



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102740396 B

(45) 授权公告日 2014. 12. 03

(21) 申请号 201210212235. 8

(22) 申请日 2012. 06. 26

(73) 专利权人 河海大学

地址 210098 江苏省南京市鼓楼区西康路 1 号

(72) 发明人 严锡君 孙桐 严妍 孟祥薇 余敏 王玲玲 卜旸

(74) 专利代理机构 南京经纬专利商标代理有限公司 32200

代理人 艾中兰

(51) Int. Cl.

H04W 40/10 (2009. 01)

H04L 29/08 (2006. 01)

H04W 84/18 (2009. 01)

G08C 17/02 (2006. 01)

(56) 对比文件

CN 102413180 A, 2012. 04. 11,

CN 101789168 A, 2010. 07. 28,

CN 101762624 A, 2010. 06. 30,

CN 201270526 Y, 2009. 07. 08,
CN 201269767 Y, 2009. 07. 08,
CN 2154470 Y, 1994. 01. 26,
CN 201417502 Y, 2010. 03. 03,
CN 102209400 A, 2011. 10. 05,
CN 101936795 A, 2011. 01. 05,
严锡君 王志坚. 水情自动测报系统的实现与研究. 《开发应用 微电脑应用》. 2003, 第 19 卷 (第 5 期), 全文.
yan xijun lulimei xu lizhong. The Application of wireless Sensor Network In the Irrigation Area Automatic System. 《2009 International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing》. 2009, 第 1-4 页.

审查员 李艳妮

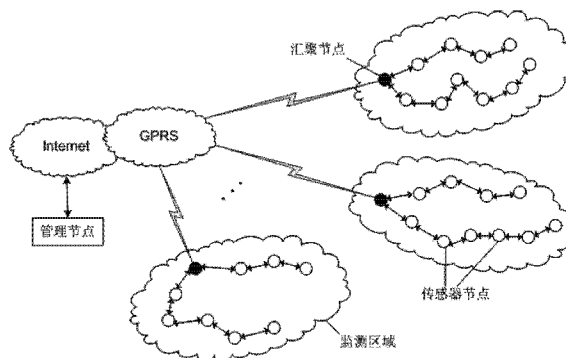
权利要求书1页 说明书13页 附图7页

(54) 发明名称

水情监测无线传感器网络

(57) 摘要

本发明公开一种水情监测无线传感器网络及其节点部署方法,所述无线传感器网络采用双链式拓扑结构,包括信息管理中心、汇聚节点及部署在汇聚节点附近、以多跳的方式与汇聚节点交换信息的雨量传感器节点、水位传感器节点和闸位传感器节点。所述节点部署方法根据能量消耗来确定节点部署位置,采用不等间距的优化间隔双链结构部署传感器节点和汇聚节点,以平衡每个传感器节点的能量消耗,避免了离汇聚节点越近的传感器节点越早“死亡”的现象,大大地优化了网络中节点的能量消耗,使得网络中各区域的传感器节点尽可能同时消耗完自身的能量,从而有效地延长整个网络的生命期,并提高可靠性,达到减少维护的目的。



CN 102740396 B

1. 一种水情监测无线传感器网络,包括信息管理中心、汇聚节点和以多跳的方式与汇聚节点交换信息的多个传感器节点,传感器节点负责采集现场信息并进行处理获得有效数据,再将有效数据通过无线通信方式发送给汇聚节点;汇聚节点连接无线传感器网络和外部网络,对传感器节点发送来的数据进行分析,并将分析结果通过 GPRS 网络发送给信息管理中心,其特征在于传感器节点按优化间隔部署,汇聚节点设置在与其交换信息的所有传感器节点的中间,形成不等间距的优化间隔双链式结构,优化间隔的计算公式如下:

$$d_i = \frac{r}{\left((n-i+1) \sum_{j=1}^n \frac{1}{j} \right)^{\frac{1}{\beta-1}}}$$

其中, d_i 为单链路中第 i 个传感器节点到汇聚节点的距离, n 为单链路中传感器节点个数, r 为单链路中第 n 个传感器节点到汇聚节点的距离, β 是路径损耗常数。

2. 根据权利要求 1 所述的水情监测无线传感器网络,其特征在于汇聚节点由第一电源电路 (8)、串行接口电路 (9)、第一单片机电路 (10) 和第一射频电路 (11) 组成;第一电源电路 (8) 的电源输出端分别接串行接口电路 (9)、第一单片机电路 (10) 和第一射频电路 (11) 的电源输入端;串行接口电路 (9) 和第一射频电路 (11) 分别与第一单片机电路 (10) 连接。

3. 根据权利要求 1 所述的水情监测无线传感器网络,其特征在于多个传感器节点至少包括水位传感器节点和闸位传感器节点,水位/闸位传感器节点由第二电源电路 (12)、第二接口电路 (13)、第二单片机电路 (14) 和第二射频电路 (15) 组成;第二电源电路 (12) 的电源输出端分别接接口电路 (13)、第二单片机电路 (14) 和第二射频电路 (15) 的电源输入端;第二接口电路 (13) 和第二射频电路 (15) 分别与第二单片机电路 (14) 连接。

4. 根据权利要求 1 所述的水情监测无线传感器网络,其特征在于多个传感器节点至少包括雨量传感器节点,雨量传感器节点由第三电源电路 (16)、第三接口电路 (17)、第三单片机电路 (18) 和第三射频电路 (19) 组成,第三电源电路 (16) 的电源输出端分别接雨量接口电路 (17)、第三单片机电路 (18) 和第三射频电路 (19) 的电源输入端;第三接口电路 (17) 和第三射频电路 (19) 分别与第三单片机电路 (18) 连接。

水情监测无线传感器网络

技术领域

[0001] 本发明公开了一种水情监测无线传感器网络及其节点部署方法,属于无线传感器网络和电子测控领域。

背景技术

[0002] 随着我国经济建设的发展,水文的预报和水资源的管理在国民经济中的地位越来越重要:水情自动测报系统能够实时地测量并向信息中心上报雨量等水情数据,为水利部门提供大量的水文数据,为防洪防汛、防灾减灾提供准确的、科学的数据,发挥了重要作用。目前,我国许多水情监测预报大多采用超短波传输的方法,该方法存在着建设成本高等问题,采用先进科技手段对现有的水情监测管理进行系统改造已势在必行。

[0003] 随着无线传感器网络技术的发展,因其具有通信便利、部署方便的优点,而得到了广泛的应用。将无线传感器网络应用到水情监测系统中,构建面向水情监测的无线传感器网络,无线传输方式能够有效地工作于偏远、复杂地区,解决水情监测中难以克服的环境复杂、偏远等问题。

[0004] 水情监测系统以对水位/闸位和雨量信息自动化监测为基础,融合计算机、现代通讯、人工智能、数据库等技术,对水情信息进行自动采集、传输和处理,从而实现节水、防污、提高水资源利用效率和最终实现水资源的可持续利用。

[0005] 对于中型流域监测网络,涵闸一般有几个~十几个闸孔,闸位传感器位于闸站站房内,距离汇聚节点较远的闸位传感器节点通过较近的闸位传感器节点路由,以多跳的方式与汇聚节点交换数据;雨量传感器位于站房周围,距离一般在几十米范围内,雨量传感器节点以一跳的方式或通过其他节点与汇聚节点交换信息;水位传感器一般位于闸站的一侧,通常不能以一跳的方式与汇聚节点交换数据,必须通过若干个闸位传感器节点路由,以多跳的方式与汇聚节点交换数据。这样,水位传感器节点、闸位传感器节点和雨量传感器节点依次连接成一条链,组成 WSN 的链型结构。

发明内容

[0006] 技术问题:传统的水情系统信息采集多采用有线方式,布线复杂,决定了传感器的放置位置不能太远,线路还可能遭受意外损坏,扩展不方便,安装维护成本高。同时,当需要增加测量参数时,往往需要对数据采集器硬件和软件进行修改,系统的扩展性较差,使用不方便。本发明将无线传感器网络技术应用于水情监测系统,构建水情监测无线传感器,以无线传输方式代替有线传输方式,可降低安装和维护成本,提高系统可靠性和扩展性。

[0007] 目前,在实际应用中构建网络时,节点的部署很少采用科学的部署策略或算法,带有一定的随意性。大多采用单链式结构,这样就造成传感器节点能量的不均衡消耗。传感器节点向汇聚节点传输数据时,通常要通过中间节点路由,离汇聚节点越近的传感器节点,需转发的数据也越多,因而会消耗更多的能量,因此汇聚节点附近的传感器节点能量将很快耗尽而“死亡”,汇聚节点也就无法收集数据,严重影响了网络的生命周期。

[0008] 合理地布置传感器节点和汇聚节点,能够均衡能量、延长网络寿命,减少维护工作量。

[0009] 技术方案:本发明的首要目的在于克服现有水情监测系统的上述缺陷,提出一种水情监测无线传感器网络,采用如下技术方案:

[0010] 一种水情监测无线传感器网络,包括信息管理中心、汇聚节点和以多跳的方式与汇聚节点交换信息的多个传感器节点,传感器节点负责采集现场信息并进行处理获得有效数据,再将有效数据通过无线通信方式发送给汇聚节点;汇聚节点连接无线传感器网络和外部网络,对传感器节点发送来的数据进行分析,并将分析结果通过 GPRS 网络发送给信息管理中心,其特征在于传感器节点按优化间隔部署,汇聚节点设置在与其交换信息的所有传感器节点的中间,形成不等间距的优化间隔双链式结构,优化间隔的计算公式如下:

$$d_i = \frac{r}{\left((n-i+1) \sum_{i=1}^n \frac{1}{i} \right)^{\frac{1}{\beta-1}}}$$

[0011]

[0012] 其中, d_i 为单链路中第 i 个传感器节点到汇聚节点的距离, n 为单链路中传感器节点个数, r 为单链路中第 n 个传感器节点到汇聚节点的距离, β 是路径损耗常数。

[0013] 本发明在部署网络时,采用双链式拓扑结构,根据能量消耗来部署节点位置,采用不等间距的优化间隔方法部署传感器节点和汇聚节点。在节点不等间距排列下,根据各个节点的能量消耗,提供计算公式计算出链式模型的优化间隔,节点根据优化间隔部署可以均衡各节点的能量消耗,延长整个网络的寿命。在优化间隔双链式结构中,传感器节点按照优化间隔排列的方法进行部署,在此基础上,将汇聚节点设置于所有传感器节点的中间,形成优化间隔双链式结构。

[0014] 有益效果:水情监测无线传感器网络具有一般无线传感器网络的特点外,具有自身节点可部署、汇聚节点能量不限、网络生命周期长等特点。

[0015] 水情监测无线传感器网络实现了水域雨量、水位和闸位信息的自动采集、传输、显示、存储和处理,提高了水情管理效率;提高了水的利用率,实现节约用水的目的;对发展水利经济,有效的提高水资源利用率,建设良好的生态环境和最终实现水资源的可持续利用可产生积极的作用。

[0016] 本发明提出的不等间距优化间隔的部署方法,根据通信距离、传感器节点个数及节点能耗,计算出链式模型的优化间隔,采用双链式结构对传感器节点及汇聚节点进行部署,避免了离汇聚节点越近的传感器节点越早“死亡”的现象,大大地优化了网络中节点的能量消耗,使得网络中各区域的传感器节点尽可能同时消耗完自身的能量,从而有效地延长整个网络的生命期,并提高可靠性,达到减少维护的目的。

附图说明

[0017] 图 1 是本发明的无线传感器网络体系结构。

[0018] 图 2 是本发明的节点部署说明图。

[0019] 图 3 是本发明的无线传感器网络功能说明图。

[0020] 图 4 是本发明的汇聚节点结构图。

[0021] 图 5 是本发明的汇聚节点硬件电路图。

- [0022] 图 6 是本发明的水位 / 闸位节点结构图。
- [0023] 图 7 是本发明的水位 / 闸位节点硬件电路图。
- [0024] 图 8 是本发明的雨量节点结构图。
- [0025] 图 9 是本发明的雨量节点硬件电路图。
- [0026] 图 10 是传感器节点等间距的链式多跳模型图。
- [0027] 图 11 是传感器节点的等间距和优化间距的链式模型图。
- [0028] 图 12 是传感器节点的等间距和优化间距的链式模型的多跳每个节点的能耗对比。
- [0029] 图 13 是传感器节点的等间距和优化间距的链式模型的多跳系统能耗对比。
- [0030] 图 14 是等间距双链式多跳模型图。
- [0031] 图 15 是不等间距优化间隔双链式多跳模型图。

具体实施方式

[0032] 下面结合附图对本发明做进一步详细阐述：

[0033] 如图 1 所示,本发明的水情监测无线传感器网络采用不等间距的优化间隔双链式拓扑结构,包括信息管理中心、汇聚节点和以多跳的方式与汇聚节点交换信息的多个传感器节点,传感器节点负责采集现场信息并进行处理获得有效数据,再将有效数据通过无线通信方式发送给汇聚节点;汇聚节点连接无线传感器网络和外部网络,对传感器节点发送来的数据进行分析,并将分析结果通过 GPRS 网络发送给信息管理中心;信息管理中心根据接收到的数据判断传感器节点的工作状态,并采取相应措施。

[0034] 其中,信息管理中心服务器上运行管理软件,负责接收汇聚节点通过 GPRS 网络上上传的传感器节点工作状态数据。当上传数据显示有节点工作失常,或者“死亡”时,应能及时采取相应措施。

[0035] 汇聚节点的处理能力、存储能力和通信能力比较强,它连接传感器网络与外部网络,把收集到的数据转发到外部网络上。它通过 CC2420 射频模块与传感器节点交换数据,同时通过 GPRS 模块通过 Internet 和信息中心交换数据。

[0036] 汇聚节点的软件主要由看门狗初始化、CC2420 初始化和数据传输三部分组成。系统上电完成初始化工作后,微处理器立即进入发送模式,向传感器节点发送同步信标帧和确认帧,然后进入接收模式,按时隙接收不同传感器节点发送过来的数据帧。若接收到实时数据,则通过串口将该数据传送给 GPRS 模块,经 GPRS 网络和 Internet 网传送给信息中心,也即管理节点。在完成一个周期的处理后,进入下一个周期,不断循环,实现网络的功能。

[0037] 本发明的传感器节点由传感器模块、处理器模块、无线通信模块和能量供应模块组成。传感器模块通常包括传感器和信息获取接口电路,将获取的信息送给处理器模块处理;处理器模块负责控制整个传感器节点的操作,存储和处理本身采集的数据以及其他节点发来的数据;无线通信模块负责与其他传感器节点进行无线通信,交换控制消息和收发采集数据;能量供应模块为传感器节点各部分提供运行所需能量,通常采用微型电池,如普通电池和太阳能电池等。在水情监测的无线传感器网络中主要包括闸位传感器节点、水位传感器节点和雨量传感器节点。

[0038] 在水位 / 闸位传感器节点中常用的传感器有光电式编码器、机械式编码器等, 采用格雷码、变形码等编码方式, 大多采用并行方式输出编码值。MSP430F149 通过内部 I/O 口读入传感器数据, 进行处理后, 通过射频模块 CC2420 发送。同时在测量河流、水库的水位时, 由于船的航行等原因, 水面会产生波浪, 这会使得水位采集产生误差, 因此, 水位 / 闸位节点必须有消浪的功能, 提高数据的准确性。

[0039] 雨量传感器节点的雨量传感器通常采用型翻斗式雨量计, 分辨率大多为 1 厘米。当有降雨时, 其内部两个轮流储雨的翻斗带动光电转换器, 产生一个通断脉冲信号, 即为一个雨量, 用微处理器 MSP430F149 对该脉冲信号进行记录、处理, 就可得到实时雨量值, 然后通过射频模块 CC2420 发送。

[0040] 在雨量采样电路中, 有可能产生干扰, 可根据当地的最大雨强用定时器来进行消除干扰。电路中采用了 RC 滤波电路, 并将雨量脉冲锁存到锁存中, 用查询或中断的方式采集雨量信号。由于发生降雨的总时间不长, 节点大部分时间处在掉电工作方式, 掉电工作电流仅需 18uA, 干电池供电可工作很长时间。

[0041] 本发明的传感器网络的节点部署方法采用双链式拓扑结构, 根据能量消耗来确定节点的放置位置, 采用不等间距的优化间隔方法部署传感器节点和汇聚节点。

[0042] 在单链式模型下, 不等间距排列时, 根据各个节点的能量消耗, 提供计算公式计算出单链式模型的优化间隔, 节点根据优化间隔部署可以均衡各节点的能量消耗, 延长整个网络的寿命。在优化间隔双链式结构中, 传感器节点按照优化间隔排列的方法进行部署, 在此基础上, 将汇聚节点处于传感器节点的中间, 形成不等间距的优化间隔双链式结构。该部署方法如图 2 所示。

[0043] 该无线传感器网络的功能说明图如图 3 所示, 传感器节点包括水位传感器节点 3, 闸位传感器节点 5, 雨量传感器节点 7, 传感器节点的传感器模块采集相应的现场信息 (如水位, 闸位, 雨量等), 然后将采集到的信息经过传感器节点的处理模块进行处理获得有效数据, 将有效数据通过传感器节点的无线通信模块发送给无线传感器网络的汇聚节点 2, 汇聚节点 2 的处理模块将无线接收模块接受的数据进行分析, 将其分析结果通过 GPRS 网络发送给信息中心 1, 当接收到的传感器节点工作状态数据显示有节点工作失常, 或者“死亡”时, 应能及时采取相应措施。该无线传感器网络的节点部署方法是根据能量消耗来确定放置的方式部署节点, 基本思想为: 传感器节点采用优化间隔排列, 根据各节点能量计算出优化间隔值, 再根据该值进行布置; 汇聚节点采用优化间隔双链式结构, 即汇聚节点处于传感器节点的中间, 形成双链式结构。

[0044] 1. 水情监测系统汇聚节点

[0045] 本发明的水情监测无线传感器网络汇聚节点的结构如图 4 所示, 第一电源电路的输出端 分别接串行接口电路、第一单片机电路和第一射频电路的电源输入端, 串行接口电路和第一射频电路分别与第一单片机电路 10 连接。

[0046] 本发明的水情监测无线传感器网络汇聚节点的硬件电路如图 5 所示, 汇聚节点的主控制器采用高性能 ARM 处理器 LM3S6918, 其中第一电源电路的输出 3.3V 对其进行供电, 串行接口电路中的串行口收发器 SP3223EEA 的输出端 R1OUT 与第一单片机电路的 LM3S6918 的输入端 PD2 端口连接, 串行接口电路中的串行口收发器 SP3223EEA 的输入端 T1IN 与第一单片机电路 10 的 LM3S6918 的输出端 PD3 端口连接, 串行接口电路的 SP3223EEA 的 R1IN 和

T10UT 端口与 GPRS 模块的串口进行连接,第一单片机电路 10 的 LM3S6918 的端口 PC7、PC6、PC5、PC4、PA3、PA2、PA5、PA4、PB3 和 PB2 分别与第一射频电路 11 中的射频芯片 CC2420 的端口 FIFO、FIFOP、CCA、SFD、CSN、SCLK、SI、S0、RESETN 和 VREG_EN 连接。第一射频电路中还包括电容 C2, C3, C4, C5 组成的滤波电路,电容 C12, C13, C14 组成的滤波电路, R_BIAS 管脚接 43K 欧姆的电阻,由晶振 XTAL_2, 电容 C19 和 C20 组成的时钟电路,由电感 L1, L2, L3 和电容 C9, C15, C17, C18 组成的发送 \ 接收路径与天线连接。

[0047] 水情监测的无线传感器网络的汇聚节点模块使用交流电供电,采用高性能的 ARM 处理器技术,射频技术和无线传感器网络技术。采用高性能的 AC/DC 变换模块产生工作电源,用串口收发器 SP3223EEA 构成 RS232 串口并通过 GPRS 实现与信息中心的数据交换,射频芯片 CC2420 通过天线接受传感器节点发送过来的数据,用嵌入式微处理器 LM3S6918 接收 CC2420 发送过来的数据,并及时通过 RS232 串口和 GPRS 将数据发送出去。

[0048] 2. 水情监测系统传感器节点

[0049] 2.1 水位传感器节点

[0050] 本发明的水位传感器节点的结构如图 6 所示,第二电源电路的输出端分别接第二接口电路、第二单片机电路和第二射频电路的电源输入端,第二接口电路和第二射频电路 15 分别和第二单片机电路连接。

[0051] 本发明的水位传感器节点的电路如图 7 所示,第二接口电路中的水位传感器 X24J19A 的 16 位并行输出端口分别连接第一缓冲器 74HC20 和第二缓冲器 74HC20,第一缓冲器 74HC20 的输出端 1Y1, 1Y2, 1Y3, 1Y4, 2Y1, 2Y2, 2Y3, 2Y4 与第二单片机电路的 MSP430F149 的 P1. 0, P1. 1, P1. 2, P1. 3, P1. 4, P1. 5, P1. 6, P1. 7, 第二缓冲器 74HC20 的输出端 1Y1, 1Y2, 1Y3, 1Y4, 2Y1, 2Y2, 2Y3, 2Y4 与第二单片机电路的 MSP430F149 的 P6. 0, P6. 1, P6. 2, P6. 3, P6. 4, P6. 5, P6. 6, P6. 7 连接,第二单片机电路的 MSP430F149 的端口 P2. 0、P2. 3、P2. 1、P2. 2、P5. 0、P5. 3、P5. 1、P5. 2、P2. 5 和 P2. 4 分别与第二射频电路中的射频芯片 CC2420 的端口 FIFO、FIFOP、CCA、SFD、CSN、SCLK、SI、S0、RESETN 和 VREG_EN 连接。第二射频电路 15 中还包含电容 C102, C103, C104, C105 组成的滤波电路,电容 C112, C113, C114 组成的滤波电路, R_BIAS 管脚接 43K 欧姆的电阻,由晶振 XTAL_2, 电容 C119 和 C120 组成的时钟电路,由电感 L101, L102, L103 和电容 C109, C115, C117, C118 组成的发送 / 接收路径与天线连接。

[0052] 本发明的水位传感器节点模块使用干电池供电,采用高性能的单片机技术,射频技术和无线传感器网络技术。采用 3 节 5 号可充电电池供电,用水位传感器 X24J19A 连接两片缓冲器 74HC04 组成第二接口电路,采用 MSP430F149 处理器监测,采集和处理水位信号,并将处理后的水位数据输出给射频芯片 CC2420,射频芯片通过无线方式将信息发送给汇聚节点。

[0053] 2.2 雨量传感器节点:

[0054] 本发明的雨量传感器节点的结构如图 8 所示,第三电源电路的输出端分别接第三接口电路、第三单片机电路和第三射频电路的电源输入端,第三接口电路和第三射频电路分别与第三单片机电路连接。

[0055] 本发明的雨量传感器节点的电路如图 9 所示,雨量传感器 DY1090A 与第三接口电路中的反相器 U204 (74HC04) 的输入端连接,反相器 U204 的输出端与锁存器 U203 (74HC74)

的 CLK 端连接,锁存器 U203 的 CD 输入端和 /Q 输出端与第三单片机电路 MSP430F149 的 P6.0 输出端和 P6.1 输入端口连接,完成对雨量信息的采集,微控制器 MSP430F149 的端口 P2.0、P2.3、P2.1、P2.2、P5.0、P5.3、P5.1、P5.2、P2.5 和 P2.4 分别与第三射频电路中的射频芯片 CC2420 的端口 FIFO、FIFO、CCA、SFD、CSN、SCLK、SI、SO、RESETN 和 VREG_EN 连接。射频电路 4 中还包含电容 C202, C203, C204, C205 组成的滤波电路,电容 C212, C213, C214 组成的滤波电路,R_BIAS 管脚接 43K 欧姆的电阻,由晶振 XTAL_2,电容 C219 和 C220 组成的时钟电路,由电感 L201, L202, L203 和电容 C209, C215, C217, C218 组成的发送 \ 接收路径与天线连接。

[0056] 本发明的雨量传感器节点模块使用干电池供电,采用高性能的单片机技术,射频技术和无线传感器网络技术。采用 3 节 5 号可充电电池供电,用雨量传感器 DY1090A 连接反相器和锁存器组成第三接口电路,采用 MSP430F149 处理器监测,采集和处理水位信号,并将处理后的雨量数据输出给射频芯片 CC2420,射频芯片通过无线方式将信息发送给汇聚节点

[0057] 3. 部署方法

[0058] 本发明的节点部署方法双链式拓扑结构,根据能量消耗来确定节点的放置位置,采用等间距方法或不等间距的优化间隔方法部署传感器节点和汇聚节点。节点部署需要通过计算其能量消耗来确定合理部署,再通过汇聚节点的部署,使传感器节点均匀分布在汇聚节点周围,减少传输距离,增加离汇聚节点近的传感器节点数,使得网络中各区域的传感器节点尽可能同时消耗完自身的能量,从而有效地延长整个系统的生命期,并提高可靠性。

[0059] 3.1 能量模型

[0060] 在水情监测无线传感器网络中,能量消耗主要是信息传输单元,它包括信息的接收、发送和启动收发能量消耗,传感器节点定时从睡眠状态中唤醒,当检测到有数据需要发送时,要启动传感器发送模块,相应的路由节点要启动接收模块,当数据包较短时,启动能量也是主要的能量消耗来源。节点的能量消耗模型如下:

[0061] 单跳状态下,每位的能量消耗 (e_b) 为:

$$[0062] \quad e_b = e_{tx} + e_{rx} + \frac{E_{st} + E_{sr}}{l} \quad (3-1)$$

$$[0063] \quad e_{tx} = e_{te} + e_{ta} d^\beta \quad (3-2)$$

[0064] 这里, e_{tx} 和 e_{rx} 分别表示发送和接收一位数据的能耗, E_{st} 和 E_{sr} 分别是发送启动能量和接收启动能量, l 是所要发送数据的长度, e_{te} 是发送一位数据发送电路的能量消耗, e_{ta} 是成功发送一位数据通过一米距离的能耗, d 是发送端到接收端的距离,即单跳的通信距离, β 是路径损耗常数,它与传输环境有关,通常取 $\beta = 2, 3$ 。而其它能量在水情监测无线传感器网络中可忽略不计,本发明以此能耗模型来分析。

[0065] 3.2 传感器节点的优化部署

[0066] 水情监测无线传感器网络具有链式结构,研究其传感器节点的优化部署,就是研究在链式模型下,节点等间距排列时,针对不同的负载,分析每位能耗、能量效率、系统能耗与传输距离、跳数之间的关系,在系统最小化能耗下,找出节点的最优单跳距离。在不等间距排列下,均衡各个节点的能量消耗,找出一组最优不等距离。

[0067] 1. 等间距链式结构能耗分析

[0068] 在多跳网络环境下, n 个普通节点等间距线性排列, 一个汇聚节点 (sink 节点) 能量不受限制, 只有 sink 节点收集数据, 最远节点到汇聚节点的距离为 r 米, 多个传感器节点采集数据经多跳的方式传输数据到汇聚节点。等间距链式无线通信模型如图 10 所示:

[0069] 针对图 10 所示的链式模型, 每个有效数据位经 n 跳到达 sink 节点的能耗为:

$$[0070] \quad e_{bm} = (n(e_{te} + e_{ta}(r/n)^\beta) + (n-1)e_{rx})(1 + \frac{\alpha}{l}) + \frac{nE_{st} + (n-1)E_{sr}}{l + \alpha} \quad (3-3)$$

[0071] 其中, α 是数据包的包头长度。

[0072] 在多跳的网络环境中, 数据包经 n 跳到达 sink 节点, 设包的误码率是为 PER, 能量效率为 η :

$$[0073] \quad \eta = \frac{l(n(e_{te} + e_{ta}(r/n)^\beta) + (n-1)e_{rx})}{k(n(e_{te} + e_{ta}(r/n)^\beta) + (n-1)e_{rx}) + nE_{st} + (n-1)E_{sr}} * (1 - PER)^n \quad (3-4)$$

[0074] 其中 $k = \alpha + 1$, 是数据包的长度。

[0075] 利用同样的网络拓扑结构, n 个节点等间距排列, 假设只有节点 n 有一个数据包需经过多跳到达 sink 节点, 每跳的通信距离相等都为 d , 对于 n 个节点来说, 共发送 n 次, 接收 $n-1$ 次, 整个系统的能量消耗为:

$$[0076] \quad \begin{aligned} E_{MH} &= k(n(e_{te} + e_{ta}d^\beta) + (n-1)e_{rx}) + nE_{st} + (n-1)E_{sr} \\ &= n(k(e_{te} + e_{ta}d^\beta) + E_{st}) + (n-1)(ke_{rx} + E_{sr}) \end{aligned} \quad (3-5)$$

[0077] 在实际应用中, 监测到事件的可能是多个节点, 都需要发送信息到汇聚节点, 利用图 10 的网络拓扑结构, 假设所有节点都有一个数据包需经过多跳到达 sink 节点, 整个系统的能量消耗为:

$$[0078] \quad E_{MH}^{all} = \frac{n(n+1)}{2}(k(e_{te} + e_{ta}d^\beta) + E_{st}) + \frac{n(n-1)}{2}(ke_{rx} + E_{sr}) \quad (3-6)$$

[0079] 在同样的网络拓扑模型下, 假设所有节点都有一个数据包需经过单跳到达节点, 整个系统的能量消耗为:

$$[0080] \quad E_{SH}^{all} = \sum_{i=1}^n (k(e_{te} + e_{ta}(id)^\beta) + E_{st}) \quad (3-7)$$

[0081] 在图 10 的网络拓扑模型下, 每个传感器等间距排列, 固定不变, 假设只有节点 n 有一个数据包需经过多跳到达节点, 为了找出最优的单跳距离, 设单跳距离为 d_{1hop} , 整个系统的能量消耗由公式 3-5 变化为:

$$[0082] \quad E_{MH} = \text{ceil}(\frac{r}{d_{1hop}})(k(e_{te} + e_{ta}d_{1hop}^\beta) + E_{st}) + (\text{ceil}(\frac{r}{d_{1hop}}) - 1)(ke_{rx} + E_{sr}) \quad (3-8)$$

[0083] 在公式 (3-8) 中, $\text{ceil}()$ 是取整函数, 为求最优的 d_{1hop} , 对 (3-8) 求对 d_{1hop} 的导数,

令 $\frac{\partial E_{MH}}{\partial d_{1hop}} = 0$, 即得:

$$[0084] \quad d_{o.thop} = \sqrt[\beta]{\frac{ke_{ie} + E_{st} + ke_{rx} + E_{sr}}{(\beta-1)ke_{ta}}} \quad (3-9)$$

[0085] 由 (3-9) 式可知,单数据源传输时,节点最优的单跳距离与源节点到节点的总距离 r 无关,它仅仅依赖于传输的数据包长度、物理电路特性及信道损耗。

[0086] 因为优化的单跳距离与数据源与节点的距离 r 无关,对于任意的距离,根据 (3-9) 式在特定的应用环境下,计算出最优的单跳距离,每相隔该优化单跳距离设置一个传感器节点,这样设置的线性拓扑网络,当只有离最远的节点有数据发送时,能量消耗最小。同理,当只有离次远的节点有数据发送时,能量消耗也最小,依次类推,在如此优化的网络拓扑结构中,在每一个节点都有一个数据包需要发送的多数据源传输时,整个系统消耗的能量最低。

[0087] 2. 节点优化间隔排列能耗分析

[0088] 在节点等间距排列的链式模型下,在通信距离较远时,采用多跳可使能耗较小,但多跳在通信过程中,每个节点的能耗不一样,由于中间的节点除发送自己的数据包外,还要路由其它节点的数据包。因此,离汇聚节点越近的节点,中继的数据包越多,消耗的能量就越多,该节点将很快因能量耗尽而“死亡”,从而减少整个网络系统的寿命。采用不等间距部署,离汇聚节点越近的节点间距越小,每跳传输能耗越低,从而平衡所有节点的能耗。下面分析在链式模型下节点个数和通信距离都一定的情况下,节点间距 d_i 的分布问题,如何确定 d_i ,使系统各节点的能耗均衡。不等间距排列的线性模型如图 11 所示,图中可见,各间隔分别表示 $d_1, d_2, d_3, \dots, d_n$,若每个节点都有一个数据包需要发送经多跳到达网关,则整个系统的能耗为:

$$[0089] \quad E_{linear}^{all} = \frac{n(n+1)}{2}(ke_{ie} + E_{st}) + \frac{n(n-1)}{2}(ke_{rx} + E_{sr}) + ke_{ta} \sum_{i=1}^n ((n-i+1)d_i^\beta) \quad (3-10)$$

[0090] 因为模型的通信距离固定,所以有总距离的限制条件为:

$$[0091] \quad \sum_{i=1}^n d_i = r \quad (3-11)$$

[0092] 考察 (3-10) 式和 (3-11) 式,当 n, r 一定的情况下, (3-10) 式前两个和项是固定值,第三个和项是变化的,它引起 E_{linear}^{all} 的变化,但 E_{linear}^{all} 在有限闭区间内总存在最小值,对应一组最优的 d_i 值。对第三项求偏导,并考虑各节点能耗均衡,即得:

$$[0093] \quad d_i = \left(\frac{\lambda}{ke_{ta}\beta(n-i+1)} \right)^{\frac{1}{\beta-1}} \quad (3-12)$$

[0094] 其中, $\lambda = \frac{\partial E_{linear}^{all}}{\partial d_i} / \frac{\partial E_{linear}^{all}}{\partial d_i}$,将 (3-12) 式代入约束条件 (3-11) 式,可得:

$$[0095] \quad \lambda = \frac{ke_{ta}\beta r^{\beta-1}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{i}} \quad (3-13)$$

[0096] 将 (3-13) 式代入 (3-12),则:

$$d_i = \frac{r}{\left((n-i+1) \sum_{i=1}^n \frac{1}{i} \right)^{\frac{1}{\beta-1}}} \quad (3-14)$$

[0098] 令 $\beta = 2$, 则 :

$$d_i = \frac{r}{(n-i+1) \sum_{i=1}^n \frac{1}{i}}$$

[0100] 令 $\beta = 3$, 则 :

$$d_i = \frac{r}{\sqrt{(n-i+1) \sum_{i=1}^n \frac{1}{i}}}$$

[0102] 在图 11 所示的等间距线性模型下, 当所有节点都有一个数据包需要发送时, 数据包经多跳到达 sink 节点, 每个节点的能耗和整个系统的能耗分别为 :

[0103]

$$E_{MH}^s = (n-i+1)(k(e_{te} + e_{ta} \left(\frac{r}{n}\right)^\beta) + E_{st}) + (n-i)(ke_{rx} + E_{sr}) \quad (3-15)$$

[0104]

$$E_{MH}^{all} = \frac{n(n+1)}{2}(k(e_{te} + e_{ta} \left(\frac{r}{n}\right)^\beta) + E_{st}) + \frac{n(n-1)}{2}(ke_{rx} + E_{sr}) \quad (3-16)$$

[0105] 在图 11 所示的优化间距线性模型下, 当所有节点都有一个数据包需要发送时, 数据包经多跳到达 sink 节点, 每个节点的能量消耗为 :

[0106]

$$E_{linear}^s = (n-i+1)(k(e_{te} + e_{ta} d_i^\beta) + E_{st}) + (n-i)(ke_{rx} + E_{sr}) \quad (3-17)$$

[0107] 此时整个系统的能量消耗为 :

[0108]

$$E_{linear}^{all} = \frac{n(n+1)}{2}(ke_{te} + E_{st}) + \frac{n(n-1)}{2}(ke_{rx} + E_{sr}) + ke_{ta} \sum_{i=1}^n ((n-i+1)d_i^\beta) \quad (3-18)$$

[0109] 将 (3-14) 式代入 (3-18) 式中, 化简可得 :

[0110]

$$E_{linear}^{all} = \frac{n(n+1)}{2}(ke_{te} + E_{st}) + \frac{n(n-1)}{2}(ke_{rx} + E_{sr}) + ke_{ta} \frac{r^2}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{i}} \quad (3-19)$$

[0111] 4. 节点优化间隔排列实验结果

[0112] 在上述两种线性模型下, 20 个传感器节点分布在 1000 米的线段上, 一种是等间距排列, 一种是优化间距排列, 每个节点都有一个数据包要发送, 经多跳到达 sink, 考察每个节点的能耗, 用 NS2 进行仿真, 实验结果如图 12 所示。

[0113] 可以看出, 在等间距排列下, 离 sink 近的节点能耗大, 离 sink 远的节点能耗小,

这是因为离 sink 节点越近,中继传输的数据包越多,在每跳距离相等的情况下,消耗能量越多;在优化间距排列下,每个节点的能耗变化不大,如从节点 1 到节点 18 的能耗变化不大,这是优化间距所达到的结果,但是节点 19、20 的能耗有明显的增加,这是因为根据公式(3-15),两节点的单跳距离增大很多,节点 19、20 的单跳距离传输能耗相对于其它能耗较大,占能耗的主要部分,节点能耗有较大变化。但这种情况只发生在离 sink 最远的两个节点上,实际规划时,可不使用最后 2 个传感器节点。

[0114] 由此可知,当增大通信距离 r 并且增多节点数 n ,节点采用优化间距排列可以达到平衡节点能耗,延长网络的生命周期。较远的两个节点可以通过增大电池容量或另外的措施来解决,这两个节点不中继别的数据包,对整个网络的影响很小。

[0115] 在两种等间距排列和优化间距排列的线性模型下,为了考察整个系统的能耗,进行如下实验:在距 sink 节点 1000 米的线段上,分别按两种线性模型放置不同的节点,每个节点都有一个数据包要发送,经多跳到达 sink,考察整个系统的能耗,实验结果如图 13 所示。

[0116] 由图 13 可以看出,等间距排列的能耗曲线总是在优化间距的能耗曲线之上,进一步可看到两种线性模型下,若放置相同的节点数,整个系统的能耗在等间距排列时比优化间距排列时大;从两条曲线上看,都存在一个最小值,但两者的能耗最小值处的节点数是不一样的。等间距排列时,当通信距离 r 为 1000 米时,节点数设置为 7、8 或 9 时能耗较小;在优化间距排列下,节点数设置为 10、11 或 12 时能耗较小,比等间距排列时,能耗降低 35% 左右。

[0117] 从两种实验结果可看出,(3-14) 式的优化间距是比较合理的,这样在无线传感器网络节点部署时,提出了一种机制,节点按优化间距放置,整个系统能耗较低,并且平衡了各节点的能耗,从而延长整个网络的寿命。

[0118] 3.3 汇聚节点的优化部署

[0119] 在传感器节点的优化部署中,基于单链式的结构分析了等间距链式结构和优化间隔排列,系统能耗与跳数、节点个数和距离之间的关系。在此基础上,对链式结构进行扩展,形成双链式的结构,即将汇聚节点位于传感器节点链路的中间点,对汇聚节点的部署进行优化,形成等间距双链式结构和不等间距优化间隔双链式结构,在与 2.2 节中相同的传感器节点个数情况下,分析系统的能量消耗。所形成的双链式结构,在实际应用中,对进行传感器节点和汇聚节点部署时,有一定的参考价值 and 实际意义。

[0120] 1. 等间距双链式结构能耗分析

[0121] 如图 14 所示, sink 节点处于传感器节点中间, n 个传感器节点等间距均匀排列 sink 节点的两端。其中, sink 节点能量不受限制,只有 sink 节点收集数据, sink 节点两端最远两个传感器节点之间的距离为 r ,最远传感器节点到 sink 节点的距离为 $r/2$ 米,一个或多个普通节点采集数据经多跳的方式传输数据到汇聚节点。

[0122] 根据 3.2 节的等间距的链式结构能耗分析可知,在双链结构中,每个数据位经 $n/2$ 跳到达 sink 节点的能耗为:

[0123]

$$e_{bm} = \left(\frac{n}{2} (e_{te} + e_{ta} \left(\frac{r}{n}\right)^\beta) + \left(\frac{n}{2} - 1\right) e_{rx} \right) \left(1 + \frac{\alpha}{l} \right) + \frac{\frac{n}{2} E_{st} + \left(\frac{n}{2} - 1\right) E_{sr}}{1 + \alpha} \quad (3-20)$$

[0124] 其中, n 在 (3-20) 式中为偶数, 当 n 为奇数时, 也可以为 n 进行加一后, 再计算, 也可以汇聚节点两边分布不完全对称。不失一般性以 n 为偶数来讨论分析。同时, 所有公式中其它参数所表示的含义与 3.2 节相同。

[0125] 在多跳环境中, 数据包经 $n/2$ 跳到达 sink 节点, 设包的误码率是 PER, 则能量效率为:

[0126]

$$\eta = \frac{l \left(\frac{n}{2} (e_{te} + e_{ta} (r/n)^\beta) + \left(\frac{n}{2} - 1\right) e_{rx} \right)}{k \left(\frac{n}{2} (e_{te} + e_{ta} (r/n)^\beta) + \left(\frac{n}{2} - 1\right) e_{rx} \right) + \frac{n}{2} E_{st} + \left(\frac{n}{2} - 1\right) E_{sr}} * (1 - PER)^{\frac{n}{2}} \quad (3-21)$$

[0127] 若假设节点只有一个数据包需经过 $n/2$ 跳到达 sink 节点, 每跳的通信距离相等都为 d , 对于 $n/2$ 个节点来说, 共发送 $n/2$ 次, 接收 $((n/2) - 1)$ 次, 整个系统的能量消耗为:

[0128]

$$E_{MH} = \frac{n}{2} (k(e_{te} + e_{ta} d^\beta) + E_{st}) + \left(\frac{n}{2} - 1\right) (k e_{rx} + E_{sr}) \quad (3-22)$$

[0129] 在双链中, 只有一链上所有节点向 sink 节点发送数据, 则系统的能耗为:

$$E_{MH}^{\frac{all}{2}} = \frac{\frac{n}{2} \left(\frac{n}{2} + 1\right)}{2} (k(e_{te} + e_{ta} d^\beta) + E_{st}) + \frac{\frac{n}{2} \left(\frac{n}{2} - 1\right)}{2} (k e_{rx} + E_{sr}) \quad (3-23)$$

[0131] 所以, 在双链结构中, 所有的传感器节点都有数据向 sink 节点发送, 是整个系统的能量消耗为:

[0132]

$$E_{MH}^{all} = 2 E_{MH}^{\frac{all}{2}} = \frac{n}{2} \left(\frac{n}{2} + 1\right) (k(e_{te} + e_{ta} d^\beta) + E_{st}) + \frac{n}{2} \left(\frac{n}{2} - 1\right) (k e_{rx} + E_{sr}) \quad (3-24)$$

[0133] 对于节点数目 n 相同的单链结构中, 当所有传感器节点都有数据发送到 sink 节点时, 整个系统的能量消耗为:

[0134]

$$E_{MH}^{all} = \frac{n(n+1)}{2} (k(e_{te} + e_{ta} d^\beta) + E_{st}) + \frac{n(n-1)}{2} (k e_{rx} + E_{sr}) \quad (3-25)$$

[0135] 比较 (3-24) 式和 (3-25) 式, 可知, 单链的系统能耗约为双链的两倍。同时, 双链结构中, 离 sink 节点的传感器节点有两个, 减轻了单链结构离 sink 节点的传感器节点的负担, 从而延长了网络的生命周期。

[0136] 双链结构是单链结构的扩展, 所有的能量分析原理都相同, 所以, 最佳的单跳距离与 3.2 节相同, 即为:

$$[0137] \quad d_{o.hop} = \sqrt[\beta]{\frac{ke_{te} + E_{st} + ke_{rx} + E_{sr}}{(\beta-1)ke_{ta}}} \quad (3-26)$$

[0138] 2. 节点优化间隔排列双链式结构能耗分析

[0139] 在前节中,为均衡各节点的能量消耗,对间距排列进行优化,延长了网络的使用寿命,在此基础上,对汇聚节点进行优化部署,将汇聚节点处于传感器节点的中间,形成双链式结构,如图所示。

[0140] 在图 15 所示的双链式模型下,各节点不等间距排列,各间隔分别表示 $d_1, d_2, d_3, \dots, d_{n/2}$,当所有节点都有一个数据包需要发送时,数据包经多跳到达 sink 节点,每个节点的能量消耗为:

[0141]

$$E_{linear}^s = \left(\frac{n}{2} - i + 1\right)(k(e_{te} + e_{ta}d_i^\beta) + E_{st}) + \left(\frac{n}{2} - i\right)(ke_{rx} + E_{sr}) \quad (3-27)$$

[0142] 若在双链结构中,只有一条链上每个节点都有一个数据包需要发送经多跳到达网关,则系统的能耗为:

[0143]

$$E_{linear}^{all/2} = \frac{\frac{n}{2}\left(\frac{n}{2} + 1\right)}{2}(ke_{te} + E_{st}) + \frac{\frac{n}{2}\left(\frac{n}{2} - 1\right)}{2}(ke_{rx} + E_{sr}) + ke_{ta} \sum_{i=1}^{n/2} \left(\left(\frac{n}{2} - i + 1\right)d_i^\beta\right) \quad (3-28)$$

[0144] 则在双链结构中,所有节点都有一个数据包需要发送经多跳到达网关,则系统的能耗为:

$$[0145] \quad E_{linear}^{all} = 2E_{linear}^{all/2}$$

[0146] 即:

$$E_{linear}^{all} = \frac{n}{2}\left(\frac{n}{2} + 1\right)(ke_{te} + E_{st}) + \frac{n}{2}\left(\frac{n}{2} - 1\right)(ke_{rx} + E_{sr}) + 2ke_{ta} \sum_{i=1}^{n/2} \left(\left(\frac{n}{2} - i + 1\right)d_i^\beta\right) \quad (3-29)$$

[0147] 由公式 (3-14) 可知,则:

$$[0148] \quad d_i = \frac{r/2}{\left(\left(\frac{n}{2} - i + 1\right) \sum_{i=1}^{n/2} \frac{1}{i}\right)^{\frac{1}{\beta-1}}} \quad (3-30)$$

[0149] 将 (3-30) 式代入 (3-29) 式中,化简可得时的系统总能耗:

[0150]

$$E_{linear}^{all} = \frac{n}{2} \left(\frac{n}{2} + 1 \right) (k e_{te} + E_{st}) + \frac{n}{2} \left(\frac{n}{2} - 1 \right) (k e_{rx} + E_{sr}) + 2k e_{ta} \sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} \left(\left(\frac{n}{2} - i + 1 \right) \frac{(r/2)^\beta}{\left(\left(\frac{n}{2} - i + 1 \right) \sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} \frac{1}{i} \right)^{\frac{\beta}{\beta-1}}} \right) \quad (3-31)$$

[0151] 将 (3-22) 式、(3-23) 式分别与 (3-19) 式相比, 整个系统的能耗也降低了近似一半, 而且也降低了每个节点的能耗, 延长了网络的使用寿命。

[0152] 上述双链式结构能耗分析中, n 为偶数, 当 n 为奇数时, 可将 n 加一后再计算, 也可视为不对称的两个单链来讨论。不失一般性, 以 n 为偶数来讨论分析, 所有公式中其它参数所表示的含义以及所以假设条件都与 3.2 节相同。

[0153] 由上可以看出, 在等间距情况下, 双链式结构比链式结构的能耗更小, 而且减少了每个传感器节点的能耗 (除了在链式结构中, 最后一个传感器节点), 既从单个传感器节点降低了功耗, 又从整体系统上降低了功耗, 在很大程度上减少了能耗, 大大延长了网络的使用寿命。

[0154] 在优化间距排列下情况下, 双链式结构比链式结构的能耗更小, 而且减少了每个传感器节点的能耗, 既降低了单个传感器节点的功耗, 又降低了整体系统功耗, 在很大程度上减少了网络的能耗, 大大延长了网络的使用寿命。

[0155] 本发明的双链式结构中, “汇聚节点设置在与其交换信息的所有传感器节点的中间”, 其中, “中间” 的含义并不严格代表汇聚节点两边的传感器节点个数相同。当与汇聚节点交换信息的传感器总数为偶数时, 汇聚节点两侧的传感器个数是相同的, 即为传感器总数的一半; 当与汇聚节点交换信息的传感器总数为奇数时, 汇聚节点两边的传感器个数就是不相同的, 其中一侧的传感器个数为 (传感器总数 + 1) / 2, 另一侧的传感器个数则为 (传感器总数 - 1) / 2。

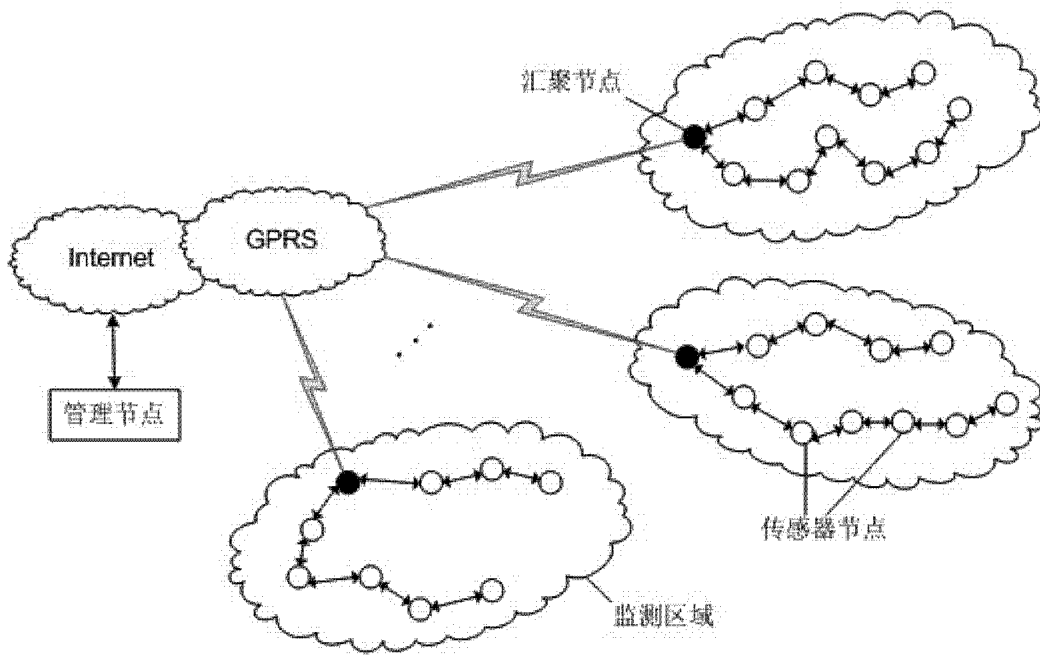


图 1

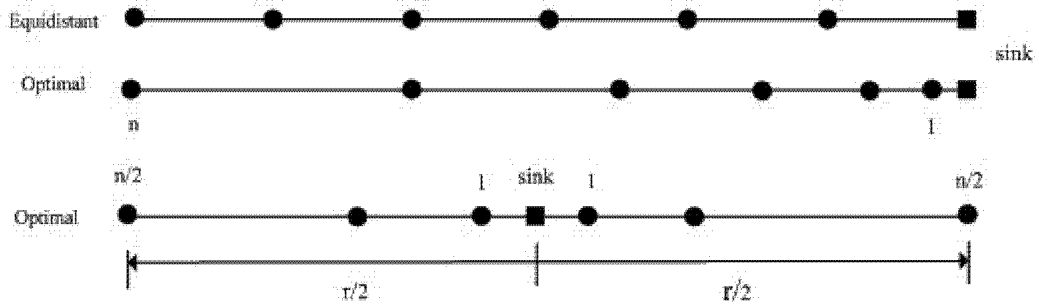


图 2

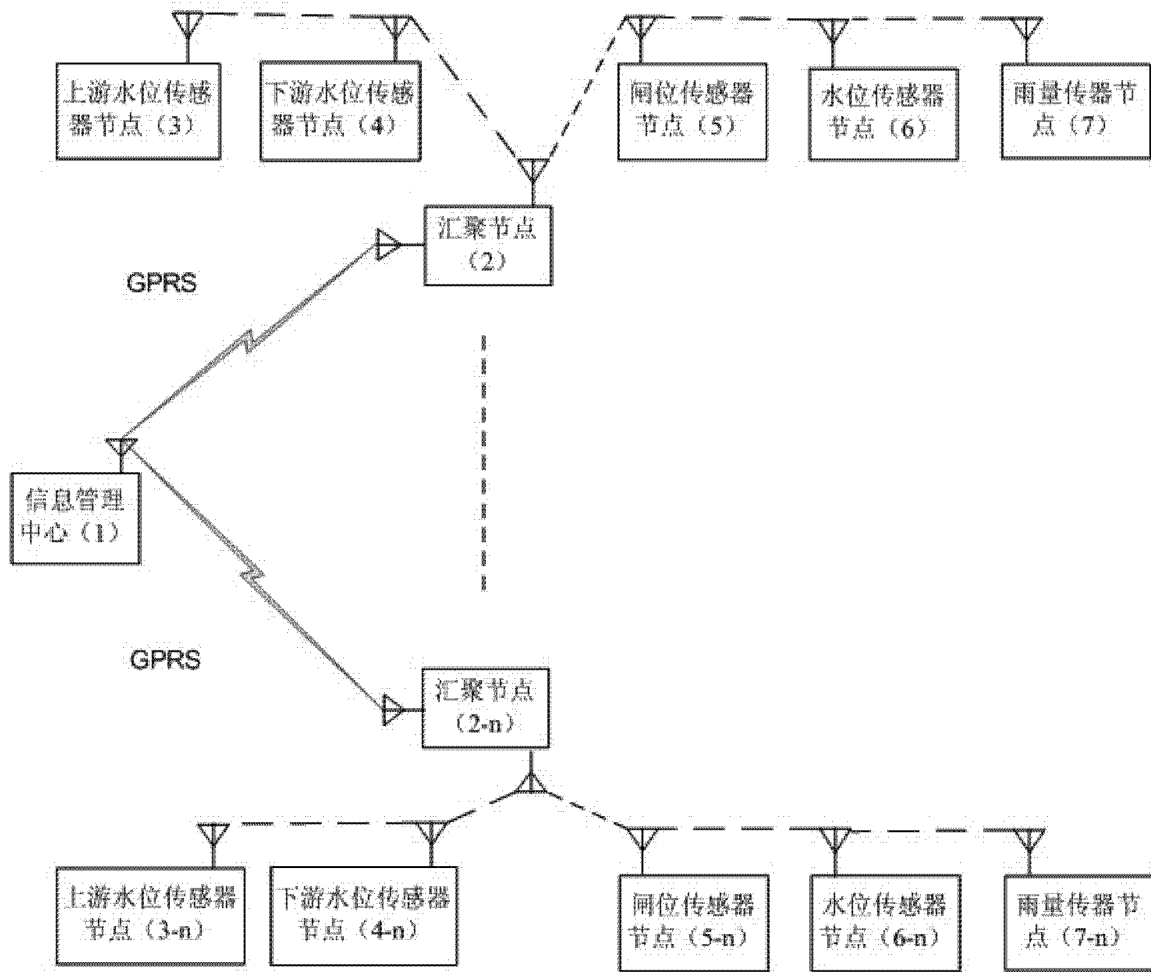


图 3

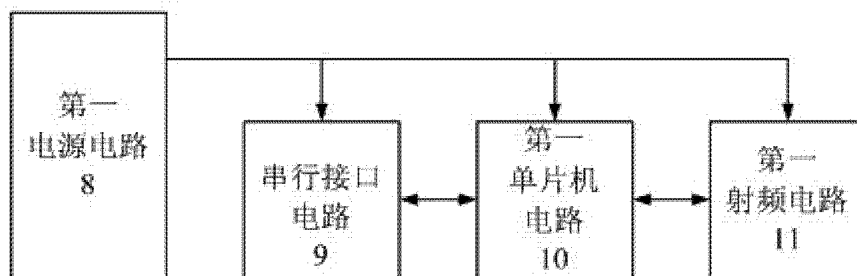


图 4

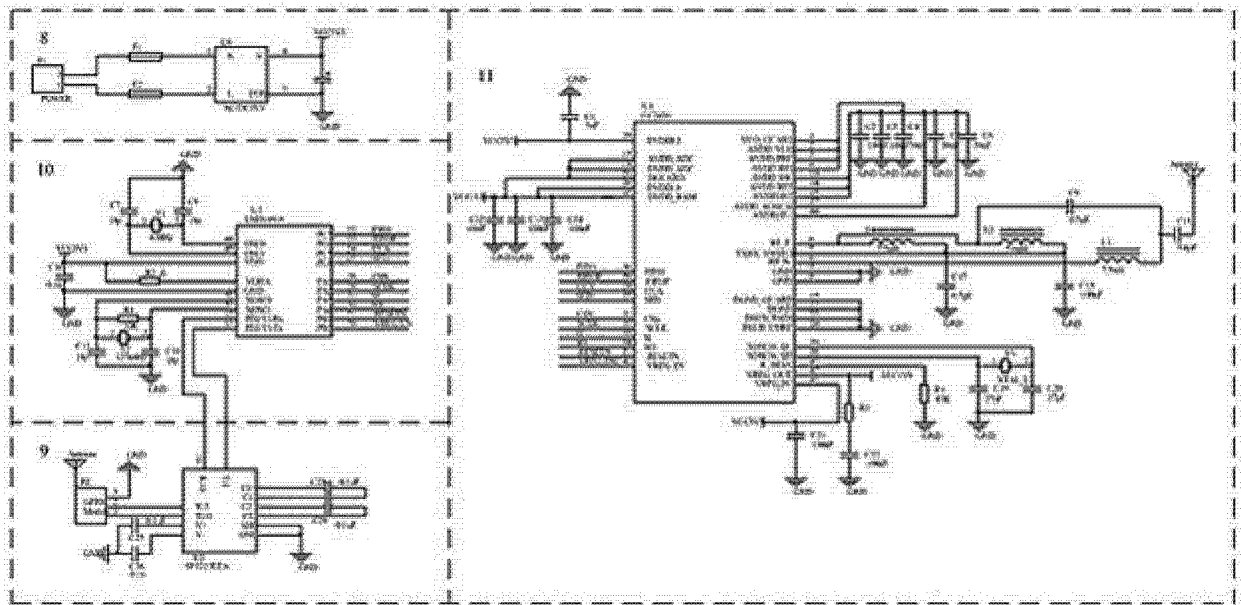


图 5

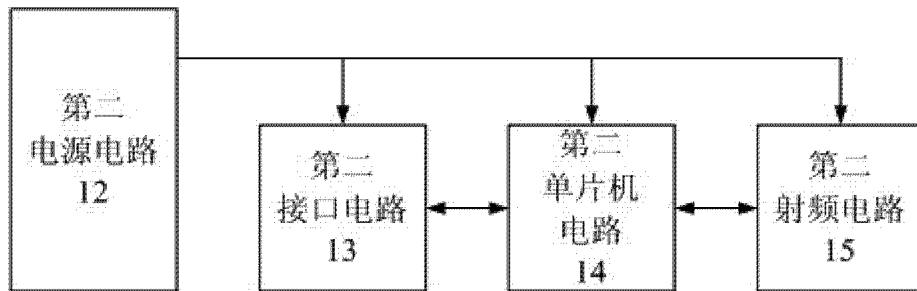


图 6

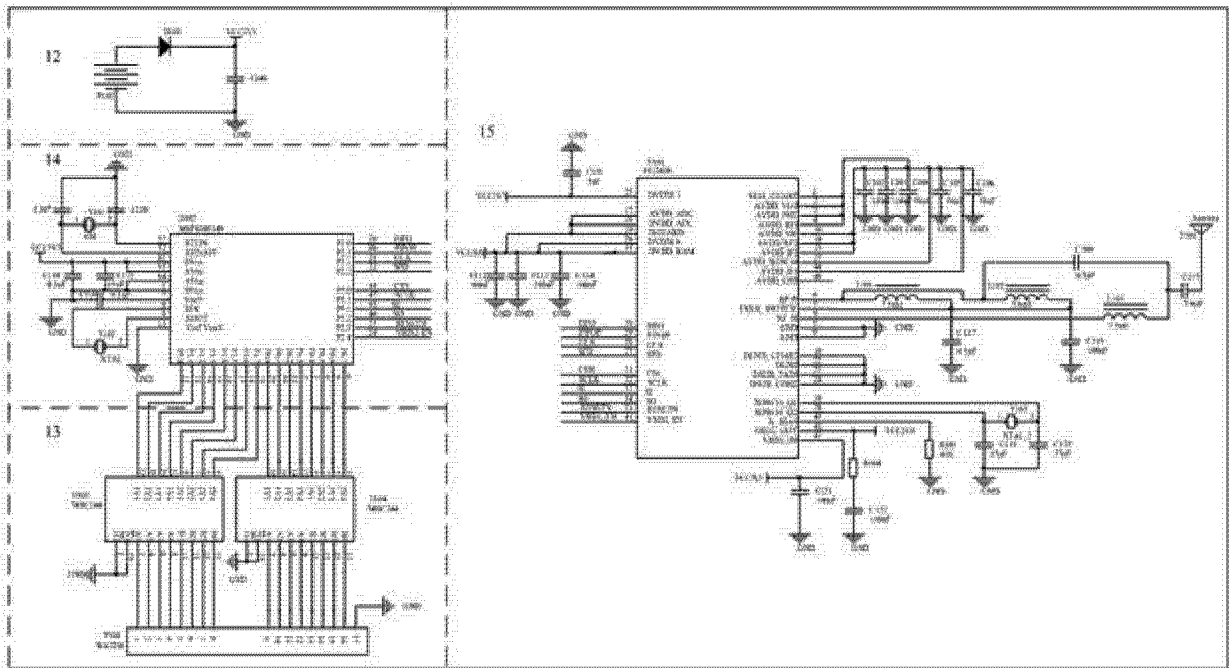


图 7

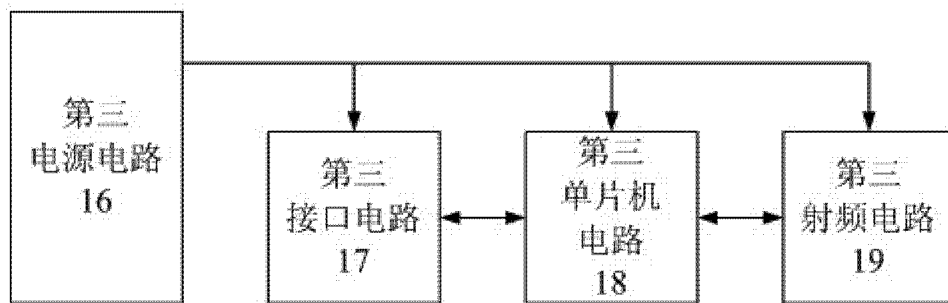


图 8

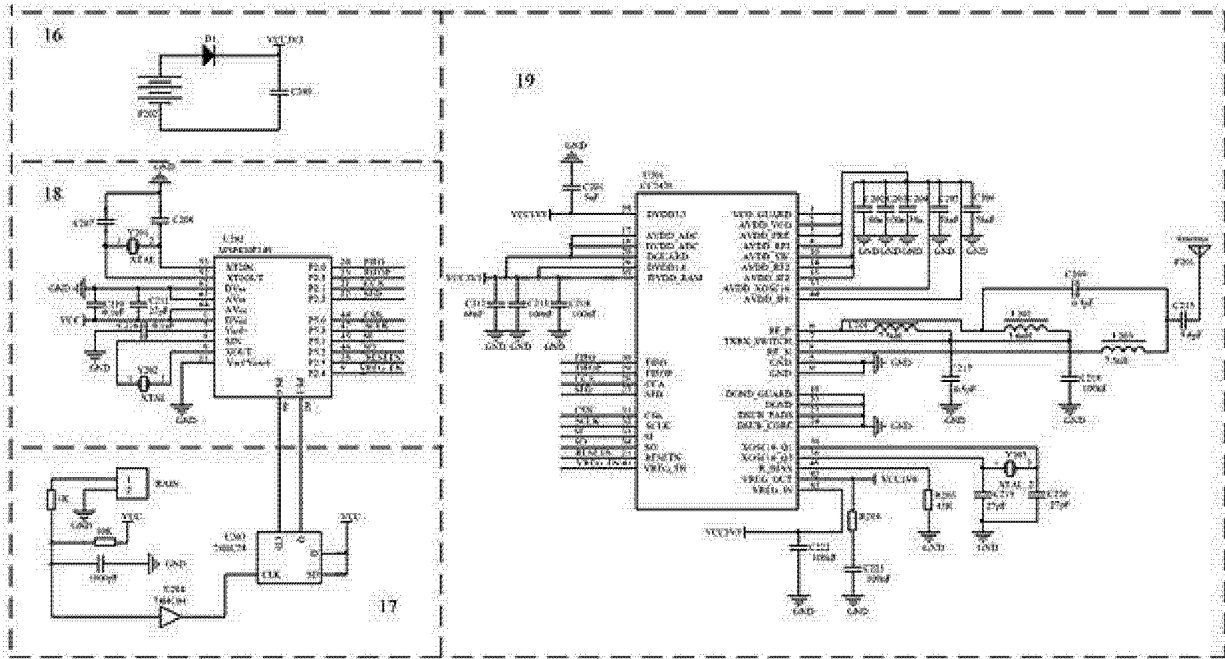


图 9

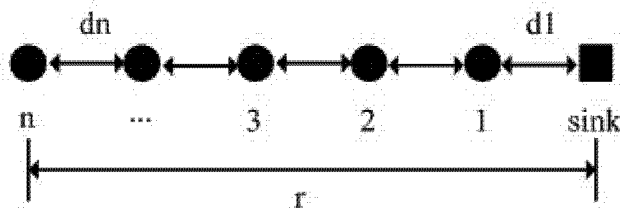


图 10

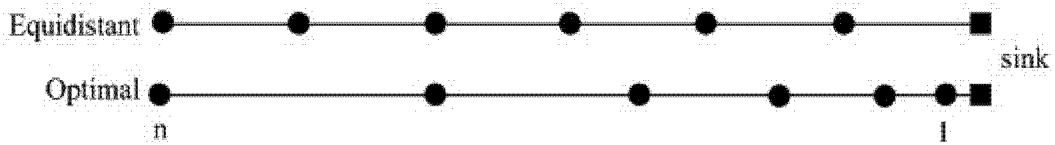


图 11

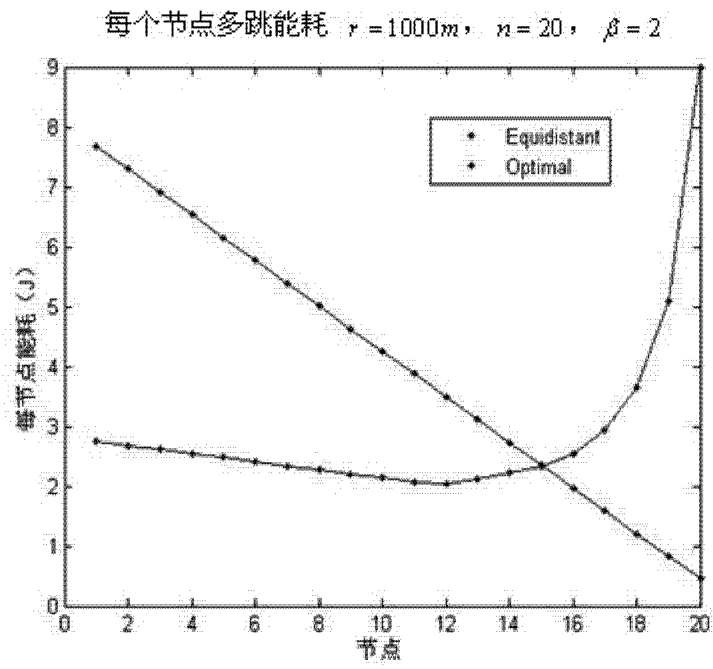


图 12

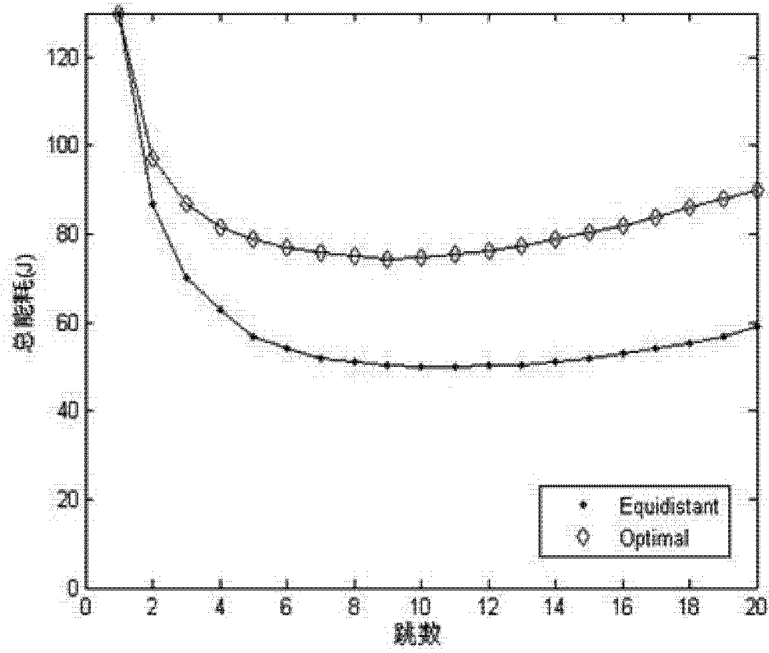


图 13

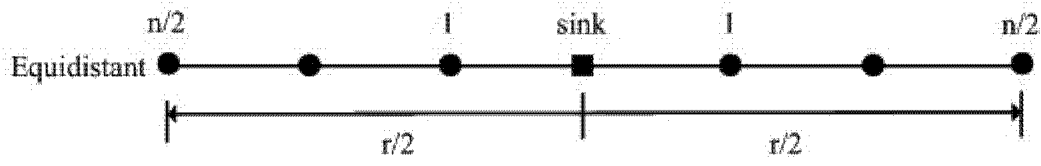


图 14

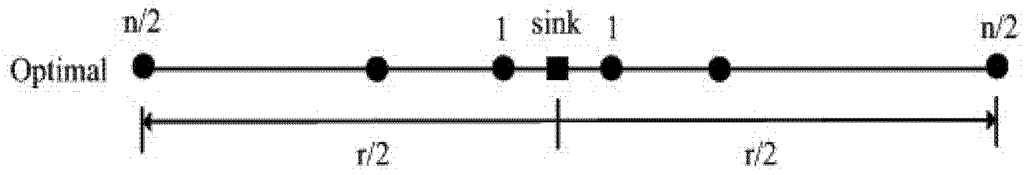


图 15