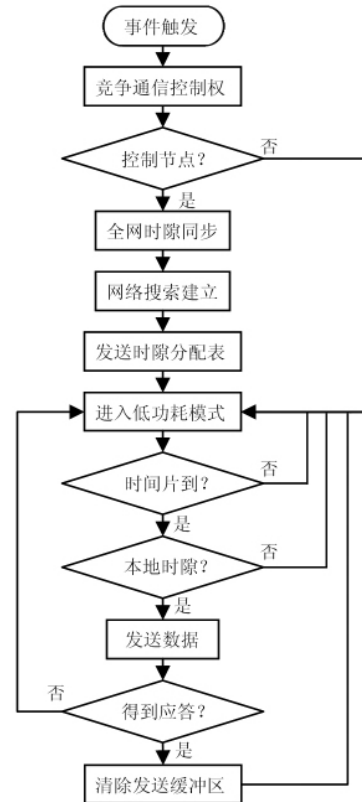


图 4 无线网络通信协议流程图

Fig. 4 The flowchart of the wireless network communication protocol

4 实验测试

4.1 实验目的与参数设置

实验目的:使用 3 个节点 TDMA 无线组网通信,验证自定义无线通信协议数据流正确性。

参数设置:MSP430F449 的 MCLK 来自外部的 8MHz 晶振,ACLK 为 32768Hz,时隙长度设置为 1s。CC2500 传输速率为 500Kb/s,接收和发送结束后自动转为接收,采用可变数据包长度,无地址滤波方式。使用 4B 的前导码和 30/32 位同步字符探测,调制方式为 MSK,采用 CRC 校验,FEC 关闭。实验调试环境布置如图 5 所示。



图 5 无线网络通信协议实验调试环境

Fig. 5 Wireless network communication protocol debugging environment

4.2 实验设计

任意触发一个节点的按键,模拟检测到事件,则此点获得通信控制权,LED1 点亮。以此节点作为时间参考的基准,开始进行无线通信流程。

有 3 个节点参与无线通信,每个时帧由 4 个时隙组成,其

中第 1 个时隙作为控制时隙。参与无线通信的 3 个节点按 ID 大小顺序分配时隙,分配的结果和对应时隙的 *Flag* 值如图 6 所示。第 1 个控制时隙作为触发启动,经历了 3 个时帧后,通信结束。

用实验板的发光二极管和 LCD 液晶直观显示所获得的

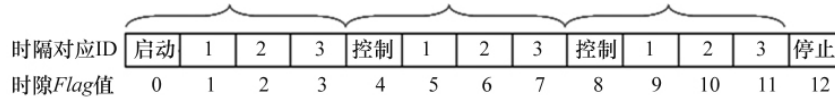


图 6 节点时隙分配图

Fig. 6 Time slot assignment of nodes

当前状态信息。节点的 LED1 点亮,作为本节点通信控制权标志。当 LED2 闪烁时,表示处于本节点发送的时隙。LCD 液晶显示屏显示 TX 和向上的箭头,表示发送数据,显示 RX 和向下的箭头,表示接收数据。节点接收数据时,LCD 液晶显示屏显示接收到数据对应的节点地址,同时,在每一个时隙会更新显示本时隙的 *Flag* 值。

通信结束时,LED 全亮,表示通信结束,LCD 显示本节点接收到的数据包个数。

经实验测试,整个通过程序逻辑正确,节点按照拟定的时隙分配顺序进行 TDMA 组网无线通信,所有节点数据包接收正确。

5 结论

TDMA 在战场无线传感器网络应用中起着重要作用,是完成自定位、目标跟踪等战场任务的基础。TDMA 将整个信道传输信息的时间划分为若干时隙,节点在每个时隙中独占无线信道进行传输,结构可靠,便于控制,是一种应用广泛的通信 MAC 协议,时隙的分配与控制是协议实现的核心和难点。

本文提出了一种在战场无线传感器网络节点中实现 TDMA 通信的低功耗通信协议,结合低功耗单片机 MSP430F449 和无线收发芯片 CC2500 实现,并验证功能。该协议逻辑判断可靠,代码量小,控制扩展灵活,在没有数据收发的时候处于低功耗模式,适用于低功耗轻量级的无线传感器网络。

参考文献 (References)

[1] Textron Systems. Next generation ground combat systems[EB/OL]. 2009-08-22, <http://www.dtic.mil/ndia/2002mines/risseeuw.pdf>.

[2] M93 HORNET: Family of wide area munitions-WAM[EB/OL]. 2009-09-10, <http://www.globalsecurity.org/military/systems/munitions/m93.htm>.

[3] Intelligent munition system [EB/OL]. 2009-09-18, http://textrondefense.com/pdfs/news/fcsupdate_armymag_dec06.pdf.

[4] Molisch A F. 无线通信 [M]. 田斌,译. 北京: 电子工业出版社, 2008: 289-290.

Andreas F. Molisch. Wireless communications [M]. Tian Bin, trans. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008: 289-290.

[5] 樊昌信, 张甫翊, 徐炳祥, 等. 通信原理[M]. 5 版. 北京: 国防工业出版社, 2001: 223-229.

Fan Changxin, Zhang Fuyi, Xu Bingxiang, et al. Communication principles [M]. 5th ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2001: 223-229.

[6] International Engineering Consortium. Time division multiple access[EB/OL]. 2009-09-05, <http://www.iec.org/online/tutorials/acrobat/tdma.pdf>.

[7] 聂毅. 单片机定时器中断时间误差的分析及补偿 [J]. 微机计算机信息, 2002, 18(4): 37-38.

Nie Yi. Control & Automation, 2002, 18(4): 37-38.

[8] Texas Instruments Incorporated. MSP430x43x, MSP430x44x mixed signal microcontroller [EB/OL]. 2009-10-23, <http://focus.ti.com.cn/cn/lit/ds/symlink/msp430f449.pdf>.

[9] Texas Instruments Incorporated. MSP430x4xx family user's guide. [EB/OL]. 2009-10-23, <http://focus.ti.com.cn/cn/lit/ug/slau056i/slau056i.pdf>.

[10] Texas Instruments Incorporated. Low-Cost Low-Power 2.4GHz RF Transceiver [EB/OL]. 2009-10-25, <http://focus.ti.com.cn/cn/lit/ds/symlink/cc2500.pdf>.

[11] 胡大可. MSP430 系列超低功耗 16 位单片机原理与应用 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002: 16-20.

Hu Dake. Principles and applications of MSP430™ 16-bit ultra-low power MCUs [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2002: 16-20.

(责任编辑 杨书卷)

本期九宫填数答案

九宫 难度系数 ◆◆◆◆◇

4	6	3	9	7	2	8	5	1
1	9	5	3	6	8	7	4	2
7	2	8	1	5	4	3	6	9
9	8	2	6	4	5	1	7	3
3	5	7	8	9	1	6	2	4
6	1	4	2	3	7	5	9	8
8	3	6	5	2	9	4	1	7
5	4	9	7	1	3	2	8	6
2	7	1	4	8	6	9	3	5
3	6	1	9	4	5	2	8	7
8	7	9	3	2	6	4	5	1
5	4	2	7	1	8	6	3	9
7	5	8	1	6	4	3	9	2
1	2	4	8	3	9	7	6	5
6	9	3	2	5	7	8	1	4