基于ZigBee和GPRS的嵌入式远程监测系统的设计

张永梅 王凯峰 马 礼 杨 冲
(北方工业大学信息工程学院 北京 100144)

摘 要 为了实现传感器网络的远程监测,结合Zigbee和GPRS各自的优势和特点,提出了一种基于ZigBee网络与GPRS网络相结合的设计方案。通过CC2530构成的无线传感器网络与已普及的移动通信网结合的组网方式完成数据采集、汇总、上传及远程监控。实验结果表明,这种方案利用了各自网络的优点,增强了对远程Zigbee网络节点的实时监控与处理能力。

关键词 ZigBee技术,GPRS,远程监测,无线传感器网络
中图法分类号 TP39 **文献标识码** A

Design of Embedded Remote Monitoring System Based on ZigBee and GPRS

ZHANG Yong-mei WANG Kai-feng MA Li YANG Chong
(School of Information Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract In order to realize the remote monitoring of wireless sensor, a design scheme combined with ZigBee network and GPRS network was proposed with advantage and features of ZigBee and GPRS respectively. Data collection, converging, transferring and remote monitoring could be completed through the cooperation between the wireless sensor network constituted by CC2530 and the mobile communication network with widespread popularity. Experiment results show that the scheme combines the advantage of each network, strengthens the real-time monitoring ability and processing ability of the remote node in the network.

Keywords ZigBee technology, GPRS, Remote monitoring, Wireless sensor network

1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)是数据计算、网络通信和传感器3项技术相结合的产物,它可应用于布线和电源供给困难的区域、人员不能到达的区域(如受到污染、敌对区域)和一些临时场合(如发生自然灾害、固定通信网络被破坏)等,因而在军事国防、环境监测、工业控制、智能交通、抢险救灾、煤矿危险报警和区域远程监测等诸多领域具有广泛的应用前景[1]。

ZigBee技术是由ZigBee联盟推出的一种基于IEEE802.15.4标准的近距离、低复杂度、低功耗、低数据传输率、低成本的新型无线通信技术[2],它不需要固定网络支持,具有快速展开、抗毁性强等特点[3],能够实时地感知和采集网络覆盖区域中的各种环境或监测对象信息。目前典型WSN网络覆盖范围有限,大规模网络路由计算复杂,节点远程管理困难。而GPRS/GSM(通用分组无线业务/全球移动通讯系统)网络覆盖范围越来越广,传输速度不断提高,而成本不断下降,同时传输距离几乎不受约束[4]。因此,利用GPRS技术结合ZigBee无线传感器网络,实现数据大量传输及远程控制成为一种可行方案[5]。目前国内外在无线传感器网络应用研究中,主要以TI公司的Z-Stack协议栈为参考,它的网络构成分为全功能节点或称为协调器节点和半功能节点。半功能节点间不能相互通信,仅负责数据采集,并将采集数据交由全功能节点路由转发,完成数据通信。这种架构清晰简洁,开发代价相对较小,在数据量很小的情况下可以很好地完成传感网络的数据传输,且能耗较低。但是它存在以下几点不足:

(1)功能较为简单,在复杂环境下对数据量较大或者较频繁的数据传输容易产生瓶颈问题,造成大量丢包甚至节点无法处理导致的看门狗复位现象。

(2)协调器节点内部采用的是51系列单片机,作为中心节点,其存储能力相对较差,可扩展性不好。

(3)无法实现数据的远程交互与控制,限制了无线传感器网络的应用范围。

(4)半功能节点间不能通信,它与协调器节点采用单跳路由,路由开销较大,并且对数据量较大的网络,协调器节点间通信也容易产生瓶颈。

针对无线传感器网络的特点和存在的不足,本文提出了一种基于ZigBee与GPRS相结合的传感器网络通信方案。以CC2530作为终端传感器节点采集数据,采用带有GPRS模块和ZigBee汇聚模块的S3C2440嵌入式设备作为中心节点(Sink),充当WSN终端节点和网络监控中心的联络节点,利用嵌入式中心节点的双通道特性与远程监控中心通信[6],从而构建一个基于ZigBee和GPRS网络相结合的远程数据通信监控系统,实现ZigBee传感网络的远程监测与控制,以

到稿日期:2011-07-19 返修日期:2011-09-29 本文受北京市高校学术创新团队资助项目(PHR201007121)资助。
张永梅(1967—),女,博士,教授,主要研究方向为人工智能,E-mail:zhangym@ncut.edu.cn。

满足复杂环境和复杂监测任务对系统及节点性能的高要求。传感网络数据采集中多个测点一般在一定的距离范围内，而ZigBee的有效通信范围一般是10～300m，这为组建ZigBee网络在通信距离上提供了可行性；而GPRS技术不但成熟，而且具有广泛的覆盖范围，可以频繁传送低数据量信息，传输间隔大于网络延迟，因而它已成为传感器网络远程交互的可行途径；随着嵌入式设备计算能力的提升以及成本的降低，借助嵌入式Socket编程，保证了协议解析、跨网传输的效率和可行性。高密度低功耗的传感网络已日益走进生产、生活的各个方面，ZigBee网络与有线网络的结合也将成为无线传感网络发展的一种趋势。

2 系统的组成

系统结构框图如图1所示。采集节点采用ZigBee终端节点配置各型传感器，通过汇聚节点汇总到嵌入式中心节点进行解析处理、存储和上传，透过GRPS模块将ZigBee协议数据转发到公网远端服务器上。

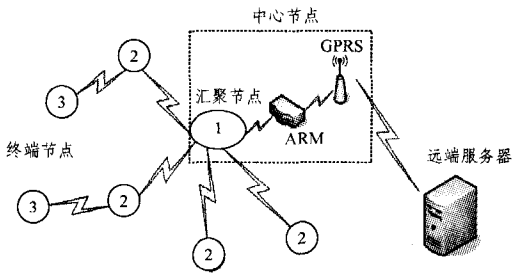


图1 系统框图

2.1 中心节点设计

传统的ZigBee网络是以诸多协调器节点作为簇头，其只能与其单跳功率覆盖范围内的其他协调器节点通信，并不具有与外网交互的功能。本系统中心节点利用S3C2440作为控制核心，整合了CC2531汇聚模块以及GPRS模块，实现了数据的汇聚、解析、存储、上传以及远程交互，可以通过公有网络对传感区域进行控制。S3C2440是一款基于ARM920T内核的高性能、低功耗、低价格的微处理器，扩展了128M NAND FLASH、64M SDRAM，主频可达400MHz[7]。

本系统有两种可选的构成方式：一种是将其中2个串口分别连接一个CC2530汇聚模块和一个GPRS模块；另一种是选用CC2531汇聚模块通过USB连接到ARM板上(性能更优)。传感器网络数据由汇聚模块接收后，由ARM板进行解析处理，将拆帧后的有效数据重新封装，交由GPRS模块，同时将数据存储到本地嵌入式数据库中保存。这里的GPRS模块采用可透传的数据传输单元(Data Transfer Unit，DTU)，通过程序设定的目的服务器IP地址和端口号，利用Socket进行TCP流数据传输或UDP数据报传输，而非传统AT指令发送短信的形式，避免了以数据量有限的短信模式接入公网不能连续传输大量数据的弊端，大大增加了系统灵活性。

2.2 传感器终端节点设计

目前的传感器网络大多通过其硬件引脚连接配置为半功能节点或协调器节点。使用半功能节点进行数据的采集，相互间不能通信，必须通过协调器节点路由转发。这种模式开发代价较小，简单易行，也相对节能，然而在一些复杂的场合中，此种模式不足以满足其需求。尤其是数据量相对比较大的情况，协调器节点在接受大量子节点数据时，会造成严重的丢包现象。而且由于其不能与外界联系，只能通过协调器节点层层传递数据，靠近基站中心的协调器节点承担了更大的负载，甚至导致其无法处理，引起看门狗自动复位节点。

本系统的采集终端节点没有采用半功能方式，终端节点相互可以通信。借助中心节点可与公网通信，及时将数据上传，无需中心节点间的层层传递，这使得整个网络数据传输负载更为均衡，避免了传统传感器网络在大数据量传输时的瓶颈。这里传感器节点模块采用TI公司最新的符合IEEE802.15.4规范的片上系统(System on a Chip，SOC)—CC2530。该芯片在内置增强8051核的基础上整合了ZigBee射频(RF)前端和内存，具有256kB可编程闪存和8k的SRAM，还包含12位模拟数字转换器、18个中断源、4个定时器、AES安全协同处理器以及21个可编程I/O引脚[8]。通过IAR开发环境自带的CC2530.h头文件中对各个特殊功能寄存器的定义，可以方便地对这些引脚进行编程，配置为连接模拟数字转换器、计时器或串口部件的外围设备I/O。因此，需要很少的外围部件配合就能实现信号的收发功能，最大程度降低了系统的开发周期和成本，同时大大降低了系统开发的风险。此外，为了方便功能调试和实验，系统集成了18B20温度传感器，精度可达0.0625摄氏度。

3 系统的实现

3.1 路由算法设计

目前提出的传感器网络路由协议主要有平面和层次路由协议两类。典型的平面路由有有序分配路由(Sequential Assignment Routing，SAR)、定向扩散(Directed Diffusion，DD)等。典型的层次化协议包括LEACH、DDCH(层次路由算法)[9]。本系统采用固定的嵌入式设备作为中心节点，根据传感器网络的特点本系统采用了基于层次的自适应路由算法(Self-adaptive Clustering Routing，SCR)。其层次化路由主要通过中心节点发起，在各自节点的覆盖范围内，接收层次数最小的网络组建帧并对该帧进行处理。终端节点在上电复位后，定时广播加入网络的请求帧。中心节点接收到广播信息后，发送组建网络帧并携带其自身地址和层次数。该帧被终端节点接收后将形成父子关系，其层次在接收的最小层次数上加一，并将对应的地址作为父地址，即下一跳地址存放在缓存中。同时将自身地址与层次替换到组建网络帧中广播。对于其父节点和同父节点即兄弟节点，该广播帧不予响应，从而避免“活锁”现象。这样，每个节点非重复广播即可组建层次化路由体系，实现多跳网络拓扑。相比现有的半功能节点单跳至协调器节点的方法，层次化多跳路由可以增加单个簇内的网络容量，并且最大程度简化路由算法；另外，网络采用由边沿节点发起的链路式路由维护，能实时根据网络拓扑变化更新边沿节点标记。在节点的网络拓扑结构发生变化时，根据数据的传输需求建立路由并转发数据，避免对基于表驱动路由中不断维护路由表的问题，以最大限度减少路由维护的数据开销，降低能耗。

3.2 ZigBee网络通信设计

3.2.1 传感器终端节点程序设计

基于Z-STACK的通信格式，本文自定义了6种通信类

型格式，即重初始化帧、组建路由帧、路由维护帧、数据帧、回复帧和新节点加入网络请求帧，并为每一种帧类型定义了帧标志位。系统初始化后，将通过中断来判断有无数据到来。如果有数据接收，则优先按照标志帧类型进行处理；如果没有数据接收，则先判断是否已经入网，即是否建立路由关系。对于已建立了网络的节点，会将采集到的数据及路由信息发送给其父级节点，否则该节点将等待。直到终端节点加入网络后，相应的已组网标记被置为高电平，节点才开始进行数据定时发送和路由维护。其流程见图 2。

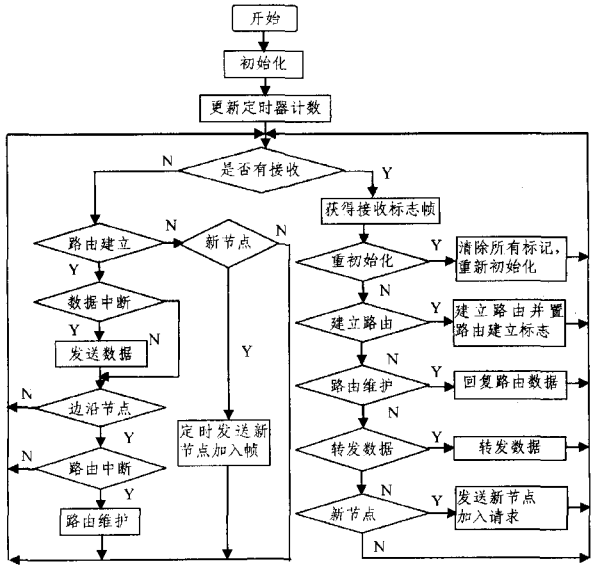


图 2　终端节点通信流程图

节点经过初始化后启动定时器，一旦网络建立，则利用计时中断触发数据发送和路由维护，并采用信道冲突检测(Clear Channel Assessment，CCA)机制避免了收发冲突[10]。在节点通信中，根据不同的帧类型封装相应的报文，再调用 MAC 层的封装函数组织 MAC 数据帧。其中数据帧的源地址为本设备地址，而目的地址是通过相应的路由算法计算出来的下一跳节点的地址信息；帧数据组织好后，将该数据帧发送给下一跳节点，由下一跳节点来负责接收、转发，直至汇总到嵌入式中心节点。

3.2.2　传感器汇聚节点程序设计

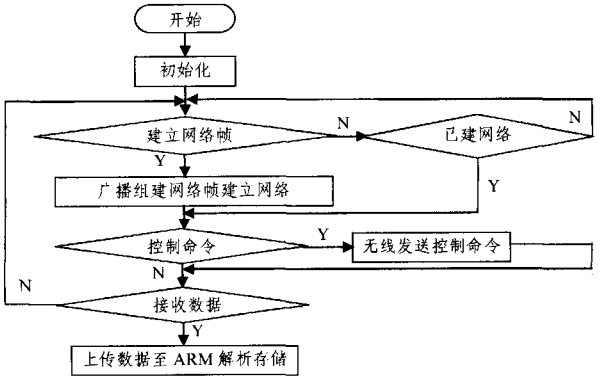


图 3　汇聚节点通信流程图

汇聚节点既可以采用 CC2530 以串口方式，也可以采用 CC2531 以 USB 方式连接嵌入式设备。本文篇幅所限，则以 CC2531 为例。首先汇聚节点扫描信道内的有效帧数据，等待网络加入请求帧。一旦收到该请求，汇聚节点广播组建路由帧，建立该信道内的网络，并将接收到的路由表信息通过 USB 接口同步发送到嵌入式设备上保存。网络建立后，数据的通信与终端节点基本相同，并同时将接收数据反馈给嵌入式平台，进行解析处理和保存。汇聚节点的流程图如图 3 所示。

系统初始化后发出建立网络帧的广播，通知终端节点加入网络；对于已经组网的汇聚节点，则可以直接发送控制命令或者接收终端节点的数据，利用中心节点的双通道特性，解析后将相关数据存入数据库并通过 GPRS 透传模块上传到服务器。

3.3　S3C2440 嵌入式程序设计

该模块采用 WinCE5.0 操作平台，并采用 C# 编程，利用多线程同步技术分别进行双串口接收、发送以及数据解析及数据库多表存储，且采用 COM 技术将程序封装为 COM 组件。上位机可直接调用一致化的 COM 组件进行交互，使系统具有良好的一致性与可扩展性。本系统既可以采用 RS-232 串口与 ZigBee 汇聚节点 CC2530 通信，也可以使用 USB 接口与内置 USB 的 CC2531 进行通信；借助 DTU 和 Socket 编程完成面向连接的可靠网络传输。此外，由于 ARM 设备相对单片机的强大优势，可外置大容量 SD 存储卡保存数据，本系统利用嵌入式节点内嵌的 SQLite 数据库保存所有节点的数据及网内的路由表信息，以维护路由并通过数据库中的序列号和时间信息重连失效节点，实现无线传感器网络的存储记忆功能。它既可以以 C/S 模式与远端服务器交互，上传数据，又可以独立作为嵌入式服务器，存储当前网络数据，供手持移动设备以 B/S 模式进行访问，从而拓宽了应用领域。

4　系统通信数据帧格式

ZigBee 协议主要包括物理层、数据链路层、网络层、应用汇聚层和应用层。其底层采用 IEEE 802.15.4 协议所规定的物理层与 MAC 层协议，配合 ZigBee 联盟所定义的网络、传输及应用层构成整个协议体系。本系统继承了 ZigBee 协议标准，并在其基础上定义了 6 种不同的帧数据类型。

4.1　物理层数据帧格式

IEEE 802.15.4 标准的物理层数据帧格式如表 1 所列。主要包括前导码(Preamble)：四字节长，收发器在接收数据期间会根据前导码的特征完成片同步和符号同步；帧起始间隔符(Start-of-framedelimiter，SFD)：一个字节长，值固定为 OxA7，标识一个物理帧的开始；帧长度(FrameLength)：物理帧的负载的长度，由一个字节的低 7 位表示，据此物理帧的负载最长不会超过 127 个字节；物理服务数据单元(PHY Service Data Unit，PSDU)，一般承载 MAC 帧，因此根据 MAC 帧的不同，物理帧的长度也会不同。

表 1　物理层数据帧格式

Preamble	SFD	Frame Length (7bit)	Reserved (1 bit)	PSDU

4.2　MAC 层数据帧格式

MAC 层帧结构的设计目标是用最低的复杂度实现数据的可靠报文传输。每个 MAC 层的帧都由帧头(MAC header，MHR)、负载(payload)和帧尾(MAC footer，MFR) 3 部分组成。帧头由帧长、帧控制信息、帧序列号和地址信息组成。

MAC 负载具有可变长度，具体内容由帧类型决定。帧尾由帧头和负载数据的 16 位 CRC 校验序列以及信号接收强度指数(Received Signal Strength Indication，RSSI)组成。

图 4 是系统的 MAC 层数据帧格式。其中帧控制字段(FrameControl)是一个 16bit 长的字段，包括帧类型(Frame Type)、安全(Security)、帧未决(Frame Pending)、应答请求(Ack)、地址类型(Address Mode)等信息。

Frame Length 帧长度	Frame Control 帧控制	Sequence Number 序列号	Des Pan 目的域	Des IP 目的地址	Src Pan 源域	Src IP 源地址	Payload 负载	Footer 帧尾
1 字节	2 字节	1 字节	2 字节	2 字节	2 字节	2 字节	可变	2 字节

图 4　系统 MAC 层数据帧格式

5　实验结果及分析

以往 ZigBee 网络与 GSM 网络相结合的尝试都是以 AT 指令将传感信息以短信的形式上传，从而进行远程监控。然而在短信模式下的单条信息数据量有限，局限了连续数据的传输，并且传输实时性相对较差，可靠性也不高，会导致短信的丢失。本系统采用面向可靠连接的 Socket 流式套接字，在传输速率、实时性、可靠性以及传输格式的灵活性上都有显著提高。

5.1　组网测试

根据以上的设计思想和处理流程，设计了若干个 ZigBee 节点，组成小型网络，并用 VC 编写了上位机远程监控程序。申请真实 IP 并开辟一个端口给上位机作为远端服务器，由 CC2530 终端节点采集温度，经 ZigBee 网络汇总到嵌入式中心节点。通过其接收线程接收数据，利用中心节点的双通道特性，一方面可以与 ZigBee 网络通信，另一方面可以通过有线或无线方式接入公网相互通信。将 ZigBee 协议数据帧解析封装为 TCP/IP 协议数据帧，并通过 GPRS 模块根据设置的远端 IP 及端口号将数据由移动通信网络上传到服务器，实现 ZigBee 网络数据的远程交互。远程服务器端监测到的网络拓扑及温度数据如图 5 所示。

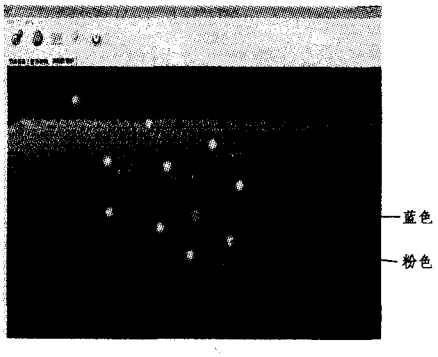


图 5　监控界面网络拓扑图

图 5 中蓝色节点为 ARM 汇聚节点。粉色节点为传感器终端节点。终端节点通过 ZigBee 网络将信息发送至汇聚节点，再通过汇聚节点中的 GPRS 模块将数据上传至远端服务器，由服务器端的解析程序将网络拓扑结构和数据展现出来。

5.2　可靠性测试

相比传统的短信模式进行数据传输，在采用相同 GPRS 模块的前提下(本文采用 SIM300)，以单一温度数据作为测试用例，数据帧大小为 20 字节。在空旷室内、室外可视距范围进行测量，得到传感器网络传输温度数据的丢包情况对比如图 6 所示。

从图 6 可以看到，在短信模式下，每秒平均发送 3 帧以上就会出现丢包现象。而以 TCP 流式数据传输，在每秒 300 帧以内，传输几乎没有丢包，系统可以稳定可靠地通信；随着传输速率的提升，其丢包数也会大幅增加。通过查看数据包发送序号可以得到发送的数据包总数和丢失的包个数，由此可以计算通信的丢包率：

$$丢包率=\frac{丢失包个数}{数据包总数}$$

通过计算，本系统在以 300 帧每秒速率传输时，系统平均丢包率小于 5%。利用嵌入式中心节点数据库中的节点数据发送时刻 Ts 与服务器端数据库中相应 ID 及序号的接收时刻 Tr 之差计算 GPRS 网络延迟 Tw，其中 $Tw=Tr-Ts+\tau$，τ 为嵌入式节点时间与服务器时间的时间调整系数。在网络层为 Lv 的节点信息传输至服务器的延迟为：

$$\Delta T=(Lv-1)\times Tm+Tw$$

式中，Tm 是 ZigBee 网络单跳传输延迟。而 ZigBee 网络单跳范围内的通信延迟不超过 30ms，通过计算得到网络建立总延迟为 1～4s。建立网络后在单帧发送数据量小于 128 字节时，平均延时不到 1s，实时性强；相比传统短信方式，尤其是短信接收不确定、延迟相对较高这一劣势，本系统数据实时性强、可靠性更高。但对于短时间连续大量的数据传输，延时明显增加，同时丢包率上升，主要是系统采用实时传送，瞬时数据量过大造成 GPRS 数据溢出而丢包。因而在实时监控时，需控制合理的数据流速率。在实时性要求不高的场合，可以借助嵌入式节点内置的数据库缓存数据，以避免 GPRS 发送缓冲溢出。

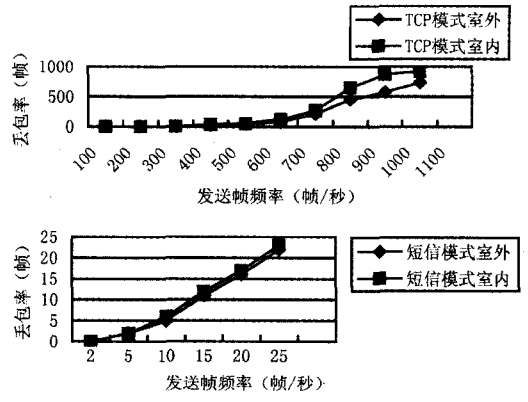


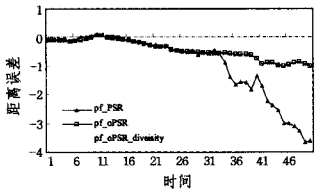
图 6　传感器网络数据丢包情况对比

结束语　本文以 ZigBee 和 GPRS 技术为核心，实现了 WSN 的无线数据传输及远程监测。系统具备典型 WSN 节点数量多、数据采集量大的优点，又融合了 GPRS/GSM 网络覆盖范围大、可以远程大量传输的优点。与传统技术相比，大大缩短了建设工期，系统稳定性和可靠性更高，具有广阔的发展空间和市场应用前景。与现有的 ZigBee 网络相比，其增强了 Sink 节点的处理、存储能力，结合 GPRS 技术实现了数据的远程交互、监测与控制，避免了现有技术数据传输时的瓶颈问题，同时为 ZigBee 网络与 WIFI 等无线技术融合实现多方位传感与音视频综合的远程监控体系提供了一种参考，拓宽了无线传感器网络的应用范围。

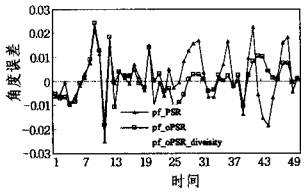
(下转第 234 页)

表 2　所提算法的性能比较

粒子滤波算法 (Th=2/Np;Tl=1/2Np)	时间(s)	均方根误差	
		距离(m)	角度(rad)
Based on PSR	0.04687	1.44059	0.01041
Based on oPSR	0.06250	0.54157	0.00773
Based on oPSRdiversity	0.07812	0.21341	0.00704



(a) 距离误差



(b) 角度误差

图 2　所提算法的位置/角度误差

结束语　重采样在基于 SIS 的粒子滤波中起着重要的作用:如果样本权重分布不均,那么在动态系统中传递较小权重的样本就是浪费计算资源;当样本权重发生偏斜,重采样就可提供选择重要样本及复原采样器的途径,但重采样不仅引入额外的蒙特卡罗误差,而且可导致样本的多样性丧失以致样本耗尽。此外,频繁执行重采样会导致样本衰竭,而过少执行重采样会导致滤波发散。因而,什么时候执行重采样以及如何执行重采样是粒子滤波的重要研究内容。通过对现有粒子滤波算法的不足进行分析,本文提出了一种基于多样性向导的自适应重采样粒子滤波。该算法共包括两个方面:其一基于多样性向导自适应调整重采样阈值。在对 Doucet 提出的基于有效样本大小的自适应重采样研究之上,借助种群多样性因子来自适应地调整有效样本大小的阈值。在两种多样性测度测定的样本多样性极差的情况下,在重采样之后引入了样本变异操作用来确保样本的多样性。其二提出了一种改进的部分分层重采样算法。该算法的优点在于执行快、时间短,缺点在于重采样后的样本权重不一致,这里结合权重优化的思想改进 PSR 重采样的样本权重计算。通过仿真实验,所提粒子滤波算法的性能和有效性均得以验证。

参 考 文 献

[1] Gordon N J, Salmond D J, Smith A F M. Novel approach to nonlinear/non-Gaussian Bayesian state estimation[J]. IEE Proceedings on Radar and Signal Processing, 1993, 140(2): 107-113

[2] Doucet A, Godsill S J, Andrieu C. On sequential Monte Carlo sampling methods for Bayesian filtering[J]. Statistics and Computing, 2000, 10(3): 197-208

[3] Arulampalam M S, Maskell S, Gordon N, et al. A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-GaussianBayesian tracking[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2002, 50(20): 174-188

[4] Liu J S. Metropolized independent sampling with comparisons to rejection sampling and importance sampling[J]. Statistics and Computing, 1996, 6(1): 113-119

[5] 杨振强,王常虹,庄显义. 自适应复制、交叉和突变的遗传算法[J]. 电子与信息学报, 2000, 22(1): 112-117

[6] 段琢华. 基于自适应粒子滤波器的移动机器人故障诊断理论与方法研究 [D]. 长沙:中南大学信息科学与工程学院, 2007

[7] Douc R, Cappe O, Moulines E. Comparison of resampling schemes for particle filtering[C]// Proceedings of Image and Signal Processing and Analysis. Zagreb: IEEE Press, 2005: 64-69

[8] 于金霞,蔡自兴,段琢华. 基于粒子滤波的移动机器人定位关键技术研究综述[J]. 计算机应用研究, 2007, 24(11): 9-14

[9] Bolic M, Djuric P, Hong Sang-jin. New resampling algorithms for particle filters[C]// Proceedings of the 2003 International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. HongKong: IEEE Press, 2003: 589-592

[10] Yu Jin-xia, Tang Yong-li, Liu Wen-jing. Research on diversity measure in particle filter[C]// Proceedings of the International Conference on Intelligence Computation Technology and Automation. Changsha: IEEE Press, 2010: 1146-1149

[11] 谌剑,严平,张静远. 权值优化组合粒子滤波算法研究[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(24): 33-35, 39

(上接第 225 页)

参 考 文 献

[1] Johnson D, Perkins C. Mobility Support in IPv6[S]. RFC 3775. Arkko J, 2004

[2] 李斌,李文锋. WSN 与 RFID 技术的融合研究[J]. 计算机应用, 2008, 34(9): 127-129

[3] ZigBee Specification 2007[S]. ZigBee Standards Organization

[4] 刘克恒. 结合 GPRS/GSM 技术的 WSN 组网策略[J]. 计算机工程与设计, 2010, 31(17): 3785-3789

[5] 王鸿磊. 基于 WSN 和 GPRS 的嵌入式远程监测系统的设计[J]. 通信与信息处理, 2010, 29(3): 44-48

[6] 马小强. 基于 ZigBee 和 GPRS 的管道监测网络设计[J]. 计算机工程, 2010, 36(5): 128-132

[7] Samsung Semiconductor. S3C2440 32-Bit RISC Microprocessor [M]. Samsung, 2007

[8] Texas Instruments. CC253x System-on-Chip Solution for 2.4 GHz IEEE 802.15.4 and ZigBee Applications[S]. Texas Instruments, 2009

[9] 董婷. 传感器网络中基于层次分析法的自适应路由算法[J]. 计算机工程, 2007, 33(18): 139-143

[10] IEEE802.15.4, Part15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physica Layer(PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks(LR-WPANs)